

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ЦЕНТР МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Филиппова Полина Сергеевна

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЙОДА В СИСТЕМЕ
УДОБРЕНИЯ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА
РОССИИ**

Специальность – 4.1.3 – Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин
растений

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор, член-корреспондент РАН
Иванов Алексей Иванович

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ	
ГЛАВА 1 ПРИМЕНЕНИЯ ЙОДНЫХ МИКРОУДОБРЕНИЙ (ОБЗОР	
ЛИТЕРАТУРЫ).....	14
1.1 Геохимия йода в почвах России.....	15
1.2 Физиологическая потребность человека и растений в йоде.....	24
1.3 Агроэкологическая эффективность йодных удобрений.....	29
1.3.1 Зависимость продуктивности культур от применения йода.....	30
1.3.2 Влияние йодных микроудобрений на качество товарной	
продукции.....	33
1.4 Механизм воздействия йода на физиологические процессы в	
растении.....	37
ГЛАВА 2 УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ	
ИССЛЕДОВАНИЙ.....	40
2.1 Характеристика объектов исследования.....	41
2.1.1 Характеристика почв полевых опытов.....	42
2.1.2 Краткая характеристика культур севооборота.....	44
2.2 Погодно-климатические условия при проведении	
экспериментов.....	49
2.3 Агротехника возделывания культур.....	55
2.4 Методика проведения исследований.....	57
АГРОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ	
ГЛАВА 3 УДОБРЕНИЯ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ	
ЙОДИСТОГО КАЛИЯ.....	64
3.1 Агрономическая эффективность применения йодистого калия в	
системе удобрения картофеля.....	64
3.1.1 Влияние окультуренности почвы, систем удобрения и	
йодистого калия на рост и развитие картофеля.....	64
3.1.2 Зависимость продуктивности картофеля от окультуренности	
почвы, системы удобрения и применения йодистого калия.....	72
3.2 Агрономическая эффективность применения йодистого калия в	
системе удобрения однолетних трав.....	83
3.2.1 Влияние окультуренности почвы, систем удобрения и	
йодистого калия на рост и развитие однолетних	
трав.....	84
3.2.2 Зависимость продуктивности однолетних трав от	
окультуренности почвы, системы удобрения и применения	
йодистого калия.....	88
3.3 Агрономическая эффективность применения йодистого калия в	
системе удобрения многолетних трав.....	96
3.3.1 Влияние окультуренности почвы и йодистого калия на рост и	
развитие многолетних трав.....	97
3.3.2 Зависимость продуктивности многолетних трав от	

	окультуренности почвы и применения йодистого калия.....	104
	ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ	
ГЛАВА 4	ЙОДИСТОГО КАЛИЯ НА КАЧЕСТВО ОСНОВНОЙ	
	ПРОДУКЦИИ.....	111
4.1	Зависимость основных показателей качества продукции от	
	применения йода в системе удобрения.....	111
4.2	Влияние систем удобрения с использованием KI на накопление	
	йода в продукции.....	123
4.3	Зависимость содержания нитратов в продукции от систем	
	удобрения с использованием йодистого калия.....	131
ГЛАВА 5	ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕКОРНЕВЫХ	
	ПОДКОРМОК ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР ЙОДИСТЫМ КАЛИЕМ..	136
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	140
	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НАУЧНЫХ	
	ВЫВОДОВ.....	144
	ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	145
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	146
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	149
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	179
	ПРИЛОЖЕНИЕ А – Перечень йодированных пептидов и	
	белков.....	180
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Метеоусловия в вегетационные периоды	
	2018 - 2022 гг.	185
	ПРИЛОЖЕНИЕ В – Технологические карты применения	
	йодной подкормки и уборки дополнительного урожая	186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современные исследования по всему миру показывают, что заболевания, вызванные дефицитом йода, широко распространены и требуют внедрения серьезных профилактических мероприятий. Дефицит йода вызывает различные заболевания, среди которых нарушения функций щитовидной железы, сердечно-сосудистые и заболевания желудочно-кишечного тракта, бесплодие, эндемический зоб и др. (Скородок и др., 2013; Платонова, Трошина, 2015).

По данным Всемирной организации здравоохранения более 2 млрд человек в мире проживает в условиях йододефицита (WHO, 2001). В России практически нет регионов с достаточной обеспеченностью йодом, а по данным эндокринологических исследований в настоящее время зафиксирован рост распространенности различных форм тиреоидной патологии у населения (Трошина и др., 2021). Детальная оценка суточного поступления йода с продуктами питания у жителей европейской части России, показала, что для всех изученных рационов питания поступление микроэлемента не превышало 10-20 % от необходимой физиологической потребности (Горбунов и др., 2011).

Северо-Западный регион России отличается низким содержанием йода в водах и почвах, и характеризуется умеренным йодным дефицитом даже в прибрежной к Балтийскому морю части (Панасин и др., 2002). При этом дефицит йода в кормовом рационе негативно сказывается на здоровье и продуктивных свойствах сельскохозяйственных животных (Короткова и др., 2011; Лычева и др., 2012; Шалак и др., 2014; Плешакова, Машкина, 2019). Это обстоятельство имеет особенно важное значение для региона, где сельскохозяйственное производство специализировано на животноводстве, а земледелие – на производстве кормов (Научные основы..., 2018, Рекомендации по развитию..., 2021; Растениеводство Ленинградской области..., 2022).

Для компенсации дефицита йода у населения необходимо его введение в ежедневный рацион питания. Основой для дополнения всех макро- и микроэлементов и витаминов, необходимых для правильного функционирования организма человека, является сбалансированная диета, главными продуктами которой являются овощи, фрукты и зерновые продукты (Гинс и др., 2017; Пивоваров и др., 2017; Nestel et al. 2006; White and Broadley, 2009). Применительно же к йоду особое значение имеют морепродукты, отличающиеся естественной повышенной концентрацией элемента, а также молочные продукты, в которых связанный с казеином йод отличается хорошей усвояемостью организмом (Пилипенко, Пилипенко, 2007; Лигомина и др., 2018).

В современных условиях, когда действие государственных программ йодирования соли и других продуктов признается недостаточно эффективным (Платонова, Трошина, 2015; Трошина и др., 2021; Zimmermann, Andersson, 2011) всё большее значение приобретает биообогащение продуктов питания и кормов этим важнейшим микроэлементом (Кашин, 2008; Панасин и др., 2019; Lawson et al., 2016; Li et al., 2017; Duborska et al., 2020). Биообогащение сельскохозяйственных культур йодом состоит из набора методов, позволяющих получать растительные продукты с концентрациями йода, которые частично или полностью обеспечивают суточную потребность человека и сельскохозяйственных животных. При этом экономически эффективными могут быть различные стратегии от селекционного поиска до прямого применения йодсодержащих удобрений (Khan et al., 2017; Sakmak et al., 2020). На фоне накопленных данных об эффективности различных йодсодержащих удобрений (Кашин, 1987; Голубкина, Кекина, Надежкин, 2015; Kabata-Pendias, Mukherjee, 2007) их введение в системы удобрения отдельных сельскохозяйственных культур может служить важным фактором активизации ростовых процессов, увеличения их продуктивности и обогащения продукции йодом.

Таким образом, научное обоснование применения йодных микроудобрений имеет актуальный характер для решения задач продовольственной безопасности и здоровьесбережения населения России и ее Северо-Западного региона.

Степень изученности темы.

Активные исследования микроэлементов и их роли в растениеводстве были начаты в 60-70-е годы прошлого века. Всестороннее изучение функций йода в растениях было проведено отечественными учеными М.В. Ефимовым (Ефимов, 1960, 1962, 1963), В.К. Кашиным (Кашин, 1977, 1987; Кашин, Осипова, 1978), В.Ф. Портянко (Портянко, 1980; Портянко, Костина, 1968), Ю.А. Потатуевой (Потатуева, Прокофьева, 1970; Потатуева и др., 1974). Этими исследованиями была раскрыта физиологическая роль йода в растениях. В частности, было установлено, что йод в растениях находится в составе структурных компонентов клетки и принимает участие в важнейших метаболических процессах – азотном и водном обменах, дыхании и фотосинтетической деятельности.

М.В. Ефимов положил начало изучению физиологического действия йода на растения в агрохимическом аспекте применения в Забайкальском крае (Ефимов 1960, 1962). В.О. Мохнач глубоко и разносторонне изучал биологические свойства йода и его влияние на человека и растения. Вместе со своими сотрудниками Мохнач раскрыл закономерности влияния различных форм йода на состояние растений. В том числе установил антибактериальные и фунгицидные свойства йода в комплексе с органическими полимерами (Мохнач, 1968; Мохнач, 1974). В.К. Кашин широко изучил влияние йода на растения. Он внес большой вклад в исследование йодной проблематики растений, собрав и обобщив имеющиеся на тот момент данные по геохимии и фитофизиологии йода в своей монографии (Кашин, 1987).

В настоящее время продолжают исследования почв и растений с точки зрения оптимизации их обеспечения йодом, носящие, преимущественно, локальный региональный характер (Дибирова и др., 2005; Сысо, Ильин, 2008;

Яковлева и др., 2016б; Гаджимусиева, Сайдиева, 2017). В Западно-Сибирском регионе проблематика гео- и агрохимии йода в почвенном покрове активно разрабатывается В.Н. Якименко и Г.А. Конарбаевой (Конарбаева, Якименко, 2015, 2019; Конарбаева, Смоленцев, 2018). Группой исследователей под руководством академика РАН А.Х. Шеуджена обоснованы регламенты применения йодных микроудобрений на посевах риса в условиях Краснодарского края (Яковлева, Шеуджен, 2016; Яковлева и др., 2017; Яковлева и др., 2016; Яковлева, 2018).

На Северо-Западе России системные многомасштабные исследования по йодной проблематике с середины 90-х годов выполнены научной группой ГЦАС «Калининградский» под руководством проф. В.И. Панасина (Панасин и др., 2002, 2019а, 2019б). Ими были установлены: закономерности пространственного распределения йода в почвах агроландшафтов Калининградской области; параметры агрономической эффективности применения йода под отдельные овощные и кормовые культуры; характер воздействия йодных удобрений на основные качественные показатели сельскохозяйственной продукции.

За рубежом проблема биообогащения сельскохозяйственной продукции йодом находится в зоне повышенного внимания агро- и биохимиков. Ряд важных фундаментальных и прикладных аспектов был раскрыт группой исследователей под руководством S. Smoleń (Smoleń et al., 2011, 2014, 2015, 2022). Важные достижения в этом направлении были обобщены в книге “Iodine Biofortification of Crops” (Dávila-Rangel et al., 2019). При этом частично раскрыты биохимические механизмы воздействия йода на отдельные синтетические процессы в растительных клетках, показано преимущество йодидной формы перед йодатной при использовании в качестве удобрения и её повышенная токсичность, установлены фактические параметры бионакопления йода отдельными культурами, выявлены перспективы совместного биообогащения растительной продукции йодом и селеном

(Lawson et al., 2016; Li et al., 2017; Golubkina et al., 2018; Jerše et al., 2018; Duborska et al., 2020; Izydorczyk et al., 2020).

Несмотря на наличие обнадеживающих данных удовлетворительной агрономической эффективности йодных микроудобрений, в том числе и на Северо-Западе России (Панасин и др., 2002; Иванов и др., 2019а, 2021; Котова и др., 2021), регламенты их применения до настоящего времени не разработаны. При этом неоспоримым является тот факт, что обоснованное применение микроэлементов является одним из важных факторов повышения общей эффективности систем применения удобрений и повышения качества товарной продукции и кормов в современном земледелии (Анспок, 1990; Ефимов и др., 2002; Шеуджен и др., 2006; Методическое..., 2008; Завалин и др., 2010; Борисов, 2016; Шеуджен, 2016).

Одним из ключевых вопросов при использовании йодных микроудобрений остается оптимальная доза, так как даже незначительное ее превышение вызывает токсичные эффекты (Mackowiak et al., 2005). Остается не выясненной роль биологических особенностей культур, сопутствующих почвенно-агрохимических и погодно-климатических условий в эффективности йодных микроудобрений. Применительно к Северо-Западному региону России нет и четкого представления о потенциальных возможностях бионакопления йода доминирующими в структуре посевных площадей культурами: многолетними и однолетними травами, зерновыми, картофелем и др.

Цель и задачи исследования

Целью исследования являлось проведение комплексной оценки систем удобрения с применением йода на культурах полевого севооборота в условиях Северо-Западного региона России.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. изучить влияние некорневых подкормок йодом и специфики почвенно-агрохимических условий на рост и развитие ряда культур полевого севооборота;

2. установить уровень оптимальных дозировок КІ и кратности некорневых подкормок картофеля, многолетних и однолетних трав в различных почвенно-агрохимических условиях на агродерново-подзолистой почве;
3. выявить агрономическую и энергетическую эффективность йодных некорневых подкормок в системах удобрения картофеля и кормовых трав;
4. изучить влияние некорневых подкормок растворами КІ на качество основной продукции картофеля, многолетних и однолетних трав;
5. определить параметры биообогащения клубней картофеля и сырья для производства кормов йодом.

Научная новизна исследования состоит в комплексной оценке применения йода в системе удобрения картофеля, многолетних и однолетних трав на агродерново-подзолистой почве различной окультуренности в условиях Северо-Запада России. Впервые получены экспериментальные данные о влиянии широкого диапазона концентраций рабочего раствора КІ (от 0,005 до 0,64 %) и кратности некорневых подкормок (1, 2, 3) на рост, развитие, продуктивность, показатели качества основной продукции и потенциал бионакопления йода в ней. Установлены оптимальные с позиций агрономической эффективности параметры концентрации рабочего раствора КІ для некорневой подкормки картофеля, однолетних и многолетних трав и кратности ее проведения в зависимости от степени окультуренности агродерново-подзолистой почвы и уровня применения удобрений. Показано, что при оптимальном дозировании КІ содержание йода в сухом веществе клубней картофеля может быть повышено со 172 до 310-384 мкг/кг, зеленой массы однолетних трав – со 105 до 640-695 мкг/кг и многолетних трав – с 88 до 611-861 мкг/кг.

Теоретическая значимость работы состоит:

- в расширении базы знаний и выявлении закономерностей формирования урожая сельскохозяйственных культур при их возделывании в различных почвенно-агрохимических условиях и системах удобрения с применением йодистого калия;

- в определении фактического потенциала бионакопления йода культурами полевого севооборота при применении некорневой подкормки растворами KI.

Практическая значимость работы состоит:

- в научном агрономическом обосновании применения йодных микроудобрений в системе удобрения полевых культур на агродерново-подзолистых почвах различной степени окультуренности;
- в установлении оптимальных концентраций раствора KI и кратности некорневых подкормок картофеля, однолетних и многолетних трав, формирующих базу данных для разработки регламента его применения в качестве микроудобрения.

Методология и методы исследований. В основу планирования исследования была положена концепция оптимизации минерального питания полевых культур. Методология исследования включала в себя полевой и лабораторный методы, сопровождаемые необходимым объемом статистической обработки основных результатов. Основу фактологической базы исследования составили результаты полевых стационарных экспериментов. Полученные в них образцы изучаемых объектов были подвергнуты химико-аналитическим исследованиям в аккредитованной испытательной лаборатории.

Положения, выносимые на защиту:

- отзывчивость полевых культур на применение йода определяется их биологическими особенностями, погодными и почвенно-агрохимическими условиями;
- бионакопление йода в основной продукции картофеля, многолетних и однолетних трав зависит от особенностей культур, сопутствующих агротехнологических условий их возделывания и уровня применения йода в системе удобрения;

- на картофеле некорневое применение йодистого калия целесообразно 0,02 % рабочим раствором в виде двух- и трехкратного опрыскивания на окультуренных почвах с соответствующим им основным удобрением;

- кормовые травы, не требовательные к высокому плодородию почв, эффективнее обрабатывать 0,08-0,16 % раствором йодистого калия однократно при возделывании на почвах со слабой и средней степенью удобрённости.

Степень достоверности. Требуемый уровень объективности и достоверности исследования был достигнут за счет строгого соблюдения методических принципов планирования и проведения полевых экспериментов и применения стандартизированных методик определения качества основной сельскохозяйственной продукции в аккредитованной испытательной лаборатории с использованием поверенного оборудования. Общий научно-методический контроль за проведением исследования осуществлялся Ученым советом СЗЦППО – СПб ФИЦ РАН. Статистический анализ результатов исследования позволяет оценить представленные в диссертационной работе выводы как достоверные.

Апробация работы. Результаты исследования были доложены на Международной научно-практической конференции «Мелиорация почв для устойчивого развития сельского хозяйства» в Кирове 26–27 февраля 2019 года, на II Международной научной конференции «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего», посвященной памяти академика Е. И. Ермакова в Санкт-Петербурге 2–4 октября 2019 года, на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы управления циклом азота в современном земледелии» во Владимире 17–20 сентября 2019 года, на Международной научно-практической конференции с элементами школы молодых ученых «Научные приоритеты адаптивной интенсификации сельскохозяйственного производства» в Краснодаре 3–5 июля 2019 года, на международной научно-

практической конференции «Современное состояние, приоритетные задачи и перспективы развития аграрной науки на мелиорированных землях» в Твери 25 сентября 2020 года, на международной научной конференции «Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства», Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2022 года, на 2 Международной конференции по цифровизации сельского хозяйства и органическому производству (ADOP 2022), Санкт-Петербург, 6-8 июня 2022 года.

Организация исследования и личный вклад соискателя. Научное исследование выполнено в 2018-2023 гг. в отделе землепользования и растениеводства СЗЦППО – СПб ФИЦ РАН в рамках Государственного задания «Разработать научные основы управления качеством и безопасностью продукции растениеводства и животноводства на Северо-Западе и Арктической зоне РФ с учетом ограничения агроклиматических и агроэкологических рисков (№ 0659-2019-0008)». На заключительном этапе в 2024 году работа выполнялась при финансовой поддержке Российского научного фонда и Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения «Фонд поддержки научной, научно-технической, инновационной деятельности» в рамках гранта «Биообогащение сельскохозяйственной продукции йодом в условиях Санкт-Петербургской агломерации», № 24-16-20021.

Планирование исследования, отдельных опытов, их закладка и проведение с выполнением задач программы наблюдений и учетов, отбор образцов и их подготовка к анализам, а также статистическая обработка и обобщение результатов работы выполнялись соискателем лично.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 13 научных работ, из них 6 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа включает оглавление, введение, 5 глав основной части, заключение, рекомендации по использованию научных выводов, перспективы дальнейшей разработки темы,

список публикаций по теме диссертации, список использованной литературы, приложения. Общий объём диссертации 190 страниц печатного текста, включает 11 рисунков и 38 таблиц в тексте и 12 таблиц – в приложениях. В списке литературы 261 источник, в том числе 80 на английском языке.

Благодарности. Выражаю искреннюю благодарность за всемерное содействие в организации исследования директору СЗЦППО - СПбФИЦ РАН, кандидату техн. наук Тюкалову Ю.А. и директору Меньковского филиала ФГБНУ АФИ, кандидату с.-х. наук Коневу А.В.; за помощь, оказанную в закладке и проведении полевых экспериментов – сотрудникам отдела физико-химической мелиорации и опытного дела АФИ: старшему научному сотруднику, кандидату с.-х. наук Ивановой Ж.А., младшему научному сотруднику, кандидату с.-х. наук Филиппову П.А. и лаборанту Смирновой Н.В.; за помощь в проведении химико-аналитических исследований – сотрудникам аналитической лаборатории Меньковского филиала ФГБНУ АФИ, испытательной лаборатории ФГБНУ АФИ под руководством кандидата биол. наук Ю.В. Хомякова, сотрудникам станции агрохимической службы во главе с директором ФГБУ ГСАС «Псковская» Вязовским А.А.; за ценные советы в процессе выполнения исследований – заведующему лабораторией опытного дела ФГБНУ АФИ, доктору биол. наук Шпаневу А.М.; за активное содействие и помощь в проведении исследований – ученому секретарю СЗЦППО – СПб ФИЦ РАН, кандидату с.-х. наук Даниловой Т.А. Особая благодарность за всестороннюю помощь в закладке и организации опытов, а также в обобщении результатов исследований научному руководителю доктору сельскохозяйственных наук, профессору, член-корреспонденту РАН А.И. Иванову.

ГЛАВА 1. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЙОДНЫХ МИКРОУДОБРЕНИЙ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Ионные формы йода очень электрохимически активны, поскольку атом йода обладает легко поляризуемой электронной оболочкой. Большинство связей с йодом слабее, чем аналогичные связи с более легкими галогенами. Большой радиус атома и относительно низкая энергия ионизации дают возможность элементу быть не только акцептором, но и донором электронов во многих химических реакциях.

Йод проявляет в своих соединениях различные степени окисления: -1; +1; +3; +5; +7, что позволяет за счет легкости перехода между различными валентными соединениями существовать большому количеству химических форм соединений йода. Таким образом, соединения йода присутствуют в микроколичествах во всех объектах живой и неживой природы.

Йод является типичным рассеянным элементом и не образует месторождений. Глобальный цикл йода представляет собой динамическое равновесие, поскольку включает в себя водную, воздушную и биогенную миграцию. Йод занимает важное положение среди биофильных элементов, поскольку его природа заключается в накоплении преимущественно в тканях живых организмов. Его коэффициент биологического поглощения, то есть отношение концентрации этого элемента в золе наземных растений к кларку верхнего слоя земной коры, составляет 12 (Добровольский, 1998). Основным резервуаром содержания йода является Мировой океан и морская биота. Воздушным путем и с атмосферными осадками йод достигает почвы, где закрепляется гумусовым горизонтом и почвенной микрофлорой. Часть йода поглощается растениями. Благодаря микробиологическим и абиотическим процессам йод выделяется в атмосферу, а также при процессах поверхностного и подземного стока, йод возвращается в океан, замыкая тем самым круговорот йода в биосфере.

1.1 Геохимия йода в почвах России

В.И. Вернадский основал науку биогеохимию и был первым в России, кто начал фундаментально изучать биогеохимию рассеянных элементов, каковым является йод (Вернадский, 1954). В 30-х годах XX века А.П. Виноградов ввел понятие «биогеохимических провинций», т.е. областей, отличающихся от соседних по уровню содержания в них химических элементов и тем самым вызывающих различную биологическую реакцию флоры и фауны (Виноградов, 1938). А.П. Виноградов установил, что эндемический зоб у животных проявляется при содержании I в почвах ниже $10^{-5}\%$. С 50-х годов прошлого века в СССР стали широко проводиться работы по изучению содержания микроэлементов в почвах, растениях и животных организмах. Благодаря обширным исследованиям ГЕОХИ АН СССР по разработанной В.В. Ковальским методологии районирования и картирования таксонов биосферы были описаны биогеохимические провинции по всему Советскому Союзу как с дефицитом, так и с избытком макро- и микроэлементов (Ковальский и Андрианова, 1970). Разработанная В.В. Ковальским система биогеохимического районирования рассматривает в единстве геохимическую среду и физиологические и биохимические свойства организмов, которые взаимосвязаны биогеохимическими пищевыми цепями. Эколого-геохимические исследования В.В. Ковальского положены в основу нормирования микроэлементов (в том числе и йода) в питании животных и людей.

Земная кора отличается невысоким содержанием йода – 0,4 мг/кг (Войткевич и др., 1977). В природе йод существует в рассеянном виде и не образует минеральных залежей (Вернадский, 1954). Биогеохимический цикл йода включает в себя активную воздушную и водную миграцию (Кашин, 1987). Йод является типичным рассеянным элементом земной коры, свыше 90 %, которого содержится в Мировом океане, подземных рассолах и солевых

озёрах, так как гидросфера является мощным аккумулятором и источником поступления йода на континент. Значительные скопления его находятся в морских водорослях, губках и других морских организмах. В северных морях (Северное, Белое, Балтийское) солёность воды меньше и концентрация йода в них ниже – 18-36 мкг/л, чем в южных, более солёных морях (Красное, Средиземное, Адриатическое) – 54-70 мкг/л (Виноградов, 1967). Йод в виде газа и аэрозоля переносится ветром и дождем на сушу, где он аккумулируется в почвах главным образом в форме йодида (I^-) и йодата (IO_3^-). В дождевой воде йод присутствует в концентрации 2 мкг/л (Bowley, 2013).

Адсорбция йода гумусовым горизонтом происходит преимущественно за счет атмосферного йода, поэтому отмечается самое высокое содержание йода в поверхностном слое почвы 0-5 см (Буркат, 1965; Розен, 1970). Наряду с другими почвами (Yamaguchi et al., 2008; Kodama et al., 2006) для дерново-подзолистых почв характерна аккумуляция йода в поверхностном горизонте в пределах 10 см (Тихомиров и др., 1980). Результаты показали, что внесенный KIO_3 в подпахотный горизонт остался в исходном количестве и не было обнаружено следов его перехода в органическую форму, в то время как в образце поверхностного горизонта почвы 100% йода в йодатной форме перешло в органическую, а неорганического йода не обнаружилось (Yamaguchi et al., 2008). Органическое вещество имеет способность сохранять и удерживать йод в почве (Fuge and Johnson, 1986). Есть свидетельства, что неорганический йод включается в состав гумусовых веществ (Francois, 1987; Kerpler et al., 2004; Warner et al., 2000).

Преимущественную роль сорбции почвой йода отдают гумусу (Sheppard et al., 1995), где йод образует комплексные соединения с фульво- и гуминовыми кислотами (Xu et al., 2011). Йод часто связывается органическим веществом за счет формирования химической связи C-I (Francois, 1987; Carpenter et al., 1999) и около 50% от валового содержания йода в нем аккумулируется (Конарбаева, Демин, 2011).

Так, обнаружено, что гуминовые кислоты в два раза больше содержат йода, чем фульвокислоты (Конарбаева, Демин, 2011). Установлено, что перераспределение йода между различными наземными экосистемами происходит и за счет микробиологических процессов (Amachi et al., 2003; Amachi, 2008). Для внутриконтинентальных районов коэффициент корреляции содержания йода и гумуса в почве варьирует в диапазоне 0,58-0,90 (Кашин, 1987).

Основные формы йода в почве представлены в виде йодида (I^-), йодата (IO_3^-) и органически связанного йода (Yamada et al., 1999, 2002; Yuita, 1992). Для почв пахотного горизонта красно-желтых почв Японии было установлено, что 10, 40 и 50 % приходятся на долю I^- , IO_3^- и органического йода соответственно (Kodama et al., 2006). Среди этих форм йодид является наиболее подвижной. Повышение концентрации I^- в почвенном растворе происходит за счет реакции восстановления IO_3^- , который менее подвижен (Yamaguchi et al., 2006).

В то время как pH и окислительно-восстановительный потенциал почв влияют на видообразование и подвижность I, органическое вещество почвы, по-видимому, является доминирующим фактором, контролирующим аккумуляцию I в почвах. (Schwehr et al., 2009; Kaplan, 2003; Xu et al., 2011).

Тип горной породы влияет в меньшей степени на содержание йода в почвах, а большее влияние оказывает содержание гумуса. Почвообразующие породы в целом имеют невысокое содержание йода. Такого же мнения придерживаются и другие ученые, которые отмечают незначительную роль почвообразующих пород в аккумуляции йода почвами (Зимовец, Зеленова, 1963; Адерихин, Протасова, 1969).

Выделяют три геохимических барьера с максимумами накопления йода в отдельных горизонтах почвы: гумусовом (йод связывается органическим веществом), карбонатном (происходит снижение подвижности йода под влиянием повышения pH) и горизонте, близком к залеганию грунтовых вод (в

результате испарения воды происходит перемещение йода вверх по профилю) (Александровская, 1979; Кашин, 1987).

Следующим фактором, влияющим на накопление йода, является содержание илистой фракции. В состав илистой фракции в основном входят глинистые минералы, обладающие большой поглотительной способностью, что способствует накоплению йода в почвах (Кашин, 1987).

Ещё одним фактором аккумуляции йода в почве является реакция среды почвенного раствора. Йод по своему химическому строению образует различные анионы. Но реакция среды сильно влияет на обеспеченность почвы формами йода. Так, в щелочной среде йод представлен йодидом I^- , йодатом IO_3^- и перйодатом IO_4^- . А в кислой среде йодидом и свободным йодом (Конарбаева, Смоленцев, 2018). Повышенная кислотность раствора препятствует закреплению йода в почвах. В почвах с высоким содержанием ионов Fe^{3+} и Mn^{4+} , а также таких при воздействии O_2 и ультрафиолетового света, происходит окисление йода в форме йодида до элементарного йода, который улетучивается в атмосферу (Конарбаева, Якименко, 2012). В связи с кислой реакцией среды, в подзолистых почвах отмечается низкое содержание йода, в отличие от почв с щелочной реакцией, где йод удерживается карбонатным геохимическим барьером (Кашин, 2008).

Значительное варьирование содержания йода сопряжено с общей минерализацией, а также сезонной динамикой природных вод (Шеуджен, 2003; Колмыкова, 2017). Так, содержание йода в почвах приурочивают не только к типу почвы, но и по принадлежности к классу водной миграции (Березкин и др., 2016). Стоит отметить, что в природных водах большая часть йода находится в форме йодатов. В условиях промывного и периодически промывного режима усиливается миграция йода по профилю из-за высокой растворимости его солей (Кашин, 1987; Шеуджен, 2003). После периода дождей была отмечена быстрая миграция йода вниз по профилю (Александровская, 1979). В то же время легкорастворимые соли в составе почвы способствуют накоплению йода, так как соли улучшают адсорбцию

йода (Розен, 1970). Содержание растворимого йода в почвах обычно составляет <10% от общего количества йода, зафиксированного в почве. Доступность растворимого йода выше при низком окислительно–восстановительном потенциале (Eh) (с I^- доминирующей химической формой йода) и ниже в условиях окисления (с IO_3^- в качестве наиболее распространенной формы) (Fuge, Johnson, 2015). Так, в затопленных почвах, где окислительно-восстановительный потенциал низок, йод восстанавливается и десорбируется из частиц почвы в почвенный раствор в виде йодида, а затем превращается в реакционноспособные летучие вещества (Yuita, 1992).

Важную роль в геохимическом круговороте йода играют почвенные бактерии, которые способствуют улетучиванию йода в виде йодистого метила (CH_3I). Способность почвенных бактерий метилировать йод широко распространена, в этом процессе участвуют часто встречающиеся группы микроорганизмов (Amachi et al., 2003). Биотическая трансформация йода в метил-йодиды играла также заметную роль в олиготрофных отложениях на полигонах ядерных отходов (Bagwell et al., 2019).

Содержание йода значительно варьирует в пределах одного типа почв и даже ландшафта. Это подтверждается рядом исследований (Коробова и др., 2013; Березкин и др., 2016), где установлена зависимость содержания йода в почве от микроразнообразия почвенной неоднородности. Кроме того, погодные условия также сильно влияют на перераспределение йода в почвах. Согласно данным (Александровская, 1979; Кашин, 1987), солнечная погода способствует испарению влаги и миграции йода вверх по профилю, а в дождливый период глубина накопления йода увеличивается.

На территории России отмечена тенденция снижения содержания йода с юга на север – от лесостепи к тундре (Конарбаева, Смоленцев, 2014). Данное положение наглядно иллюстрируют материалы таблицы 1.

Таблица 1 – Характеристика почв России по валовому содержанию йода

Регион	Тип почвы	Валовое содержание йода, мг/кг	Источник
1	2	3	4
Калининградская область	Дерново-подзолистые	1,15-2,04	Панасин и др., 2019
	Дерновые глеевые	1,42-4,06	
	Аллювиальные	2,59-2,90	
Забайкальский край	Каштановые	1,5	Кашин, 2008
	Черноземы	2,8	
	Серые лесные	2,1	
	Аллювиальные луговые	2,9	
	Аллювиальные дерновые	1,7	
	Торфянисто-болотные	6,1	
Западная Сибирь	Черноземы	1,21-6,4	Конарбаева, Якименко, 2012
	Дерново-подзолистые	0,23-2,36	
	Серые лесные	1,4-3,0	
	Солончаки	5,6-33,2	
	Солонцы	1,8-18,7	
	Дерново-подзолистые	2,0	Сысо, Ильин, 2008
	Лугово-черноземные	4,0	
	Черноземы	3,5-6,0	
	Серые лесные	1,5-4,0	
	Солонцы	4,0-5,5	
Курская область	Серые лесные	0,34-0,50	Жукова, Ходыревская, 2011
	Черноземы	0,49-0,66	
Брянская область	Серые лесные	2,3	Коробова и др., 2013
	Дерново-подзолистые	1,47	
Республика Дагестан	Каштановые	4,81-5,89	Дибирова и др., 2005
	Луговые	1,75-3,85	
	Солончаки	1,84-2,31	
	Пески	0,66	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Республика Тыва	Горно-лесные бурые	2,0	Пузанов, 2005
	Горно-лесные черноземовидные	1,5	
	Черноземы обыкновенные	2,5	
	Черноземы южные	2,4	
	Каштановые	2,0	
Омская область	Черноземы обыкновенные	0,42-2,21	Курдуманова, Жарких, 2019
	Серые лесные осолоделые	1,16	
	Лугово-черноземные солонцеватые	1,23	
		2,81	
	Луговые		
Центрально-Черноземная зона	Светло-серая лесная	1,37-2,6	Малышева, 2021
	Серая лесная	1,73-1,82	
	Черноземы выщелоченные	3,38-4,68	
	Черноземы типичные	5,35-5,50	
Горный Алтай	Горно-луговые	0,8-4,28	Мальгин, 2001
	Горно-лесные бурые	1,10-3,18	
	Горно-лесные серые	0,40-3,88	
	Черноземы оподзоленные и выщелоченные	3,08-5,48	
		Сл.-3,29	
	Каштановые	5,24-8,84	
	Черноземы луговые		

Аномально высокие концентрации йода наблюдаются в щелочных солончаковых почвах (Аникина, 1975). Содержание йода в подзолистых почвах варьирует в пределах 0,6-4,4 мг/кг, серых лесных 0,3-6,7, черноземах 2,0-9,8, сероземах 1,3-3,8, красноземах 6,4-12,0 (Шеуджен, 2003).

На территории Российской Федерации геохимические аномалии йодного дефицита приурочены преимущественно к горным районам или территориям со значительным повышением рельефа. Также низким

содержанием йода в почвах отличаются регионы, удаленные от морей, и приуроченные к зоне тайги и тундры (Шеуджен, 2010).

Чтобы охарактеризовать распространение йода в почвах и оценить их обеспеченность элементом В.А. Ковда предлагал брать за эталон по обеспеченности почв йодом черноземы Центрально-Черноземного заповедника (5,4 мг/кг) (Ковда и др., 1959).

В.В. Ковальский (Ковальский, 1972) разработал первую в нашей стране классификацию почв по валовому содержанию йода: $<5,0$ – недостаточное содержание, $5,0-40,0$ – нормальное, $>40,0$ мг/кг – избыточное. С ее применением было установлено, что почти весь почвенный фонд Нечерноземной зоны РФ слабо обеспечен йодом. И это при том, что оценка обеспеченности почв йодом по валовому содержанию йода не отражает обеспеченности йодом животных и растений в данном регионе, и необходимо оценивать этот критерий по концентрации водорастворимого йода в почве. С этой целью применяется классификация Ю.Г. Покатилова: $0,011-0,03$ мг/кг – низкая обеспеченность йодом, $0,03-0,05$ мг/кг – пониженная и $0,05-0,10$ мг/кг – оптимальная (Покатилов, 1993).

Влияние земледелия на содержание почвенного йода зависит от генезиса, исходных свойств и режимов почвы, а также характера и интенсивности агротехнологического воздействия на неё. В почвах сельскохозяйственных угодий, как правило, основные запасы йода сосредоточены в пахотном слое. Большинство агротехнических приёмов, направленных на усиление продукционного процесса сельскохозяйственных растений (обработка почвы, осушительная и оросительная мелиорация, интенсивное применение органических и минеральных удобрений), способствуют снижению содержания йода в почвах (Горбунова, Куликова, 2021).

Известкование кислых почв формирует благоприятные для закрепления йода физико-химические условия и в определенной мере способствует его накоплению в почвах (Ходыревская, 2009). Внесение извести из расчета по 1

гидролитической кислотности привело к снижению кислотности почвы, уменьшению количества подвижного марганца, и за счет этого к увеличению накопления в растениях йода (Потатueva, Прокофьева, 2005). О негативном влиянии марганца указывается и в других источниках. По данным Allard et al. (2010) присутствие оксидов марганца в почвах способствует абиотическому образованию метил-йодида и последующему его улетучиванию. Однако, несмотря на улучшение условий аккумуляции йода при известковании, его доступность для растений в целом может даже снижаться (Кашин, 1987).

Поскольку валовое содержание йода в почвах тесно коррелирует с содержанием гумуса в них и уровнем обменной кислотности, то при обсуждении влияния земледельческой деятельности на состояние йода в почвах нужно учитывать накопление органического вещества и усиление биологической активности почв при окультуривании для предотвращения почвенного дефицита йода. Но и при интенсивном окультуривании почвы ключевую роль в поведении соединений йода продолжает играть тип водного режима. Так в почвах с промывным водным режимом (подзолистые, дерново-подзолистые) было выявлено низкое содержание водорастворимого йода, которое служило важным фактором повышения отдачи йодных микроудобрений (Конарбаева и др., 2022).

Подробное изучение корреляционных связей количества йода в почве с агрохимическими характеристиками позволяют сделать вывод о слабом участии йода в почвообразовательном процессе (Жукова, Ходыревская, 2012). Авторами установлено, что окультуривание почв, приводящее к улучшению агрохимических показателей и более высокой поглотительной способности почв, не позволило существенно повысить содержание йода вследствие более интенсивного его выноса растениями (Жукова, Ходыревская, 2011).

Исходя из совокупности перечисленных факторов, предполагается более целесообразным применение йода непосредственно в виде некорневой обработки растений и предпосадочной обработки посадочного материала, а не

внесения йода в почву во избежание его неэффективного использования из-за высокой миграционной способности.

1.2 Физиологическая потребность человека и растений в йоде

Для человека жизненно важно иметь регулярное поступление йода в организм с продуктами питания. Дефицит йода приводит к возникновению йододефицитных заболеваний, к которым относят диффузный нетоксический зоб, узловой и многоузловой коллоидный нетоксический и токсический зоб, тиреотоксикоз, гипотиреоз (в случае тяжелого дефицита йода) (Трошина, 2012; Stojšavljević et al., 2021), а также сопутствующим заболеваниям, таким как, психическая заторможенность, атеросклероз, заболевания желудочно-кишечного тракта, риску развития опухолей. Функциональные патологии щитовидной железы приводят к многочисленным заболеваниям сердечно-сосудистой системы (Taylor et al., 2018). Российские ученые в области эндокринологии указывают на проблему повсеместного дефицита йода у населения России (Трошина, 2022; Трошина и др., 2012; Трошина и др., 2021).

Данные мониторинга распространенности зоба у населения России (за период с 2009 по 2016 гг.) зафиксировали высокую распространенность этой патологии. Показатель распространенности зоба составил 1,2%. За последние 5 лет фиксируется тенденция роста заболеваемости патологиями щитовидной железы, вызванных дефицитом йода (Мельниченко и др., 2019).

85-95% йода поступает в организм человека из пищи. Оставшиеся 5-15% поступают в организм человека через воду и атмосферный воздух. При расщеплении пищи в кишечнике, йод высвобождается и поступает в кровь, откуда захватывается щитовидной железой и почками. Йод находится в крови на 25% в виде йодида и на 75% в виде йодированных жирных кислот и аминокислот (Панасин и др., 2002).

В сфере гигиены питания в настоящее время утверждены Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в

энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации», где прописано, что физиологическая потребность для взрослых в йоде – 150 мкг/сутки. Физиологическая потребность для детей – от 70 до 150 мкг/сутки. Для беременных потребность в йоде 220 мкг/сутки и кормящих составляет 290 мкг/сутки (Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21).

Во многих развитых странах, в том числе и в Российской Федерации, задача профилактики йододефицита возложена на государственные программы йодирования поваренной соли и (или) хлебобулочных изделий. В целом, справляясь с ограничением развития наиболее тяжелых патологий, они по разным причинам не решают проблемы в полной мере ни в нашей стране (Самсонова, Касаткина, 2010; Хинताल, 2010; Платонова, Трошина, 2015; Трошина и др., 2021), ни за рубежом (Платонова, Трошина, 2015; Zimmerman, Andersson, 2011). В нашей стране проблема усугубляется еще и недоступностью для значительной части населения обогащенных йодом морепродуктов (Dedov et al., 2000; Fedak, Troshina, 2007), а также наличием локальных районов, испытывающих последствия загрязнения радиоактивными изотопами йода и его пространственной неоднородностью (Коробова и др., 2013, 2016; Коробова, 2017).

Поэтому в настоящее время остро необходим общедоказательный закон о профилактике йододефицитных заболеваний и построении централизованной системы по контролю за исполнением профилактических мероприятий на федеральном и региональном уровнях. Принятая сегодня добровольная форма профилактики йододефицита у населения фактически не обеспечивает реализации международных критериев и не несет должного эффекта по снижению распространенности хронических йододефицитных заболеваний (Мельниченко и др., 2019).

Физиологическая роль йода в биохимии сельскохозяйственных животных не менее выраженная, чем у человеческого организма. По этой причине постоянный недостаток данного микроэлемента в кормах негативно сказывается на репродуктивной функции животных и продуктивности всего

животноводства (Лигомина и др., 2018; Плешакова, Машкина, 2019; Franke et al., 2009), являющегося основной товарной отраслью сельского хозяйства на Северо-Западе РФ (Рекомендации..., 2022).

Установлено, что растения также остро нуждаются в йоде и в условиях невысокого содержания йода в почвах на территории РФ дополнительное применение йода стимулирует продуктивность растений (Кашин, 1995). Недостаточное содержание йода в почвах отрицательно влияет на рост и урожайность сельскохозяйственных растений (Панасин и др., 2019).

В виду того, что йод необходим растениям в очень малых количествах, то сложно определить степень дефицита йода и его лимитирующие последствия, поскольку йод поступает в растениях в микроколичествах не только из почвы, но и с атмосферным воздухом и осадками (Fuge, Johnson, 1986). Исследования подтверждают, что малые количества йода – 0,02-0,04% KI в виде раствора при обработке посевной площади стимулируют рост растений и дают прибавку урожайности (Кашин, 1987; Данилова и др., 2022). Исходя от обратного, можно сделать вывод, что недостаток такого количества микроэлемента лимитирует продуктивность растений.

В пользу необходимости йода растениям говорит тот факт, что в агроценозах интенсивных культур возделывания было отмечено снижение содержания йода. Вынос йода из почвы вместе с отчуждаемой сельскохозяйственной продукцией сильно возрастал и превышал его поступление. Из этого следует, что почвенный дефицит йода лимитирует продуктивность агроценоза (Конарбаева, Якименко, 2012).

Советскими учеными было доказано, что йод принимает участие в активации ферментов, окислительно-восстановительных реакциях внутри клетки, влияет на углеводный обмен, усиливает фотосинтез и др. (Власюк, 1974; Школьник, 1974; Портянко, 1980; Власюк и др., 1983). Последние исследования зарубежных ученых установили физиологическую роль йода в организме растений, где он выступает компонентом биологических

соединений, принимая органическую форму, и выполняет каталитическую и регуляторную функции (Kiferle et al., 2021).

Так, ученые отмечают усиление антиоксидантной активности растений ферментами и низкомолекулярными антиоксидантами, такими как глутатион и аскорбиновая кислота, под действием йода в малых концентрациях (Leyva et al., 2011). Blasco с соавторами указывают, что применение KI увеличивало накопление фенольных соединений и аскорбиновой кислоты, повышая тем самым антиоксидантный потенциал растений салата (Blasco et al., 2008). Посредством усиления антиоксидантной активности йод защищает растения на клеточном уровне, препятствуя окислительному повреждению белков, нуклеиновых кислот и углеводов, интенсифицируя метаболические процессы в растении и увеличивая урожайность. Йод увеличивал содержание хлорофилла *a* на 18%, но не повлиял на содержание хлорофилла *b* в растениях *Brassica juncea*. Также более чем в два раза увеличилось количество флавоноидов в листьях *B. juncea*, что свидетельствует о стимулировании йодом биосинтеза флавоноидов (Golubkina et al., 2018). Известно, что флавоноиды обладают антиоксидантной активностью (Di Ferdinando et al., 2011). Эффективность фотосинтеза и индекс содержания хлорофилла растений картофеля при поливе водой, содержащей йод, значительно возрастали (Dobosy et al., 2020).

Йод ускорял поступление азота в растения и включение его в белки (Ягодин, Халилов, 1979). Отмечается увеличение именно доли белкового азота в растениях под влиянием йода, например, доля белка в моркови увеличивалась с 5,8 до 8,4 г/100 г с. в. (Piątkowska et al., 2016), а содержание небелкового азота остается на том же уровне или даже снижается. Подтверждается, что йод стимулировал биосинтез белка (Алексеев, 1969; Кашин, 1972).

Ещё в 60-70 годах прошлого века советскими учеными было установлено по изменению фракций белков и содержания белкового и небелкового азота, что йод влияет на синтез аминокислот (Сагатов, 1963;

Кашин, 1987). При применении йода происходили изменения в синтезе отдельных аминокислот, в частности, йод приводил к увеличению скорости образования аминокислот основного ароматического и гетероциклического рядов (Портянко и др., 1969).

В зависимости от объекта исследования от 10 до 60% йода найдено в белковых соединениях и 40-90% в виде свободных ионов. Йод в виде свободных ионов содержится в основном в вакуолях клеток (Эпштейн, 1968).

Г.А. Конарбаева также указала на наличие в растениях сложных неводорастворимых форм йода, поскольку концентрация йода была выше содержания водорастворимой формы йода (Конарбаева, 2014). При изучении процесса извлечения йода из морской капусты было выявлено, что до 94 % йода находилось в водно-спиртовой вытяжке, до 83 % — в солянокислой вытяжке, до 62 % — в водной вытяжке (Вишневская, 2003).

Есть сведения, что йод связывается в основном аминокислотами. Большая часть йода в белковых молекулах связывается ароматическими аминокислотами тирозином и отчасти тиронином, которые легко йодируются (Кашин, 1987). Под воздействием йода повышалось содержание общего количества аминокислот и незаменимых аминокислот в кормовых травах (Костин и др., 2014). Есть сведения, что содержание свободных аминокислот повышается под воздействием йода в редисе (Strzetelski et al., 2010).

Также было зафиксировано, что йод стимулировал адаптацию к солевому стрессу (Leyva et al., 2011). Было установлено увеличение засухоустойчивости растений под влиянием обработки йодом, что было связано с увеличением свободной и связанной воды, а также увеличением пролина в растениях (Синдерева и др., 2016). Также было установлено положительное влияние йода на устойчивость посевов риса к полеганию за счет большего образования целлюлозы и активации процесса лигнификации тканей стебля, что усиливает механические свойства стебля (Шеуджен, 2003).

Таким образом, йод является незаменимым и остро необходимым для нормального развития всех организмов микроэлементом. Для предотвращения

негативных последствий его систематического недостатка в пище необходима постоянная профилактики йододефицита посредством планомерного увеличения содержания йода в рационе питания жителей нашего региона и России в целом. Растения на фоне йодной недостаточности также нуждаются в дополнительном поступлении элемента, что стимулирует их рост, развитие, иммунитет и способствует улучшению качества основной сельскохозяйственной продукции. Исследование применения йода в сельском хозяйстве в качестве способа повышения йода в пищевой продукции для человека и кормах для животных обусловлено острой актуальностью проблемы йододефицита.

1.3 Агроэкологическая эффективность йодных удобрений

В литературе приводятся многочисленные данные об увеличении урожайности под влиянием йодных удобрений (Кашин, 1979; Dai et al., 2004; Равашдех, 2005; Синдерева и др., 2016; Яковлева и др., 2016; Яковлева и др., 2017; Степанова и др., 2017). Однако эффекты от применения йода могут быть, как положительными, так и отрицательными. Здесь важную роль играют особенности культуры, дозировки раствора йода, кратности обработок, а также погодные условия. При неправильно подобранной схеме обработок могут проявляться негативные эффекты, связанные с избытком элемента и последующими токсическими проявлениями, такими как ингибирование роста, некрозы и антоциановая окраска листьев.

Йод в зависимости от особенностей культуры, а также условий выращивания растений, способа применения и доз йодных удобрений способствует улучшению показателей качества продукции, среди которых наиболее важным является содержания йода.

1.3.1 Зависимость продуктивности культур от применения йода

Биологические особенности растений наряду с другими факторами, определяющими эффективность йодных микроудобрений, могут способствовать проявлению различной отзывчивости на их применение. По Кашину В. К. (1987) более отзывчивыми культурами являются пшеница, огурцы, томаты и хлопчатник, а менее – кукуруза, сахарная свекла, картофель, ягодные и плодовые культуры. Pauwels (1961) наблюдал, что йод благоприятно сказывался на росте растений шпината, клевера белого, кормовой свеклы, томатов, райграса, ячменя, льна, пшеницы и горчицы. На гречихе положительного влияния отмечено не было. Однако при тех же дозах внесенного йода развитие овса было ингибировано. Стоит отметить, на примере риса убедительно показано, что даже сортовые особенности накладывают свое влияние на отзывчивость культуры (Naeem et al., 2022).

При применении йодных удобрений существенное значение имеют форма соединения элемента, прием и способ внесения (основной прием внесения в почву, предпосевная обработка семян или некорневая подкормка вегетирующих растений). Исследования, посвященные сравнению приемов внесения йода, показали преимущество некорневых обработок и предпосевной обработки семян по сравнению с почвенным внесением. Некорневые обработки люцерны в виде водного раствора позволяют растениям накапливать йод значительно больше, чем при почвенном внесении того же количества йодида калия в твердом виде (Altinok et al., 2003).

По некоторым данным, йод, внесенный в почву, доступен растениям только в течение короткого периода времени, о чем свидетельствует быстрое снижение CaCl_2 -экстрагируемого йода в верхнем слое почвы (Lawson et al., 2015). Установлен очень короткий период непосредственной доступности йода, в течение которого I после осадков или орошения остается в почвенном растворе и доступен для сельскохозяйственных культур (Humphrey et al.,

2020). Поэтому долгосрочное действие однократного удобрения почвы йодом мало ожидаемо.

Многие отмечают, что форма йодида I^- более эффективна с точки зрения накопления йода и повышения продуктивности (Ojok et al., 2019), но в то же время и более токсична в отличие от формы йодата IO_3^- (Blasco et al., 2008; Caffagni et al., 2011), и йодида требуется меньше при применении. В опытах было отмечено, что йодат благоприятнее воздействовал на рост растений, чем йодид, особенно на начальных стадиях развития. Отчасти это может быть связано с тем, что растения поглощают йодат медленнее, чем йодид, поскольку на ранних стадиях растения более чувствительны к передозировке йодом (Pauwels, 1961).

Дозировка имеет крайне важное значение. На примере люцерны дозы 1 и 1,5 кг/га KI при почвенном внесении давали прибавку в среднем 12 %, при внесении 2 кг/га, достоверной прибавки не установлено (Altinok et al., 2003). При некорневом внесении в литературе оптимальными концентрациями раствора указываются 0,001-0,1% (Кашин, 1987). Однако зачастую авторы исследований либо не указывают объем раствора, либо называют разные его количества, что затрудняет унифицировать научную информацию. Есть исследования, посвященные сравнению влияния эквивалентных доз йода, внесенных в почву и в некорневую подкормку (Altinok et al., 2003; Ledwożyw-Smoleń et al., 2020; Lawson et al., 2015).

Почвенные условия могут также оказывать заметное влияние на эффективность применения йодных микроудобрений. В частности, в эксперименте, проведенном на двух типах почв, на культуре сахарной свеклы прибавки урожайности отличались в два раза. На черноземной почве прибавки урожайности были меньше по сравнению с лугово-аллювиальной почвой (Нестеров, 1961). Также важно понимать обеспеченность йодом почвы для определения дозы, поскольку на обеспеченных этим элементом почвах дополнительные дозы йода могут приводить к отрицательному эффекту. В одном из экспериментов одинаковая доза KI давала прибавку урожая пшеницы

в 30 % в условиях выщелоченного чернозема, а на карбонатном и тучном черноземах действовала негативно, снижая урожай на 16 и 25 % соответственно (Чмелев, 1967).

Погодно-климатические условия во многом определяют физиологическое состояние растений и поэтому оказывают значительное влияние на отзывчивость сельскохозяйственных культур практически на все виды удобрений, в том числе и йодные (Иванов и др., 2016; Иванов, Конашенков, 2018; Рекомендации..., 2022). Как сильная засуха, так и обильные осадки способствуют снижению воздействия йода на растения. В проведенном эксперименте по влиянию увлажнения на эффективность предпосевной обработки семян овса различными концентрациями KI было установлено, что в засушливых условиях эффект от йода заметно ниже, чем при благоприятном увлажнении. При должном увлажнении почвы эффективными оказались более высокие концентрации KI, чем при недостаточном увлажнении, где они уже проявляли ингибирующее действие (Кашин, 1987).

Таким образом, анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что агрономическая эффективность йодных микроудобрений зависит от целого комплекса сопутствующих факторов. При риске негативных последствий при передозировке являются вполне вероятными. Несмотря на вполне очевидное превосходство некорневой подкормки растений растворами полярных йодсодержащих солей, технологические регламенты их применения до настоящего времени не разработаны. Не являются очевидными ни оптимальные концентрации рабочих растворов, ни обоснованная кратность их использования, тем более применительно к довольно многообразным почвенно-агрохимическим условиям Северо-Западного региона нашей страны.

1.3.2 Влияние йодных микроудобрений на качество товарной продукции

Различные виды растений обладают селективной способностью накопления йода (Кашин, 1987). Так, все растения семейства бобовые содержат йода в 2-3 раза больше, чем капуста, турнепс и картофель. В зеленых частях всех растений йода содержится больше, чем в клубнях и корнеплодах (Обухова, Гололобов, 1969). Различные сорта бобовых культур очень отличались по способности накапливать йод при их проращивании (Smoleń et al., 2011). На примере пастбищной растительности – клевера и щучки дернистой – было отмечено различное накопление йода растениями. Есть мнение, что видовые особенности растения в накоплении йода доминируют над геохимическими условиями его произрастания (Коробова и др., 2013). Однако Кашин В. К. считает, что содержание йода в растениях является видовым признаком, но абсолютную его величину определяет экологический фактор (Кашин, 1987).

Применение йодных удобрений эффективно повышает содержание йода в растениях (Dai et al., 2004; Ранделин и др., 2013; Блинникова, Елисеева, 2015; Синдирева и др., 2016; Котляров, 2017). В недавнем обзоре сведены данные о содержании йода в овощах после обработки йодом (Duborská et al., 2020). Так, морковь при выращивании в условиях применения йода содержала йода 0-5000 мкг/100 г сырой массы, петрушка 500-16000, огурец 30-120, салат 45-300, перец 100-500, картофель 1870-3400, редис 100-1300, клубника 400-4133, шпинат 6-824 и томат 200-100 мкг/100 г сырой массы. Опрыскивание яблонь позволило повысить содержание йода во фруктах до целевого диапазона 50-100 мкг на 100 г сырой массы и даже до рекомендуемой суточной дозы йода для взрослых (при опрыскивании большей дозой KI из расчета 1 кг и 1,5 кг на га) (Wójcik and Wójcik, 2021).

Некорневое опрыскивание KI и KIO₃ в период колошения и ранней молочной спелости зерна увеличивало концентрацию йода в зерне в 5-10 раз, не влияя на урожайность зерна (Sakmak et al., 2017).

Таблица 2 - Содержание йода в воздушно-сухой массе растений, возделываемых в Калининградской области (по Панасину и др., 2002)

Культура	Среднее содержание йода в растениях, мг/кг с.в.
Пшеница (зерно)	0,44
Пшеница (солома)	0,48
Рожь (зерно)	0,60
Рожь (солома)	0,42
Ячмень (зерно)	0,58
Ячмень (солома)	0,33
Капуста	0,85
Морковь	0,51
Томат	1,86
Картофель	0,60
Кукуруза	0,47
Клевер	0,75
Люцерна	0,74
Вика	0,80
Рапс	0,44

Агрохимической службой Калининградской области было определено содержание йода в основных сельскохозяйственных культурах. Все культуры накапливали йод в широком диапазоне значений и в таблице представлены усредненные данные (табл. 2).

Значения содержания йода варьируют от 0,1 до 1,8 мг/кг с.в. Наибольший размах значений фиксируется у томата и составляет 0,64-4,83 мг/кг с.в. (Панасин и др., 2002).

Результаты зарубежных исследований указывают на то, что йод транспортируется по флоэме после ее внекорневого распыления на листья. На примере шпината было выяснено, что после поглощения йод присутствовал в составе органических молекул или I^- со значительно большей концентрацией в апопласте, чем в симпласте (Humphrey et al., 2019). Например, у растений салата йод, вносимый с внекорневой подкормкой, был способен поступать в корни (Smoleń et al., 2014). В растениях томатов радиомеченый йод (^{125}I) был способен перемещаться из обработанного листа на оставшиеся побеги и плоды в значительных количествах (Landini et al., 2011). Флоэмный перенос йода из

листьев в зерно пшеницы был также обнаружен Hurtevent et al. (2013) путем нанесения радиомеченого йода (^{125}I) на листья в низких дозах, сравнимых с атмосферным осаждением йода (Hurtevent et al., 2013).

Однако есть литературные данные, которые не подтверждают эту информацию, так при обработке листьев растений томатов йодатом калия, в них была обнаружена высокая концентрация йода, но не в плодах (Fuentes et al., 2022). Также на примере яблони при обработке листьев плодового дерева раствором NaI было установлено, что йод поглощался и накапливался внутри листа, а перенос в плоды был незначительным (Yanaï et al., 2022).

По данным Калининградских ученых (Панасин и др., 2002), распределение йода в растениях озимой ржи носило выраженный дискриминационный характер: в корнях концентрация йода была равна 2,14 мг/кг, в листьях – 1,48 мг/кг, в стеблях – 1,23 мг/кг, в колосьях – 0,69 мг/кг. Таким образом, имеет место дискриминация йода при переходе его из вегетативных в генеративные органы. Однако в стадии полной спелости зерна оно выступает определенным аккумулятором йодистых соединений (табл. 2).

Важные результаты были получены японскими учеными в изучении поглощения йода растениями. Так, при добавлении йодида в почву с растениями риса через 4 дня йодид полностью поглощался растениями, и почва не отличалась по содержанию йода от контрольной почвы. А при добавлении йодата было зафиксировано значительное повышение содержания йодида, однако, не было отмечено повышения содержания йодата. Также была отмечена корреляция между повышенной ферментативной активностью корней риса и увеличением органических форм йода в почве, что говорит о выделении корнями соединений с йодом. Это свидетельствует о том, что форма I^- беспрепятственно поглощается корнями, а форма IO_3^- сначала восстанавливается до I^- (Yamagami and Yanaï, 2022). Известно, что йодат калия легко восстанавливается до йодида щавелевой и муравьиной кислотой (Корзанов и др., 2011). Эти и другие органические кислоты представляют

собой корневые экссудаты, которые участвуют в восстановлении йодата и переходе части йода в органическую форму и закрепляются в почве.

В силу своего положительного влияния на физиологические процессы в растениях йод способствует улучшению и их качественных показателей. Так, в корнеплодах моркови наблюдалось увеличение содержания глюкозы, фруктозы, сахарозы и общих сахаров и растворимых веществ (Osuna et al., 2014; Smoleń et al., 2014). В томате при применении IO^{-3} увеличивалось содержание аскорбиновой кислоты и общего количества фенольных соединений (Smoleń et al., 2015). При внесении йода повысилось содержание аскорбиновой кислоты и сахарозы в ягодах земляники (Потатуева, Прокофьева, 2005). Обработка йодом также усиливала накопление аскорбиновой кислоты у черной смородины (Равашдех, 2005). У обогащенной йодом моркови увеличивалась доля золы (Piątkowska et al., 2016). KI и KIO_3 увеличивали содержание P, K и Ca в овощах (Ранделин и др., 2013). Под влиянием некорневых обработок горчицы сарептской йодидом калия содержание хлорофилла *a* увеличивалось на 18%, а флавоноидов на 127% (Golubkina et al., 2018).

Также йод повышает устойчивость растений к болезням и вредителям. Двукратная некорневая обработка земляники йодным раствором снижала поражаемость ягод серой гнилью (Кривоногова, Срослова, 1974). Предпосевная обработка йодистым калием клубней картофеля способствовала снижению заболеваемости фитофторой в 2-3 раза (Стефанишин, 1963).

Погодные условия непосредственно влияют на накопление йода в полевых условиях. В жаркий и засушливый сезон в клубнях картофеля йода накопилось значительно меньше, чем в другие годы (Ledwożyw-Smoleń et al., 2020), а в зерне ячменя, в засушливом сезоне, наоборот, содержание йода оказалось в 2-2,5 раза выше, чем во влагообеспеченные годы (Степанова, 2018).

Таким образом, при обилии информации, подтверждающей накопление йода в растениях при применении йодных удобрений, фактически имеются

весьма противоречивые литературные данные, которые требуют более пристального изучения применения йода применительно к условиям Нечерноземной зоны и её Северо-Западного региона.

1.4 Механизм воздействия йода на физиологические процессы в растении

Исходя из имеющихся данных, можно заключить, что стимулирование йодом продукционных процессов в сельскохозяйственных растениях носит разносторонний характер. В первую очередь, это изменения ферментативной активности посредством неспецифической активации или ингибирования. Так, отмечена повышенная активность супероксиддисмутазы и аскорбатпероксидазы у растений сои под влиянием KIO_3 (Gupta et al., 2015), каталазы в растениях овса - под влиянием йода (Синдирева и др., 2016). Было выявлено влияние ионов йода на активность фермента альдолазы (Школьник, 1974; Анисимов и др., 1982), пероксидазы (Важенин, Белякова, 1952), полифенолоксидазы, аскорбатпероксидазы (Ларионова, Спиридонова, 1969), каталазы (Сулейманов, 1967; Хашимов, 1971), повышение активности амилазы и тирозиндекарбоксидазы в листьях картофеля (Важенин, Белякова, 1952).

Эти изменения в активности ферментов происходят по причине того, что йод облегчает передачу электронов от субстрата к ферменту за счет изменения валентных состояний (Мохнач, 1968), а также ускоряет синтез и регенерации ферментов (Кашин, 1987).

Следствием влияния йода являются также и изменения в синтезе метаболитов растения. Некоторые примеры накопления метаболитов описаны в разделе 1.3.2.

Советскими физиологами были выявлены эффекты от йода, которые объясняются и подтверждаются последними исследованиями с применением современных методов генетического анализа, в частности транскриптомного

анализа (Kiferle et al., 2021). Так, на примере арабидопсиса была проанализирована экспрессия генов, вызванная влиянием йода в концентрации, увеличивающей биомассу растения и ускоряющей наступление фазы цветения. Выделенные РНК были последовательно проанализированы с применением ДНК-микрочипов и количественной ПЦР. Таким образом, были отобраны гены с достоверной экспрессией в побегах растений у 48 генов и у 531 гена в корнях растений арабидопсиса.

Анализ выявил повышенную представленность нескольких генов в образцах корней, которые были связаны с регуляцией кальция и модификацией белка, а также генов, кодирующих многие семейства ферментов, включая пероксидазы, оксидазы, оксидоредуктазы, использующие пероксид в качестве акцептора, глутатион S-трансферазы и цитохром P450.

Чтобы проверить возможное включение йода в белки *in vivo* был проведен эксперимент с радиоизотопом ^{125}I и последующая автордиография для обнаружения белков с радиоактивными метками. Йодированные пептиды, идентифицированные в хлоропластах стеблей, розеток и листьев арабидопсиса, были отнесены к 42 белкам. Большинство из этих белков вовлечены в процесс фотосинтеза. Йодированные пептиды, определенные в корнях растений, были отнесены к 40 белкам. Молекулярные функции эти белков состояли в связывании ионов меди и каталитической активности пероксидазы.

Согласно этому анализу 5 белков принадлежали подсемейству пероксидаз III класса. Выравнивание последовательностей аминокислот вышеупомянутых пероксидаз показало, что йодированные остатки во всех пептидах преимущественно соответствовали консервативным остаткам тирозина.

В общей сложности было идентифицировано 106 йодированных пептидов, соответствующих 42 белкам в листьях (Приложение А1) и 23 белкам в корнях *A. thaliana* (Приложение А2). По данным таблиц о принадлежности этих йодированных пептидов к определенным белкам, можно сделать вывод о

том, в какие физиологические процессы вовлекается йод и стимулирует их. Из 42 белков в листьях, содержащих йод, 24 белка относятся к процессу фотосинтеза, 5 белков участвуют в цикле Кальвина, 3 белка участвуют в синтезе АТФ, 4 белка входят в состав других ферментов. В корнях 3 белка входят в состав кофермента ФАД, 2 белка принимают участие в связывании маннозы, 2 белка участвуют в гликолизе, 1 белок входит в АТФ синтазу, 8 белков входят в состав различных ферментов, среди которых пероксидаза, фумараза, хитиназа и другие, также представлены 2 белка теплового шока.

Таким образом, в ходе анализа научной литературы, с одной стороны, раскрылась многогранная роль йода в реализации основных физиологических функций растительного организма и обоснованности ожидания наличия значимых эффектов в части воздействия йодных микроудобрений на продукционный процесс полевых культур и качество получаемой сельскохозяйственной продукции. С другой стороны, определился критический недостаток данных для разработки регламентов применения йодных микроудобрений в условиях Северо-Запада России.

ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диссертационное исследование включало в себя теоретическую и экспериментальную части. Экспериментальное направление представляло собой серию из трех полевых экспериментов по поиску оптимальных параметров концентрации рабочего раствора йодистого калия для некорневой подкормки культур полевого севооборота, сроков и кратности её проведения, сопровождаемых необходимым для решения поставленных научных задач лабораторным химико-аналитическим обеспечением.

Полевые эксперименты были заложены и проводились в 2018-2022 гг. на полевой экспериментальной базе Меньковского филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ) (д. Меньково Гатчинского района Ленинградской области) в рамках договора о творческом сотрудничестве. В сформированной здесь ранее многоуровневой системе экспериментов (Иванов и др., 2017; Ivanov, Ivanova, 2021) детализирующие полевые опыты с йодом были встроены в структуру длительного фундаментального опыта «Агрофизический стационар», заложенного в 2006 году.

Два микрополевых опыта были заложены в 2018-2021 гг. в травяно-пропашном звене севооборота «картофель ранний – однолетние травы – многолетние травы 1 г.п. – многолетние травы 2 г.п.» полевого севооборота. Третий микрополевой опыт с детализированной схемой дозировок йода в некорневой подкормке был заложен в 2022 г. в посадках картофеля «агрофизического стационара».

Надлежащее химико-аналитическое сопровождение опытов осуществлялось ФГБУ ГСАС «Псковская» и испытательной лабораторией ФГБНУ АФИ.

2.1 Характеристика объектов исследования

Объектами исследования выступали доминирующие в настоящее время в структуре посевных площадей Северо-Запада России культуры полевого севооборота и системы их удобрения на дерново-слабоподзолистых почвах различного уровня окультуренности.

На долю картофеля, однолетних и многолетних трав в структуре посевных площадей Северо-Западного региона в 2024 году в совокупности приходилось 58,9 % от общей площади посевов (табл. 3) (Бюллетень «Посевные площади Российской Федерации в 2024 году (весеннего учета)»). При этом на

Таблица 3 – Структура посевных площадей Северо-Западного Федерального округа (по бюллетеню «Посевные площади Российской Федерации в 2024 году (весеннего учета)». Федеральная служба государственной статистики)

Регион	Спос., тыс.га	Зерновые и зерн.- боб.		Картофель		Овощные		Техничес- кие		Кормовые		Многолетние травы		Однолетние травы	
		тыс.га	%	тыс.га	%	тыс.га	%	тыс.га	%	тыс.га	%	тыс.га	%	тыс.га	%
р. Карелия	24,2	0	0	1,3	5,3	0,3	1,2	0	0	22,7	93,4	0	0	0	0
р. Коми	31,4	0	0	2,6	8,4	0	0	0	0	28,3	90,0	19,3	61,5	6,7	21,3
Архангельская	54,8	0	0	5,2	9,4	0	0	0	0	48,3	88,1	37,5	68,3	6,0	11,0
Вологодская	331,9	90,0	27,1	9,3	2,8	1,4	0,4	4,3	1,3	226,9	68,4	198,6	59,8	10,5	3,2
Калининградская	308,2	130,1	42,2	7,2	2,3	-	-	82,6	26,8	85,9	27,9	65,0	21,1	1,2	0,4
Ленинградская	225,2	42,1	18,7	9,5	4,2	4,9	2,2	0	0	161,5	71,7	128,1	56,9	19,3	8,6
Мурманская	5,3	0	0	0	0	0,1	1,0	0	0	4,8	90,4	0	0	0	0
Новгородская	120,1	12,9	10,7	5,5	4,6	-	-	0	0	91,0	75,8	74,1	61,7	6,4	5,3
Псковская	191,2	38,6	20,2	10,8	5,7	1,8	0,9	19,0	9,9	125,7	65,7	107,8	56,4	3,4	1,8
СЗФО	1292,3	314,1	24,3	53,1	4,1	15,5	1,2	114,6	8,9	795,0	61,5	651,8	50,4	57,5	4,4

многолетние травы, подвергаемые скашиванию, приходилось в среднем 50,4 % посевных площадей при максимальном показателе до 93,4 % (р. Карелия). Аналогичные средние и максимальные показатели представительности в структуре посевных площадей для однолетних трав и картофеля составили 4,4 и 21,3, 4,1 и 9,4 % соответственно.

2.1.1 Характеристика почв полевых опытов

Важным объектом в исследовании выступала почва, которая в силу значительной дифференциации по уровню окультуренности, позволяла охватить широкое многообразие современных почвенно-агрохимических условий, встречающихся на пахотных землях Северо-Запада России.

Меньковский филиал АФИ расположен в южной подзоне таежно-лесной зоны (Зинчук, Моисеев, 2016). Почвы преимущественно автоморфного и полугидроморфного генезиса и относятся к типу дерново-подзолистых (типичных, глееватых и глеевых) почв. (Моисеев, Зинчук, 2014).

Землепользование и опытное поле Меньковского филиала АФИ находятся в пределах абрадированной озерно-ледниковой равнины, которая характеризуется сменой карбонатных пород и морен Ордовикского плато девонскими красноцветными песками. Почвообразующие и подстилающие породы на территории землепользования представлены среднесуглинистыми кислыми алюмосиликатными и остаточно-карбонатными моренами, расположенными выше девонских песков, и сверху перекрытыми озерно-ледниковыми супесями Валдайского оледенения. Все почвообразующие породы супесчаного и суглинистого гранулометрического состава. Поэтому почвы, сформированные на этих породах, также по текстуре лёгкого (супесчаного и легкосуглинистого) гранулометрического состава (Моисеев, Зинчук, 2020).

Микрополевые опыты в Меньковском филиале АФИ были встроены в структуру многофакторного длительного стационарного полевого эксперимента «Агрофизический стационар», заложенного на супесчаной агродерново-подзолистой почве, сформированной на опесчаненном моренном суглинке, подстилаемом с глубины 112 – 125 см озерно-ледниковым песком в 2006 году. В ходе подготовки к его закладке в 2003-2005 годах ускоренным окультуриванием были сформированы три вида почв с различным уровнем окультуренности (Иванов и др., 2022). Хороший уровень окультуренности

агродерново-слабоподзолистой создавался посредством внесения в среднеокультуренную почву 220 т/га органических удобрений и 1 т/га извести, высокий уровень – 540 т/га органических удобрений и 3 т/га извести. Для поддержания их благоприятных свойств в первую ротацию было внесено по 40 и 80 т/га подстильного навоза КРС, а во вторую ротацию – 35 и 70 т/га птичьего помета. Спустя 2 ротации шестипольного севооборота почвы продолжали сохранять выраженную дифференциацию по комплексу физико-химических и агрохимических свойств (Иванов и др., 2022) (табл. 4).

Таблица 4 - Агрохимические свойства почв опытного участка
(по Филиппову, 2022).

Вариант системы удобрения	pH _{сол.}	Органическое в-во, %	P ₂ O ₅ подв.	K ₂ Oподв.	Нобм	Нг	Alподв	Soбм	ЕКО
			мг/кг		смоль(экв)/кг				
Среднеокультуренная почва									
NPK 0	5,16	2,39	137	57	0,20	3,10	0,13	4,04	7,14
NPK 1	5,10	2,25	175	107	0,23	3,13	0,15	3,59	7,14
NPK 2	5,02	2,38	222	126	0,25	2,89	0,15	3,66	6,55
Среднее	5,09	2,34	178	97	0,23	3,04	0,14	3,76	6,94
Хорошо окультуренная почва									
NPK 0	5,87	3,47	413	194	0,04	1,68	0	6,79	8,47
NPK 1	5,92	3,74	409	207	0,05	1,62	0	7,04	8,66
NPK 2	5,90	3,71	402	218	0,03	1,59	0	6,95	8,54
Среднее	5,90	3,64	408	206	0,04	1,63	0	6,93	8,56
Высокоокультуренная почва									
NPK 0	6,22	4,06	446	381	0	1,22	0	7,20	8,42
NPK 1	6,14	4,15	410	338	0	1,28	0	7,15	8,43
NPK 2	6,05	4,25	427	382	0	1,34	0	7,37	8,71
Среднее	6,14	4,15	428	367	0	1,28	0	7,24	8,52

Среднеокультуренная почва опытов характеризовалась низкой обеспеченностью органическим, веществом слабокислой реакцией, низким и средним содержанием подвижных соединений калия. Хорошо и высокоокультуренная почвы превосходили её по содержанию органического вещества в 1,6 – 1,8 раза, обменной кислотности – в 1,2 раза, гидролитической кислотности – в 1,9 – 2,4 раза, сумме обменных оснований – в 1,8 – 1,9 раза, содержанию подвижных фосфатов – в 2,3 – 2,4 раза и подвижного калия – в

2,1 – 3,8 раза. Валовое содержание йода в средне-, хорошо и высокоокультуренной почвах составляло 0,94, 1,22, 1,48 мг/кг соответственно.

Пахотный слой среднеокультуренной почвы характеризовался непрочной комковато-порошистой структурой с содержанием агрономически ценных агрегатов 47,7 %, а также низкими параметрами водопрочности (27,6 %). Система удобрения положительно повлияла на физические параметры почв, и доля агрономически ценных агрегатов в хорошо окультуренной и высокоокультуренной почвах увеличилась на 28 и 49 % соответственно. Также коэффициент структурности для этих почв увеличивался от 0,9, до 2,5 (соответственно для среднеокультуренной и высокоокультуренной) а коэффициент водопрочности агрегатов составил 0,38 для среднеокультуренной, 0,80 – для хорошо окультуренной и 1,03 – для высокоокультуренной почв (Филиппов, 2022). Наименьшая влагоемкость трех видов почв к моменту закладки микрополевых опытов составляла от 21,7, 25,5, 27,6 %. В целом, по комплексу агрофизических характеристики почва обладала достаточно благоприятными свойствами, имеющими также выраженную дифференциацию по уровню окультуренности.

Таким образом, в исследовании было охвачен широкий диапазон почвено-агрохимических и агрофизических условий, определяющих специфику питательного режима легкой агродерново-подзолистой почвы, имеющей низкую обеспеченность йодом.

2.1.2 Краткая характеристика культур севооборота

Объектами исследования в стационарном полевом опыте выступали доминирующие в современной структуре посевных площадей Северо-Запада России культуры травяно-пропашного звена полевого севооборота: «картофель ранний – однолетние травы + многолетние травы – многолетние травы 1 г.п. – многолетние травы 2 г.п.»

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) является часто возделываемой товарной культурой Северо-Западного региона, он характеризуется невысокой требовательностью к почвам. Картофель удовлетворительно переносит повышенную кислотность почв. При этом для картофеля крайне нежелательны тяжёлые и склонные к переуплотнению почвы, что приводит к деформации клубней и снижению товарности клубней. Наиболее подходящие почвы – это хорошо окультуренные легко- и среднесуглинистые разновидности, и окультуренные торфяно-болотные почвы. Он хорошо отзывается на применение органических удобрений. На слабо- и среднеокультуренных дерново-подзолистых почвах его возделывание без применения органических удобрений неэффективно (Иванов и др., 2002). Картофель предпочитает слабокислые почвы и положительно отзывается на известкование только сильно- и среднекислых почв. При этом отдает предпочтение доломитизированным мелиорантам, обогащенным магнием, особенно, на почвах легкого гранулометрического состава. При повышении почвенного pH, на фоне снижения доступности калия, возрастает риск заболеваемости картофеля паршой. Почвенно-агрохимический фон оказывает существенное влияние и на вредоносность поражения фитофторозом. На фоне эпифитотийного развития возбудителя усиленное минеральное питание усугубляет потери урожая, а при нормальном развитии – напротив влияет положительно на полевую устойчивость культуры к возбудителю заболевания (Иванов и др., 2019б). Нежелательными при определенных условиях могут быть высокие дозы хлорсодержащих калийных удобрений, хлор в составе которых способен снижать крахмалистость клубней.

При этом картофель отзывчив на йодные удобрения, и как при внесении в почву, так и при некорневых обработках, дает существенные прибавки урожая (Бузовер, 1962; Важенин, Белякова, 1952).

Первым в звене севооборота возделывался в качестве объекта исследования картофель сорта Удача в 2018 году. Это раннеспелый сорт столового назначения. Растение средней высоты, полураскидистое, венчик

белый. Клубень светло-бежевый, глазки мелкие, мякоть белая. Сорт умеренно восприимчив к фитофторозу по ботве и умеренно устойчив по клубням.

В 2022 году возделывался картофель раннего сорта Метеор. Растения высокорослые, цветет белыми цветкам. Кожица картофеля тонкая, с маленькими глазками, имеет кремовый цвет. Мякоть на срезе светло-жёлтая. Полное созревание картофеля Метеор занимает 70 дней от появления первых всходов, но собирать молодой урожай можно на фазе цветения. Сорт довольно урожайный. Устойчив ко многим болезням, отличается высокой лежкостью.

В следующем 2019 году в опыте возделывались однолетние травы (смесь 1,6/1 овса посевного и вики посевной). Вика посевная (*Vicia sativa* L.) – однолетнее травянистое растение. Имеет довольно длинный, ветвистый корень с наростами клубеньковых бактерий. Стебли волосистые, бороздчатые, стелющиеся, почти четырехгранные. Стебель может достигать 1 м в высоту. Морозоустойчиво. Для вики посевной подходят любые почвы, однако предпочтительнее супесчаные и легкосуглинистые нейтральные почвы, характеризующиеся высокой влагоудерживающей способностью с достаточным содержанием кальция. Тяжелые и кислые почвы менее пригодны. В силу своих биологических особенностей всегда возделывается в смеси со злаковыми культурами (чаще с овсом), поэтому потребность в удобрениях определяется с учетом смесового характера посева. Для обеспечения вике посевной конкурентного преимущества дозировки азотных удобрений сокращают до среднего уровня 50-70 кг/га, а фосфорные и калийные применяются с учетом обеспеченности почвы подвижными соединениями этих элементов и ожидаемой продуктивности (Иванов и др., 2002). В фазах бутонизации и цветения нуждается в обильном увлажнении. Чувствительна к поражению тлей. В полевых севооборотах вика посевная – типичная парозанимающая культура, а также используется для пожнивных посевов. Сорт Вера (ФГБНУ «ФИЦ «Немчиновка» и ФГБНУ «ФНЦ ВИК им. В.Р. Вильямса», Россия), использованный в посевах, обладает повышенной

толерантностью к абиотическим стрессам. Сорт устойчив к пероноспорозу и аскохитозу.

Овес посевной (*Avena sativa* L.) – однолетнее злаковое растение. Овес малотребователен к почвенным условиям. Может произрастать на почвах от песчаного до глинистого гранулометрического состава и торфяных почвах, pH которых равен 5 – 6 ед. Овёс хорошо отзывается на известкование. Он также нетребователен к теплу, однако любит увлажненные почвы. Овес характеризуется более продолжительным периодом максимального потребления питательных веществ, что позволяет стойко переносить неблагоприятные погодные условия. По имеющимся данным, овес отзывчив на йодные удобрения при внесении их в почву в дозе 1 кг/га в формах KI и KIO₃ (Кашин, 1987).

Овёс сорта Скакун (ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Россия) среднеспелый, ближе к среднераннему. Самый распространенный в настоящее время сорт овса в России. Районирован почти по всей территории РФ. Сочетает высокую и стабильную продуктивность с высоким качеством зерна. Устойчив к засухе, к полеганию и осыпанию зерна. Умеренно устойчив к корончатой ржавчине и слабо восприимчив к пыльной головне.

В посеве однолетних трав в качестве подсевной культуры были высеяны многолетние травы (клевер луговой + тимopheевка луговая), которые на фоне засушливой погоды 2019 года имели относительно слабое развитие. Соответственно, в 2020 и 2021 годах в опыте возделывались многолетние травы 1-го и 2-го годов пользования. Многолетние травы в условиях нашего региона хорошо отзываются на известкование, а также внесение навоза под предшественника в дозе 30-40 т/га. Они являются самыми влаголюбивыми культурами и обладают самым высоким потенциалом продуктивности. Фосфорные и калийные минеральные удобрения предпочтительно вносить под покровную культуру. В виду того, что азотные удобрения снижают способность бобовых трав к азотфиксации, они могут применяться в

подкормку в сочетании с калийными удобрениями не ранее второго года хозяйственного использования посева (Иванов и др., 2022). Отдельное внимание следует уделять калийным удобрениям, так как многолетние бобовые и злаковые травы отличаются большим выносом калия.

Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.) – многолетнее рыхлокустовое растение семейства мятликовых. Стебли полые цилиндрические, в нижней части коленчато-изогнутые, достигающие высоты 100 см и более. Тимофеевка луговая – растение довольно влаголюбивое, длинного дня. Листья линейной или ланцетной формы от светло-зеленой до темно-зеленой окраски. Соцветие в виде колосовидной метелки. Тимофеевка луговая малотребовательна к почвенным условиям. Подходят почвы разного гранулометрического состава от глинистых до песчаных. Культура светолюбива. Сорт тимоееевки луговой Ленинградская 204 (Ленинградский НИИСХ «Белогорка» - филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха», Россия) среднеспелый, зимостойкий, сравнительно устойчив к грибным заболеваниям.

Клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) относится к многолетним бобовым травам. Клевер не отличается требовательностью к почвам, но предпочитает почвы более тяжелого гранулометрического состава с pH 5,5-7,0. Влаголюбив. Способен хорошо расти даже при близком залегании грунтовых вод 65-90 см. Сорт клевера красного Орфей (ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Россия) среднепоздний, высокопродуктивный. Куст этого сорта прямостоячий, высотой 56-116 см, 5-7 стеблей в кусте. Сорт зимостойкий и морозостойкий. Сравнительно устойчив к корневым гнилям. Поражается клеверным семеедом. Одной из главных сортовых особенностей является повышенная устойчивость к почвенной кислотности, направленно созданная селекционерами ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (Онучина, Тумасова, 2007; Онучина и др., 2016). Как следствие, сорт обладает меньшей прихотливостью к почвенным условиям, в целом, сопоставимой с тимоееевкой луговой. С одной стороны, это положительно сказывалось на ботаническом составе посева

многолетних трав на всех видах почв. С другой стороны, это обстоятельство снижало потенциал агрономической эффективности окультуривания дерново-подзолистой почвы и делало мало прогнозируемой эффективность применения йодных микроудобрений.

2.2 Погодно-климатические условия проведения экспериментов

Агроклиматические ресурсы, на протяжении всей истории земледелия, были и остаются определяющим фактором его географического распределения, а также эффективного и устойчивого развития (Иванов, Иванов, 2006, Научные основы ..., 2018). Их генезис определяется приходом солнечной радиации, атмосферными процессами и свойствами подстилающей поверхности. Для Нечерноземной зоны характерно неравномерное распределение фотосинтетически активной радиации (ФАР) в период вегетации с апреля по октябрь в пределах с 29 до 36 ккал/см² (Белолюбцев, Асауляк, 2013).

Среднестатистические параметры прихода тепла и влаги на Северо-Западе РФ достаточно благоприятны для получения высоких урожаев адаптированных к региону культур, поэтому в годы с близким к среднему многолетнему их распределением, фиксируются самые высокие параметры продуктивности регионального земледелия (Иванов, Иванов, 2006; Иванов и др., 2017). Главными изъянами регионального климата являются: недостаток тепла в вегетационный период (ограничивает распространение ценных культур и более продуктивных позднеспелых сортов); избыточное выпадение осадков, и как следствие промывной и застойно-промывной водный режим почвы с высокими инфильтрационными потерями биогенных элементов, в том числе и йода; неравномерное распределение осадков и тепла в течение вегетационного периода, вследствие чего их благоприятное поступление бывает не чаще, чем в 2 годах из десяти (Иванов и др., 2017; Иванов, Конашенков, 2018).

Погодно-климатические условия значительно влияют и на эффективность систем применения удобрений (Иванов и др., 2002; Проберж, 2004; Коренев и др., 2015). С одной стороны, они предопределяют эффективность отдельных видов удобрений, способы и технологии их внесения. С другой стороны, обоснованное применение удобрений способно в значительной мере компенсировать негативные последствия некоторых погодно-климатических аномалий (Иванов, 2001; Иванов и др., 2017; Фесенко и др., 2020). При этом решающее значение в адаптации регионального земледелия к погодно-климатическим аномалиям имеет мелиорация, позволяющая регулировать водообеспеченность почв и культур в двустороннем осушительно-увлажнительном режиме (Иванов, Янко, 2019; Дубенок и др., 2020).

Климат Ленинградской области умеренно-атлантико-континентальный с отчетливыми признаками морского, выражающимися в умеренно тёплом лете и продолжительной мягкой зиме. При агроклиматическом районировании территория области ранжирована на пять агроклиматических районов (рис. 1). Меньковский филиал ФГБНУ АФИ расположен в IV агроклиматическом районе, характеризующемся весьма благоприятным сочетанием погодно-климатических условий. Риски, связанные с возделыванием культур, обусловлены невысокой суммой активных температур ($t > 10^{\circ}\text{C}$) (1600-1700), периодическими засухами и избыточным поступлением осадков в связи с неравномерным распределением этих ресурсов в течение вегетационного периода (Иванов, Конашенков, 2018) (табл. 5). Климатически обеспеченная продуктивность зерновых и картофеля при КПД ФАР в 2,5 находится в пределах 4,5 – 5 т/га зерна и 37 – 39 т/га клубней картофеля. Фактически их продуктивность в лучших сельскохозяйственных предприятиях в настоящее время уже достигает 6,0 – 8,0 т/га зерна и 50 – 80 т/га – картофеля, что отчасти может быть связано в том числе и с увеличением теплообеспеченности вегетационного периода (Рекомендации ..., 2021).

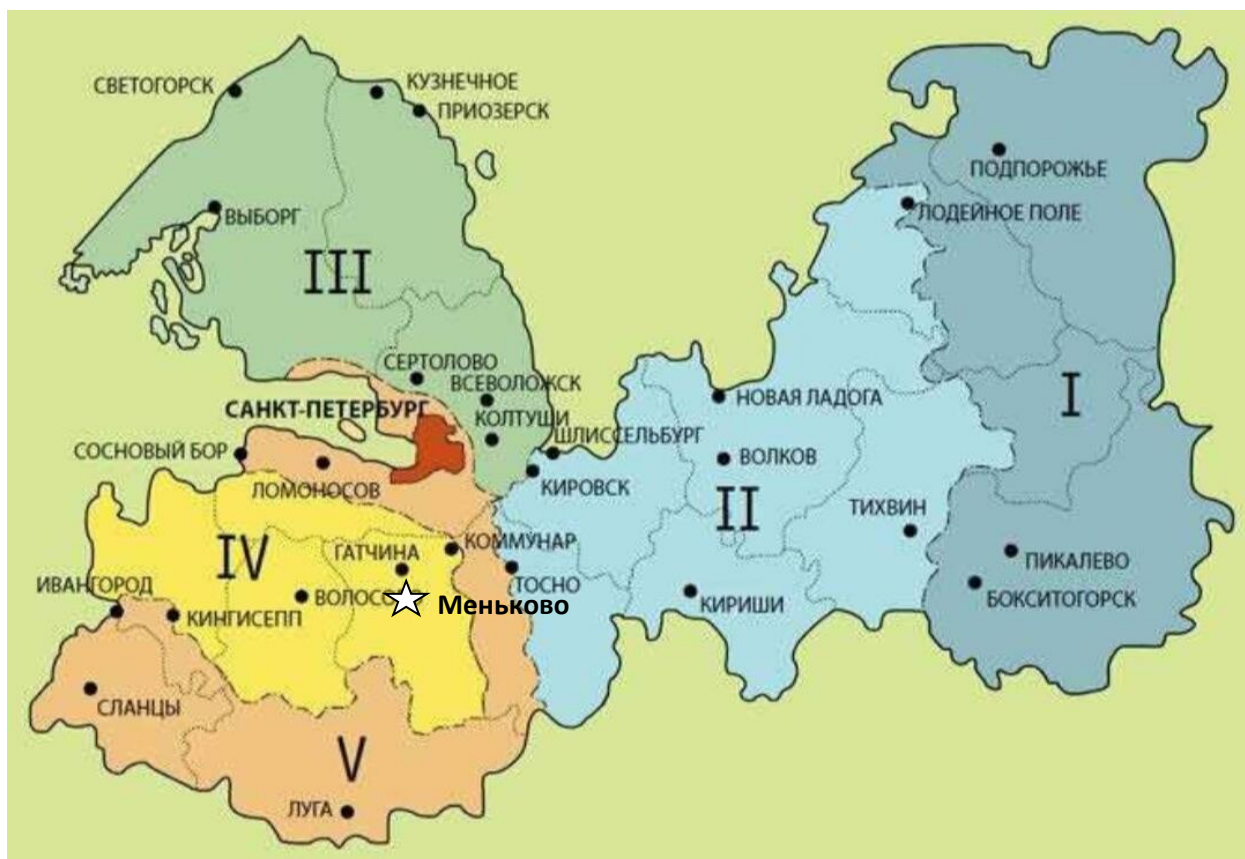


Рисунок 1 – Агроклиматическое районирование Ленинградской области

Таблица 5 – Агроклиматические ресурсы и биоклиматический потенциал Ленинградской области (по Гордееву с соавт., 2009)

Агроклиматический район	$\Sigma t_{ак}, ^\circ C$	Период с $T > 10^\circ C$, дн.	Сумма осадков за вегетационный период, мм	БКП, баллы	Климатически обеспеченная продуктивность, т/га	
					зерновые	картофель
I	1400 – 1600	90 – 105	250 – 275	1,40 – 1,60	4,06 – 4,64	32,2 – 36,8
II	1600 – 1800	115 – 145	225 – 275	1,60 – 1,80	4,64 – 5,22	36,8 – 41,4
III	1500 – 1700	110 – 115	225 – 275	1,50 – 1,70	4,35 – 4,93	34,5 – 39,1
IV	1600 – 1700	<115	275 – 300	1,60 – 1,70	4,64 – 4,93	36,8 – 39,1
V	1700 – 1900	90 – 105	250 – 275	1,70 – 1,90	4,93 – 5,51	39,1 – 43,7

В последние годы исследователи поднимают вопрос, связанный с тенденцией потепления климата, что представляет собой как сложности, так и перспективы для ведения сельского хозяйства. Рост средней годовой

температуры воздуха в Ленинградской области наблюдается в пределах от 0,8 до 1,2 °C за последние 25 лет. В том числе данные свидетельствуют о более раннем наступлении периода вегетации на 3-9 дней, а теплого периода на 5-9 дней при текущем изменении климата. Сумма эффективных температур воздуха ($t > 5$ °C) на территории Ленинградской области увеличилась на 202-215 °C, а сумма активных температур ($t > 10$ °C) - на 78-147 °C. Теплый период с активными температурами ($t > 10$ °C) увеличился на 8-12 дней, а период вегетации с эффективными температурами ($t > 5$ °C) увеличился на 6-11 дней за период с 1986 по 2015 годы (Сою, 2016).

Агрометеорологическое обеспечение полевой экспериментальной деятельности в Меньковском филиале ФГБНУ АФИ осуществлялось в годы исследований с использованием стационарного метеопоста, находящегося в непосредственной близости к опытному участку (Приложение Б). Согласно полученным с него данным агрометеорологические условия проведения экспериментов могут быть охарактеризованы как весьма типичные для региона исследований, т.е. весьма неустойчивые как по годам, так и по отдельным периодам в течение вегетации полевых культур (рис. 2).

Например, условия 2018 года, в целом, характеризовались температурами воздуха, близкими к многолетним значениям с более теплым маем, что положительно сказалось на начале весенних полевых работ. Однако благоприятная погода быстро перешла в состояние характерной для региона (Иванов и др., 2017; Иванов, Конашенков, 2018) поздневесенней-раннелетней засухи. Она приняла критичную форму по продолжительности и количеству осадков (в мае – 20 %, в июне – 35 % от нормы). Фактически первый дождь после посадки картофеля прошел только 24 июня. В результате гидротермический коэффициент в мае и июне оказался ниже 0,5 ед. Это привело к задержке прорастания картофеля и его развития на начальной фазе вегетации. При этом в июле и августе погода полностью выправилась, компенсировав в определённой мере неблагоприятное

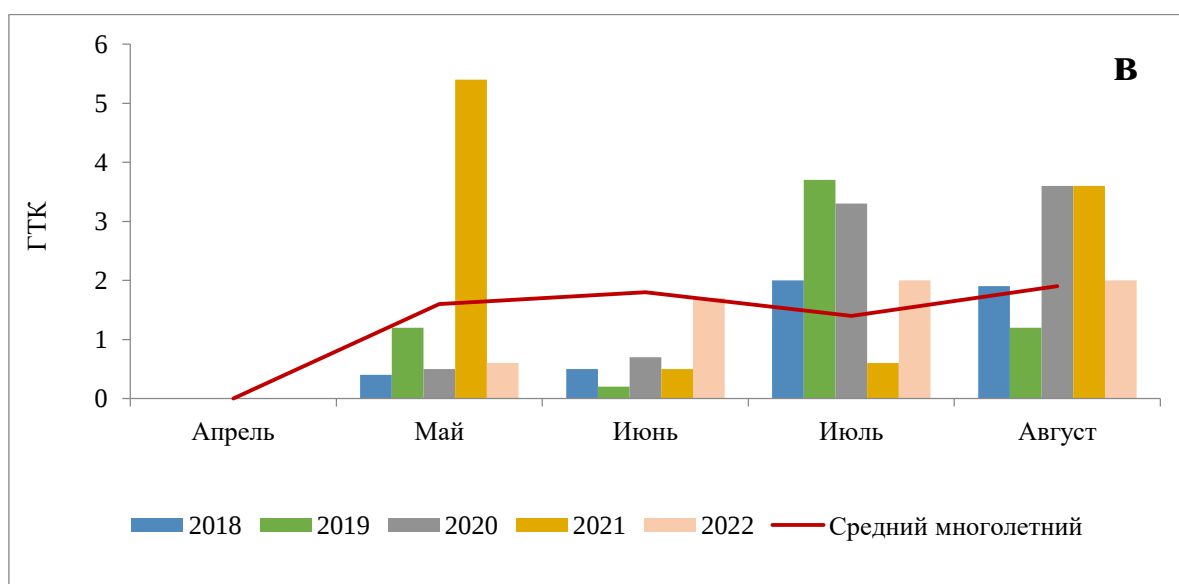
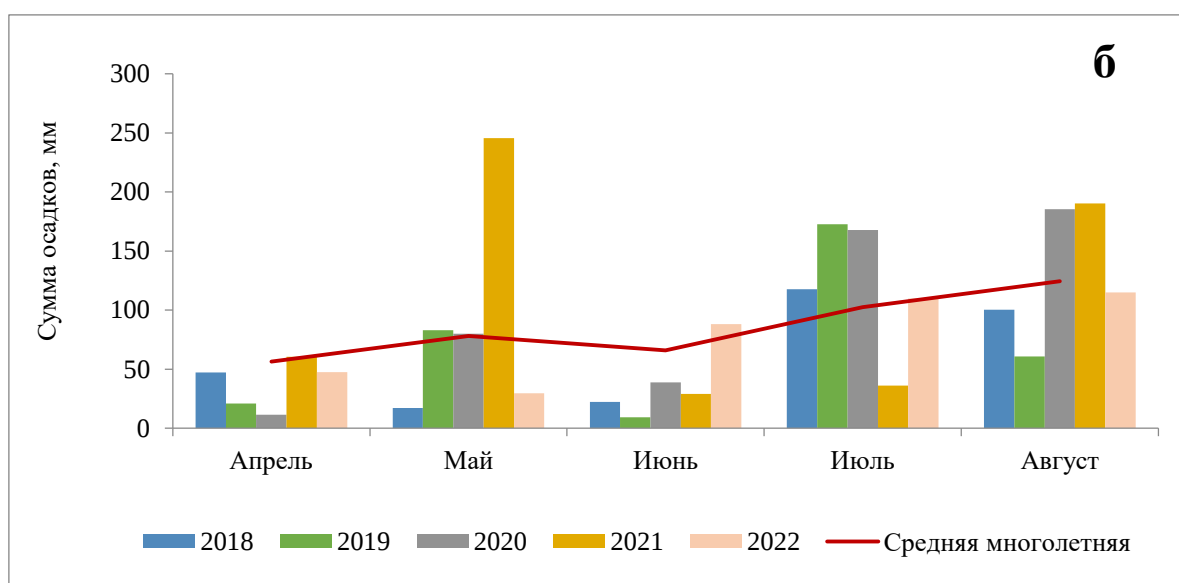
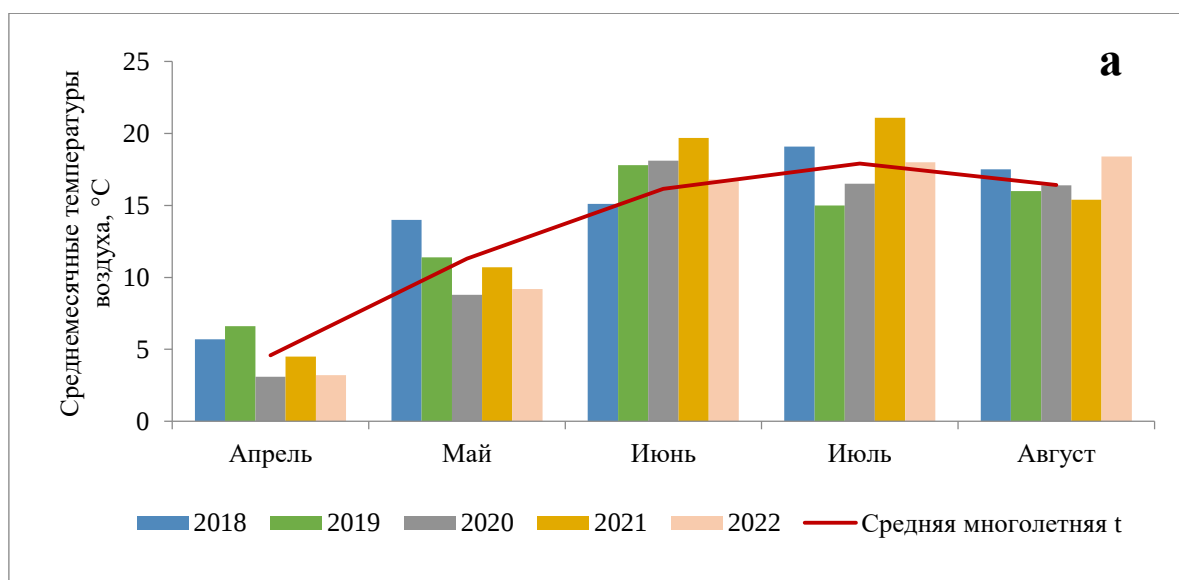


Рисунок 2 – Метеоусловия в годы исследований (а – среднемесячные температуры воздуха (°C), б – сумма осадков (мм), в – ГТК)

поступление осадков в начале вегетационного периода.

Раннелетняя засуха впоследствии повторялась в 2019, 2020 и 2021 годах. В 2019 году «ранняя» весна с характерной теплой ветреной погодой позволила провести посев однолетних и многолетних трав в апреле. Однако 5 – 7 мая прошли сильные ливневые дожди, приведшие в сочетании с установившейся позднее теплой ветреной погодой к образованию почвенной корки и механическому затруднению к прорастанию овса и вики посевной. После этого вплоть до их уборки 4 июля 2019 года выпало, т.е. в течение всего вегетационного периода выпало менее 20 мм осадков. Естественно, это оказало прямое негативное влияние на рост и развитие однолетних и многолетних трав. Последних от гибели спасла дождливая погода в июле, когда выпала практически двойная месячная норма осадков.

В 2020 и 2021 году погодно-климатические условия имели весьма близкую динамику распределения тепловых ресурсов, схожую со средним многолетним ходом температур. Лишь немного прохладнее в мае и, напротив, теплее в июне. И в оба эти года опять повторилась раннелетняя засуха. Но их принципиально отличала одна особенность. Если в 2020 году засуха началась после немного прохладного (на 0,7 °C) и нормально увлажненного мая, то в 2021 году – после волны холода (с 23.04 по 11.05) и резкого переувлажнения вследствие 3-кратного превышения нормы осадков, а ГТК превысил 5 ед. С одной стороны, это позволило многолетним травам проще переживать засуху в 2021 году. С другой стороны, на фоне такой погоды было сложно найти благоприятные условия для проведения, особенно второй, некорневой йодной подкормки. После проведения первого укоса в 2021 году многолетние травы испытывали острый недостаток влаги еще на протяжении целого месяца и только в августе началось их нормальное послеукосное отрастание, сопровождаемое необходимым для нормального развития количеством осадков и приходом тепла.

Весна 2022 года выдалась затяжная. Снег на опытном поле растаял только 25 апреля. Вплоть до середины мая среднесуточные температуры

находились в пределах 5 – 7 °С. Затем динамика поступления тепловых ресурсов и температуры воздуха приняла близкий к среднему многолетнему ритм, а сумма осадков была немного ниже. Особенно засушливым выдался май, когда осадков выпало в 2,5 раза ниже нормы. Это в сочетании с прохладной погодой заметно задержало прорастание картофеля. Однако недостаток осадков в мае был полностью компенсирован нормальной влагообеспеченностью в июне и в 1,5 раза избыточной – в июле и августе. Такие условия, в целом, оказались весьма благоприятными для картофеля

Подводя итог, следует отметить, что во все годы исследований была зафиксирована поздневесенняя-раннелетняя засуха. Самым засушливым оказался июнь (за исключением 2022 года), когда количество осадков было стабильно ниже нормы средних многолетних данных. В этом месяце ГТК составлял от 0,2 до 0,7. Наиболее благоприятные погодно-климатические условия с точки зрения влагообеспеченности возделываемых культур были зафиксированы в 2021 году для многолетних трав, а наименее приемлемые – в 2019 году для однолетних трав. Вполне благоприятный (близкий к среднему многолетнему с небольшим положительным отклонением на 0,7 °С в сутки) режим поступления тепловых ресурсов в годы исследований контрастировал с крайне неустойчивым по месяцам и декадам распределением осадков. На развитии культу севооборота негативно сказались засушливые периоды, пришедшиеся на начальную фазу вегетации и имевшие продолжительность от 10-12 до 45-63 дней. Это оказало негативное влияние на динамику ростовых процессов отдельных культур и их продуктивность.

2.3 Агротехника возделывания культур

Система обработки почвы в звене полевого севооборота была комбинированной и базировалась на сочетании отвальной основной обработки (зяблевой вспашки с использованием DD-6 + Kverneland Fraugde F

120) со сплошными предпосевными обработками на оптимальную глубину (22-23 и 10-15 см соответственно).

Предпосадочная обработка почвы под картофель включала культивацию почвы с боронованием, выполняемую агрегатом МТЗ-82 + КПС-4+БЗС-1.0. Под нее по схеме опыта вручную применялись минеральные удобрения. За 1-2 дня до посадки осуществлялась нарезка гребней агрегатом МТЗ-82+КОН-2,8ПМ с шириной междурядья 75 см. Посадка картофеля происходила также механизировано четырехрядной сажалкой СН-4Б нормой 40 тыс. га. Уходные обработки включали: 1 довсходовую междурядную обработку пропашным культиватором с ротационной бороной МТЗ-82+КОН-2,8ПМ +БРУ-0,7; одно «слепое» окучивание, одну междурядную обработку и 2 окучивания с использованием МТЗ-82+КОН-2,8ПМ. Система защиты растений строилась на сочетании механических и химических мероприятий в соответствии с установленными агротехническими требованиями и условиями эффективного применения. Так для борьбы с сорняками дополнительно к механическому истреблению проводилась обработка гербицидом Титус (50 г/га) с прилипателем Тренд-90 (200 мл/га) в норме рабочего раствора 300 л/га. В борьбе с возбудителями фитофтороза и альтернариоза на картофеле применялись трехкратные опрыскивания препаратами Сектин феномен (1,25 кг/га), Ридомил Голд (4 кг/га) и Цихом (2,5 кг/га) при норме расхода рабочей жидкости 300 л/га. Растворы гербицида и фунгицидов вносились с использованием навесного штангового опрыскивателя агрегатом DD6+AMAZONE-800BU.

Весенняя обработка почвы под однолетние травы включала предпосевную культивацию МТЗ-82 + КПС-4+БЗС-1.0, под которую вручную вносились минеральные удобрения. Посев проводился комбинированным посевным агрегатом DD-6 + Lemken solitaire нормой высева (210 кг/га: 130 кг/га овса посевного и 80 кг/га вики посевной). На следующий день в него осуществлялся посев смеси многолетних трав (20 кг/га: 10 кг/га клевера лугового и 10 кг/га тимopheевки луговой) с использованием МТЗ-80 + СЗТ-3,6.

Поскольку посевы однолетних и многолетних трав предназначались в качестве сырья для производства кормов (сена) специальных защитных мероприятий с использованием пестицидов в их посевах не проводилось.

В борьбе с вредителями в годы проведения исследований необходимости не возникало.

Уборка в пределах «агрофизического стационара» осуществлялась сплошным весовым методом при достижении технологической спелости. В пределах микрополевых опытов это делалось вручную, а в масштабе всего полевого опыта – в оптимальные сроки с использованием стандартного технологического оборудования: картофелеуборочного комбайна Grimme SE 75/85-55, косилки Е-305, граблей ГВР-6 и пресс-подборщика ППЛ Ф-1,6.

2.4 Методика проведения исследований

Методической основой исследования служили три микрополевых опыта, встроенных в структуру длительного стационарного полевого эксперимента «Агрофизический стационар», который был заложен в 2006 году под руководством академика В.А. Семенова (Иванов и др., 2016). Схема этого трехфакторного опыта включала в себя два типа севооборота (овощекормовой и полевой), почвы 3 видов по степени окультуренности (средняя, хорошая и высокая) и 3 уровня минеральной системы удобрения, рассчитанные на параметры продуктивности культур с выходом на КПД ФАР в 1-2, 2-3 и 3-4 %. С целью формирования хорошо и высокоокультуренного видов почвы перед закладкой опыта (в 2003-2005 гг.) в среднеокультуренную почву было внесено 1 и 3 т/га доломитовой муки, а также 220 и 540 т/га навоза соответственно. В последующем хорошая и высокая степень окультуренности почвы поддерживалась периодическим внесением органических удобрений (40 и 80 т/га подстильного навоза в первой ротации и 35 и 70 т/га птичьего помета – во второй ротации 6-польных севооборотов).

Микрополевые опыты по йодной проблематике были заложены в пределах полевого севооборота в его травянопропашном звене: картофель – однолетние травы – многолетние травы 1-го года пользования – многолетние травы 2-го года пользования.

Первый микрополевой опыт, посвященный поиску оптимальной концентрации рабочего раствора йодистого калия в широком интервале дозировок имел двухфакторную схему с определенной спецификой. Так на картофеле и однолетних травах фактором А служил уровень применения удобрений в трехвариантной схеме: контроль – без удобрений (NPK0), средние дозы удобрений на КПД ФАР 2-3 % (NPK1) и повышенные дозы удобрений на КПД ФАР 3-4 % (NPK2) (табл. 6). А на многолетних травах,

Таблица 6 – Схема 1-го микрополевого опыта

Фактор А		Фактор Б
Вид почвы	Минеральная система удобрения (картофель/однолетние травы)	Концентрация водного раствора КI
Картофель и однолетние травы		
Среднеокультуренная	NPK0 - без удобрений	1) 0 %; 2) 0,005%; 3) 0,01%; 4) 0,02%; 5) 0,04%; 6) 0,08%; 7) 0,16%; 8) 0,32% 9) 0,64%
	NPK1	
	N80P30K100/N30P30K60	
	NPK2	
	N120P30K150/N60P30K90	
Многолетние травы		
Среднеокультуренная	NPK0 - без удобрений	1) 0 %; 2) 0,005%; 3) 0,01%; 4) 0,02%; 5) 0,04%; 6) 0,08%; 7) 0,16%; 8) 0,32% 9) 0,64%
Хорошоокультуренная		
Высокоокультуренная		

где минеральные удобрения не применялись, этот фактор был представлен тремя видами почв по уровню окультуренности: среднеокультуренная, хорошо окультуренная и высокоокультуренная почвы. Фактором Б в опыте выступала концентрация рабочего раствора йодистого калия, выраженная в %. Схема опыта по данному фактору здесь носила прецизионный характер с

гипотетическим ожиданием обнаружения не только положительного стимулирующего, но и, вероятного, токсического эффекта.

Минеральные удобрения по схеме опыта вносились вручную при закладке большого эксперимента «агрофизический стационар», в котором площадь одной делянки составляла 200 м² под предпосевную обработку почвы в форме азофоски, аммиачной селитры, сульфата калия и хлористого калия.

В качестве одного из основных объектов исследования, являющегося источником йода, во всех экспериментах был выбран йодистый калий (KI). Основанием для такого выбора стало наличие наиболее обширной базы положительных результатов применения данной соли для приготовления рабочих растворов некорневой подкормки полевых культур йодом (Кашин, 1987; Панасин и др., 2002; Ojok et al, 2019). В ряде исследований было показано превосходство йодидной формы перед йодатной в агрономической эффективности и, в некоторой мере, в токсичности (Blasco et al., 2008; Caffagni et al., 2011; Kato et al., 2011).

Для приготовления рабочего раствора йодистого калия использовался кристаллический KI хч. (ОАО «Троицкий йодный завод», Россия). Он представляет собой бесцветную кристаллическую соль, желтеющую на свету и обладающую хорошей растворимостью в воде и средним уровнем гигроскопичности. Плотность кристаллического порошка составляет 3,115 г/см³, температура плавления - 681 °С, кипения - 1324 °С.

Опрыскивание посадок картофеля и посевов однолетних и многолетних трав осуществлялось в безветренную погоду с использованием ранцевого опрыскивателя STIHL SG51 (Andreas Stihl AG & Co., Германия). Расход рабочей жидкости при этом составлял 30 мл/м². Фактическое дозирование осуществлялось исходя из времени, затрачиваемого агрегатом при рабочем давлении 2,5 МПа на расходование 90 мл раствора в расчете на 1 делянку опыта. Для приготовления маточного и на его основе рабочих растворов использовался кристаллический KI хч. (ОАО «Троицкий йодный завод», Россия).

Некорневая подкормка в соответствии со схемой опыта проводилась однократно в фазу бутонизации картофеля, выхода в трубку овса, и стеблевания клевера лугового.

Площадь опытной делянки в данном опыте составляла 3 м² (1,5×2,0 м). Учетная площадь 1,5 м² на картофеле и 1 м² – на однолетних и многолетних травах. Повторность в опыте трех- и четырехкратная. Размещение делянок систематическое.

Второй микрополевой опыт, направленный на детализацию оптимальной концентрации рабочего раствора йодистого калия для некорневой подкормки картофеля был выполнен в 2022 году уже с использованием полной базовой схемы «агрофизического стационара». Соответственно его схема имела тrefакторную структуру (табл. 7). В данном

Таблица 7 – Схема 2-го микрополевого опыта с картофелем

Фактор А	Фактор Б	Фактор В
Вид почвы	Минеральная система удобрения	Концентрация водного раствора KI
Средне-окультуренная	NPК0 – без удобрений	1) 0 %; 2) 0,01%; 3) 0,02%; 4) 0,04%; 5) 0,06%; 6) 0,08%; 7) 0,10%
	NPК1 – N60P30K120	
	NPК2 – N120P60K240	
Хорошо окультуренная	NPК0 – без удобрений	
	NPК1 – N60P30K120	
	NPК2 – N120P60K240	
Высоко-окультуренная	NPК0 – без удобрений	
	NPК1 – N60P30K120	
	NPК2 – N120P60K240	

опыте был задействован весь доступный набор почвенно-агрохимических условий «агрофизического стационара»: фактор А – степень окультуренности

почвы: средняя, хорошая, высокая; фактор Б – минеральная система удобрения: NPK0 – контроль без удобрений; NPK1 – N60P30K120; NPK2 – N120P60K240. А схема применения раствора йодистого калия была детализирована в стимулирующей части диапазона с размахом концентраций от 0,01 до 0,1 %: 0; 0,01 %; 0,02 %; 0,04 %; 0,06 %; 0,08 %; 0,10 % раствор KI. Основной причиной такой детализации стал резкий переход от стимулирующего к токсическому эффекту, зафиксированный в исследованиях в 2018 году.

Методика закладки опыта и техника применения некорневой подкормки раствором йодистого калия в данном опыте была полностью идентична первому микрополевому опыту.

Третий микрополевой опыт был направлен на выяснение оптимальной фазы и кратности проведения некорневых подкормок в широком диапазоне почвенно-агрохимических условий, предоставляемых «агрофизическим стационаром». В результате схема данного опыта была трехфакторной (табл. 8). Фактор А – степень окультуренности почвы: средняя, хорошая, высокая; фактор Б – минеральная система удобрения: NPK0, NPK1 и NPK2 (на картофеле это дозы 0, N80P30K100 и N120P30K150, на однолетних травах – 0, N30P30K60 и N60P30K90 и на многолетних травах – последствие внесенных ранее минеральных удобрений).

Фактор В представлял собой четырехвариантную схему оценки кратности (на картофеле) и фазы (на однолетних и многолетних травах) проведения некорневой йодной подкормки 0,02 %-ным рабочим раствором KI. При этом, в силу специфики биологии и технологий возделывания культур севооборота методический подход к выбору оптимальных сроков и кратности обработок здесь дифференцировался. У картофеля, система защиты которого предполагает многократные опрыскивания в течение вегетации решалась задача определения оптимальной кратности йодных подкормок. Первая из них приурочивалась к моменту начала формирования клубней, т.е. к фазе бутонизации, две последующие проводились с периодичностью в 2 недели.

Таблица 8 – Схема 3-го микрополевого опыта в звене севооборота

Фактор А	Фактор Б	Фактор В
Вид почвы	Минеральная система удобрения	Концентрация водного раствора KI
Картофель		
Средне-окультуренная	NPK0 – без удобрений	1) KI0 – Контроль без обработки 2) KI1– однократно (фаза бутонизации) 3) KI2 – двукратно (фаза бутонизации + 14 дн.) 4) KI3 – трехкратно (фаза бутонизации + 14 дн. + 14 дн.)
	NPK1 – N80P30K100	
	NPK2 – N120P30K150	
Хорошо окультуренная	NPK0 – без удобрений	
	NPK1 – N80P30K100	
	NPK2 – N120P30K150	
Высоко-окультуренная	NPK0 – без удобрений	
	NPK1 – N80P30K100	
	NPK2 – N120P30K150	
Однолетние травы		
Средне-окультуренная	NPK0 – без удобрений	1) KI0 – Контроль без обработки 2) KI1 – однократно в фазу кущения 3) KI2 – однократно в фазу выхода в трубку 4) KI3 – двукратно в фазу кущения и выхода в трубку
	NPK1 – N30P30K60	
	NPK2 – N60P30K90	
Хорошо окультуренная	NPK0 – без удобрений	
	NPK1 – N30P30K60	
	NPK2 – N60P30K90	
Высоко-окультуренная	NPK0 – без удобрений	
	NPK1 – N30P30K60	
	NPK2 – N60P30K90	
Многолетние травы		
Средне-окультуренная	NPK0 – без удобрений	1) KI0 – Контроль без обработки 2) KI1 – однократно в фазу отрастания (третьего тройчатого листа) 3) KI2 – однократно в фазу стеблевания клевера лугового 4) KI3 – двукратно в фазу отрастания и стеблевания клевера лугового
	NPK1 - последствие	
	NPK2 - последствие	
Хорошо окультуренная	NPK0 – без удобрений	
	NPK1 - последствие	
	NPK2 - последствие	
Высоко-окультуренная	NPK0 – без удобрений	
	NPK1 - последствие	
	NPK2 - последствие	

Таким образом, искусственно создавался фон активного насыщения растений картофеля йодом в момент интенсивного формирования клубней.

Для однолетних трав однократные обработки проводились в фазу

кущения (КІ-1) и выхода овса в трубку (КІ-2), а также двукратная – в обе эти фазы (КІ-3). Для многолетних трав аналогично проводились однократные некорневые обработки раствором КІ в фазу третьего тройчатого листа (начало весеннего отрастания) (КІ-1) и стеблевания (КІ-2), и двукратные – в обе эти фазы (КІ-3).

Общая площадь опытной делянки в данном опыте составляла 7,5 м² на картофеле и 5 м² – на кормовых травах. Учетная площадь 1,5 м² на картофеле и 1 м² – на однолетних и многолетних травах. Повторность в опыте четырехкратная – на картофеле и шестикратная – на кормовых травах. Размещение вариантов и повторений систематическое.

При планировании и проведении наблюдений в опытах руководствовались широко используемыми методическими рекомендациями проф. Б.А. Доспехова (Доспехов, 2014). Программа наблюдений включала в себя: построение фенологического календаря с определением сроков наступления фенологических фаз и межфазных периодов, биометрические измерения площади листьев и высоты растений и определение густоты стояния растений. В частности, высота растений в посевах и посадках культур определялась с использованием мерной ленты как величина от поверхности почвы до верхней точки растения в см. Показатель каждой делянки представлял собой среднее значение из 10 определений.

Учеты проводили во всех опытах сплошным весовым методом с использованием соответствующего требованиям весового оборудования с дискретностью определения в 1 г. Непосредственно в процессе уборки урожая осуществлялся отбор средних растительных образцов (масса 1-1,5 кг) для определения химического состава продукции.

Химико-аналитические исследования растительных образцов были выполнены в испытательных лабораториях ФГБУ ГСАС «Псковская», Агрофизического института и ФГБУ «Ленинградская МВЛ» с использованием стандартизированных методик. Содержание йода в клубнях и зеленой массе трав определялось по ГОСТ 28458-90. Азот общий был определен по ГОСТ Р

51417-99, фосфор общий - ГОСТ 26657-97, калий общий - ГОСТ 30504-97, нитраты - ГОСТ 34570-2019, крахмал – ГОСТ 26176-2019, сырой протеин - ГОСТ 13496.4-2019, зола - ГОСТ 32933-2014, сырая клетчатка - ГОСТ 31675-2012, витамин С по Сияновой и др. (1988).

Результаты исследований обрабатывали методами дисперсионного и частично корреляционного и регрессионного анализа в программах Stat и Excel. Достоверность отличий между вариантами устанавливалась по критерию Фишера на пятипроцентном уровне значимости. Практически все результаты полевых экспериментов представлены в виде среднего значения с рассчитанной наименьшей существенной разницей по Б.А. Доспехову (2014) или доверительным интервалом в форме удвоенного стандартного отклонения.

ГЛАВА 3. АГРОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ЙОДИСТОГО КАЛИЯ

Полевые культуры, являющиеся объектами исследования, находились под влиянием широкого диапазона почвенно-агрохимических условий: трех уровней окультуренности почвы и соответствующей им схемы предшествующего применения органических удобрений и трех уровней применения полного минерального удобрения. Эти факторы оказывали значимое влияние на биопродукционный процесс картофеля и кормовых трав, их рост и развитие в процессе вегетационного периода. Некорневая подкормка этих культур растворами йодистого калия была направлена на активизацию их биопродукционного процесса. Однако в силу разных сроков применения ее влияние на состояние надземной биомассы растений в опытах существенно отличалось.

3.1 Агрономическая эффективность применения йодистого калия в системе удобрения картофеля

Картофель относится к числу наиболее ценных продовольственных культур, возделываемых на Северо-Западе РФ. Его отзывчивость на правильное применение органических, минеральных и микроудобрений большинством ученых оценивается как высокая (Ефимов и др., 2002; Иванов и др., 2002; Иванов и др., 2019б).

3.1.1 Влияние окультуренности почвы, систем удобрения и йодистого калия на рост и развитие картофеля

Как было показано в разд. 2.2 особенность погодно-климатических условий 2018 года состояла в критическом продолжительном (6 недель)

проявлении поздневесенней-раннелетней засухи. Это очень негативно сказалось на начальном развитии растений картофеля. Положительную роль в этой ситуации сыграл поздний срок посадки культуры – 23 мая (табл. 9).

Таблица 9 – Влияние систем удобрения и концентрации раствора КІ на рост и развитие картофеля в 1-м полеовом опыте

Вариант опыта		Даты наступления фенологических фаз				Продолжительность межфазных периодов, дн.					Высота растений к уборке
фактор А (МСУ)	фактор Б (СКІ, %)	всходы	бутонизация	цветение	увядание	0-1	1-2	2-3	3-4	0-4	
NPK0	Контроль	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	48,4
	0,005%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	48,1
	0,01%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	48,9
	0,02%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	23	81	49,2
	0,04%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	23	81	49,5
	0,08%	13.06	12.07	21.07	12.08	21	28	9	21	79	48,1
	0,16%	13.06	12.07	21.07	10.08	21	28	9	19	77	47,4
	0,32%	13.06	12.07	21.07	10.08	21	28	9	19	77	46,7
	0,64%	13.06	12.07	21.07	9.08	21	28	9	18	76	45,3
NPK1	Контроль	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	52,0
	0,005%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	51,7
	0,01%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	52,5
	0,02%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	23	81	54,1
	0,04%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	24	82	54,1
	0,08%	13.06	12.07	21.07	12.08	21	28	9	21	79	53,8
	0,16%	13.06	12.07	21.07	10.08	21	28	9	19	77	52,2
	0,32%	13.06	12.07	21.07	10.08	21	28	9	19	77	50,9
	0,64%	13.06	12.07	21.07	9.08	21	28	9	18	76	50,3
NPK2	Контроль	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	57,0
	0,005%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	57,0
	0,01%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	57,3
	0,02%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	23	81	58,7
	0,04%	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	25	83	58,3
	0,08%	13.06	12.07	21.07	12.08	21	28	9	21	79	58,2
	0,16%	13.06	12.07	21.07	10.08	21	28	9	19	77	56,2
	0,32%	13.06	12.07	21.07	10.08	21	28	9	19	77	55,1
	0,64%	13.06	12.07	21.07	9.08	21	28	9	18	76	55,3
HCP ₀₅	Фактор А										1,5
	Фактор Б										1,7

Всходы картофеля появились только через 3 недели. И первые 10 дней вегетации растения развивались при абсолютном отсутствии дождей и

влажности почвы в пахотном слое на уровне 50 % от наименьшей влагоемкости.

Наблюдения за фитосанитарным состоянием показали, что в части засоренности посадок картофеля сорняками при интенсивной борьбе с ними её уровень был низким и не превышал 1 балла при проведении визуальной оценки. Этому так же способствовали и засушливые условия. В результате задержки ростовых процессов в начальной фазе вегетации в бутонизацию растения картофеля вступили весьма ослабленными и физически выправились только к фазе цветения. На фоне весьма благоприятной (теплой и дождливой) погоды июля растения картофеля получили возможность интенсивного роста и развития. Однако, такая погода была благоприятна и для развития возбудителя фитофтороза, которого не смогли в полной мере сдержать и три фунгицидные обработки. К моменту уборки распространённость заболевания достигла по вариантам опыта 84-97 %. При этом нельзя не признать, что дождливая погода сама по себе стала фактором снижения отдачи от изучаемых в опыте некорневых подкормок КІ.

Действие йодных микроудобрений на развитие растений картофеля, в силу их довольно позднего применения в фазу бутонизации, заметно проявилось только на заключительной стадии вегетационного периода. Обнаружилась тенденция к удлинению вегетации на 1-2 дня в вариантах с 0,02 и 0,04 % КІ. Начиная с концентрации рабочего раствора в 0,08 % проявилось ускорение увядания растений, составившее от 1 до 4 дней. Вероятно, это стало прямым следствием, токсического действия избытка йода. В результате продолжительность межфазного периода цветение-начало увядания сократилась на фоне высоких концентраций КІ с 22 до 18-21 дня.

Динамика высоты растений по фазам вегетационного периода картофеля в вариантах NPK0, NPK1 и NPK2 выглядела следующим образом:

- фаза бутонизации: 31,3, 33,0 и 32,0 см;
- фаза цветения: 42,8, 48,5 и 56,0 см.

Данные заключительного измерения высоты растений представлены в

табл. 9. Они свидетельствуют о положительном влиянии 0,02-0,04 % растворов KI на высоту растений, которая увеличилась на 0,1-1,1 см в варианте NPK0, на 2,1 см – в варианте NPK1 и на 1,3-1,7 см – в варианте NPK2.

Характер положительного воздействия йодной некорневой подкормки на растения картофеля в третьем микрополевым опыте был в определенной мере идентичен описанному выше (табл. 10). При этом проявился и ряд вполне очевидных и достоверных закономерностей. Повышение уровня окультуренности почвы способствовало росту продолжительности вегетационного периода за счет межфазного периода (3-4) созревания на 2 – 4 дня, а полное минеральное удобрение – в среднем на 1 день. Системное применение йодной подкормки удлинило вегетационный период также за счет заключительной фазы в среднем по вариантам опыта с 81 дня в контроле, до 82 – в KI1, 84 – в KI2 и 85 дней – в KI3. В сочетании с аналогичным эффектом от окультуривания почвы и применения минеральных удобрений это привело к общему удлинению вегетационного периода на 7 дней (с 80 до 87 дней). В контексте влияния на биопродукционный процесс этот факт следует оценивать как положительный, так как формирует биологический задел для увеличения товарной продуктивности культуры.

Изученные в опыте факторы оказали положительное влияние и на линейный рост надземной вегетативной части растений. По фактору А в среднем по вариантам опыта степень окультуренности за счет комплексной оптимизации питательного режима почвы увеличила высоту растений с 54,1 см на среднеокультуренной до 75,8 – на хорошо окультуренной и 82,9 см – на высокоокультуренной почве. По фактору Б (минеральная система удобрения) прирост среднестатистического растения к уборке относительно неудообренной почвы (64,5 см) составил 19,7 см в варианте NPK1 (75,8 см) и 28,7 см – в варианте NPK2 (82,9 см). Положительный эффект от некорневой йодной подкормки был гораздо менее выраженным, но всё же достоверным. Средняя по вариантам высота растений составила: KI0 – 69,8, KI1 – 70,9, KI2 – 71,4; KI3 – 71,7 см.

Таблица 10 – Влияние окультуренности почвы, системы удобрения и КІ на
рост и развитие картофеля в 3-ем полевом опыте

Вариант опыта			Даты наступления фенологических фаз				Продолжительность межфазных периодов, дн.					Высота растений к уборке
фактор А (окультуренность почвы)	фактор Б (МСУ)	фактор В (кратность подкормок 0,02 % КІ)	всходы	бутонизация	цветение	увядание	0-1	1-2	2-3	3-4	0-4	
Средняя	NPK0	Контроль	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	48,1
		КІ1	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	49,4
		КІ-2	13.06	12.07	21.07	14.08	21	28	9	23	81	49,2
		КІ-3	13.06	12.07	21.07	15.08	21	28	9	24	82	50,3
	NPK1	Контроль	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	52,3
		КІ1	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	54,6
		КІ2	13.06	12.07	21.07	15.08	21	28	9	24	82	54,9
		КІ3	13.06	12.07	21.07	16.08	21	28	9	25	83	55,2
	NPK2	Контроль	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	57,2
		КІ1	13.06	12.07	21.07	14.08	21	28	9	23	81	58,9
		КІ2	13.06	12.07	21.07	16.08	21	28	9	25	83	59,7
		КІ3	13.06	12.07	21.07	18.08	21	28	9	27	85	59,5
Хорошая	NPK0	Контроль	13.06	12.07	21.07	13.08	21	28	9	22	80	67,4
		КІ1	13.06	12.07	21.07	15.08	21	28	9	24	82	68,8
		КІ2	13.06	12.07	21.07	15.08	21	28	9	24	82	68,4
		КІ3	13.06	12.07	21.07	17.08	21	28	9	26	84	69,3
	NPK1	Контроль	13.06	12.07	20.07	13.08	21	28	8	23	80	77,0
		КІ1	13.06	12.07	20.07	15.08	21	28	8	25	82	78,2
		КІ2	13.06	12.07	20.07	17.08	21	28	8	27	84	79,3
		КІ3	13.06	12.07	20.07	18.08	21	28	8	28	85	78,9
	NPK2	Контроль	13.06	12.07	20.07	13.08	21	28	8	23	80	79,5
		КІ1	13.06	12.07	20.07	15.08	21	28	8	25	82	79,9
		КІ2	13.06	12.07	20.07	16.08	21	28	8	26	83	81,3
		КІ3	13.06	12.07	20.07	19.08	21	28	8	29	86	81,5
Высокая	NPK0	Контроль	13.06	12.07	20.07	16.08	21	28	8	25	82	75,3
		КІ1	13.06	12.07	20.07	18.08	21	28	8	27	84	74,8
		КІ2	13.06	12.07	20.07	19.08	21	28	8	28	85	76,2
		КІ3	13.06	12.07	20.07	20.08	21	28	8	29	86	77,0
	NPK1	Контроль	13.06	12.07	20.07	17.08	21	28	8	26	82	82,5
		КІ1	13.06	12.07	20.07	18.08	21	28	8	27	84	83,3
		КІ2	13.06	12.07	20.07	20.08	21	28	8	29	86	83,0
		КІ3	13.06	12.07	20.07	21.08	21	28	8	30	87	84,4
	NPK2	Контроль	13.06	12.07	20.07	16.08	21	28	8	26	82	89,1
		КІ1	13.06	12.07	20.07	18.08	21	28	8	27	84	89,8
		КІ2	13.06	12.07	20.07	21.08	21	28	8	30	87	90,3
		КІ3	13.06	12.07	20.07	21.08	21	28	8	30	87	89,2
НСР ₀₅	Фактор А											1,6
	Фактор Б											1,8
	Фактор В											1,9

Наблюдения и биометрические измерения, выполненные в опыте № 3, в целом подтвердили закономерности, обнаруженные на культуре картофеля в первых двух опытах (табл. 11).

Таблица 11 – Зависимость высоты картофеля сорта Метеор в фазу цветения от степени окультуренности почвы и концентрации раствора KI
(2-й опыт 2022 г.)

Концентрация раствора KI (фактор Б)	Высота растений (см) по уровням окультуренности почвы почвы (фактор А)			
	средняя	хорошая	высокая	средняя по фактору А
Контроль	37,2	41,7	44,8	41,2
0,01%	40,5	46,0	45,4	44,0
0,02%	41,9	42,1	45,1	43,0
0,04%	45,5	43,6	51,1	46,7
0,06%	43,1	45,6	51,3	46,7
0,08%	44,3	45,0	48,1	45,8
0,10%	43,2	45,2	47,0	45,1
НСР ₀₅ по фактору А	7,7			
НСР ₀₅ по фактору Б	5,2			

На фоне довольно значительной погрешности достоверные положительные эффекты пришлись на концентрации рабочего раствора KI в 0,04 и 0,06 % на средне- и высоко окультуренных почвах. Дальнейшее повышение концентрации выражалось в тенденции к снижению этого важного биометрического показателя растений.

Учет площади листовой поверхности в расчете на 1 растение, выполненный в фазу цветения также подтвердил положительный характер действия некорневых подкормок раствором йодистого калия на биопродукционный процесс картофеля (табл. 12). Однако здесь негативные последствия от доз с концентрацией выше 0,04 % не проявились на среднеокультуренной почве, что объяснить однозначно пока затруднительно. Тем не менее, по усредненным данным оптимальным уровнем для растений картофеля стала концентрация раствора KI в 0,04 %, на фоне которой высота

Таблица 12 - Зависимость площади листьев одного растения картофеля в фазу цветения от степени окультуренности почвы и концентрации раствора KI (2-й опыт 2022 г.)

Концентрации раствора KI (фактор Б)	Площадь листьев (см ²) по уровням окультуренности почвы (фактор А)			
	средняя	хорошая	высокая	средняя по фактору А
Контроль	2159	2453	2783	2465
0,01%	2338	2504	2636	2493
0,02%	2408	2629	2800	2612
0,04%	2720	2790	3288	2933
0,06%	2726	2657	2951	2778
0,08%	2802	2525	3083	2803
0,10%	2969	2459	2898	2775
НСР ₀₅ по фактору А 324				
НСР ₀₅ по фактору Б 207				

и площадь листьев растений картофеля сорта Метеор оказались на 13 и 19 % выше, чем в контрольном варианте.

Таким образом, в ходе исследования было установлено, что влияние некорневой подкормки растворами йодистого калия на рост и развитие картофеля может носить разносторонний характер. При оптимальном дозировании (концентрации рабочего раствора в 0,02-0,04 % KI) и кратности (до 3 раз) йод увеличивал продолжительность заключительной фазы вегетации и всего вегетационного периода на 1-4 дня. Его положительный эффект на линейном росте растений (1,1-1,9 см) кратно уступал и ускоренному окультуриванию почвы (11,3-18,4 см) и полной минеральной системе удобрения (19,7-28,7 см), тем не менее он указывал на определенный положительный отклик биопродукционного процесса на йод. В третьем опыте влияние йодных подкормок на биометрические показатели картофеля оказались более значимыми и достигли 13 % по высоте растений и 19 % по площади листовой поверхности. Превышение оптимальных дозровок (0,08 % и выше) сокращало вегетационный период, ускоряя наступление увядания растений на 2-4 дня.

3.1.2 Зависимость продуктивности картофеля от окультуренности почвы, системы удобрения и применения йодистого калия

Результаты сплошного весового учета урожайности клубней картофеля в первом полевом опыте подтвердили в очередной раз его высокую отзывчивость на оптимизацию минерального питания агродерново-слабоподзолистой (табл. 13). Применение полного минерального удобрения в

Таблица 13 – Влияние минеральной системы удобрения и концентрации раствора КІ на урожайность клубней картофеля
(по Иванову и др., 2019а)

Вариант опыта		Показатели агрономической эффективности						
фактор А (МСУ)	фактор Б (СКИ, %)	урожайность, кг/м ²	прибавка от системы удобрения		прибавка от основного удобрения		прибавка от КІ	
			кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
NPK0	Контроль	1,732	-	-	-	-	-	-
	0,005%	1,760	0,028	2			0,028	2
	0,01%	1,809	0,077	4			0,077	4
	0,02%	1,854	0,122	7			0,122	7
	0,04%	1,892	0,160	9			0,160	9
	0,08%	1,796	0,064	4			0,064	4
	0,16%	1,683	-0,049	-3			-0,049	-3
	0,32%	1,503	-0,229	-13			-0,229	-13
	0,64%	1,085	-0,647	-37			-0,647	-37
NPK1	Контроль	2,528	0,796	46	0,796	46	-	-
	0,005%	2,931	1,199	69	1,171	67	0,403	16
	0,01%	3,174	1,442	83	1,365	75	0,646	26
	0,02%	3,456	1,724	100	1,602	86	0,928	37
	0,04%	2,707	0,975	56	0,815	43	0,179	7
	0,08%	2,701	0,969	56	0,905	50	0,173	7
	0,16%	2,522	0,790	46	0,839	50	-0,006	0
	0,32%	2,176	0,444	26	0,673	45	-0,352	-14
	0,64%	2,106	0,374	22	1,021	94	-0,422	-17
NPK2	Контроль	2,893	1,161	67	1,161	67	-	-
	0,005%	3,098	1,366	79	1,338	76	0,205	7
	0,01%	3,379	1,647	95	1,570	87	0,486	17
	0,02%	3,386	1,654	95	1,532	83	0,493	17
	0,04%	3,110	1,378	80	1,218	64	0,217	8
	0,08%	2,790	1,058	61	0,994	55	-0,103	-4
	0,16%	2,650	0,918	53	0,967	57	-0,243	-8
	0,32%	2,573	0,841	49	1,070	71	-0,320	-11
	0,64%	2,509	0,777	45	1,424	131	-0,384	-13
HCP ₀₅			0,141		0,090		0,157	

вариантах NPK1 (N80P30K100) и NPK2 (N120P30K150) позволило интенсифицировать производственный процесс картофеля и увеличить урожайность клубней на 46 и 67 % соответственно. В оптимальных вариантах

применение йодной некорневой подкормки дополнительно увеличило отдачу от полного минерального удобрения до 86 – 87 %.

Уровень применения минеральных удобрений на среднеокультуренной почве данного опыта оказал прямое влияние на отзывчивость картофеля на внесение йодной подкормки. Если без основного минерального удобрения в оптимальном варианте 0,04 % KI прибавка составила 0,160 кг/м² (9 %), то на фоне NPK1 и NPK2 при 0,02 % KI – 0,928 (37 %) и 0,493 (17 %) соответственно, т.е. на удобренном фоне отзывчивость картофеля на йод оказалась в среднем в 4,4 раза выше, чем на неудобренном.

Статистическая обработка с использованием регрессионного и корреляционного методов данных этого опыта показала, что между концентрацией рабочего раствора в области 0 – 0,02-0,04 % и урожайностью клубней существует прямолинейная прямо пропорциональная зависимость с коэффициентом корреляции по вариантам опыта NPK0 - 0,988, NPK1 – 0,967 и NPK2 – 0,881 ед. (рис. 3).

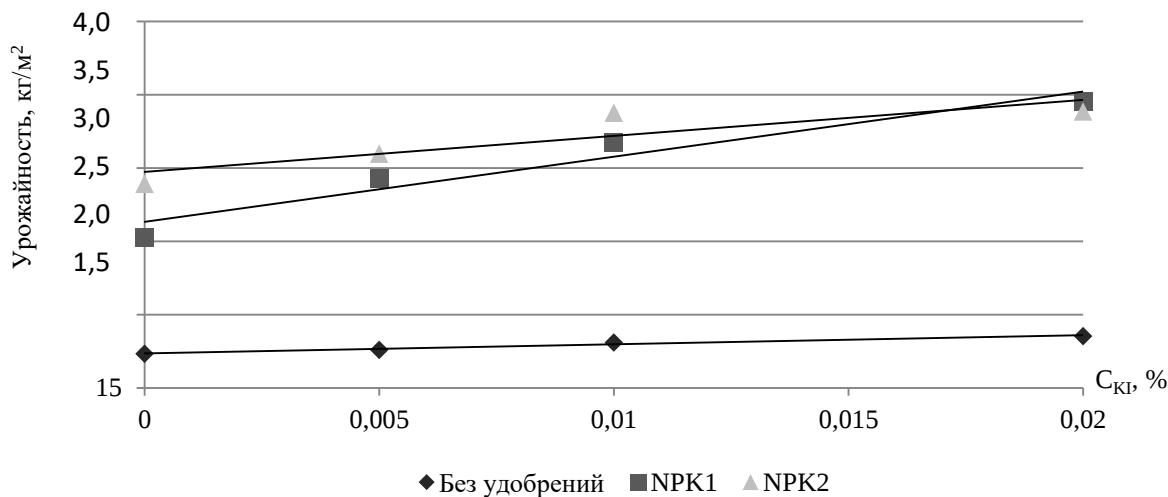


Рисунок 3 – Зависимость урожайности клубней картофеля от СК_I на участке от 0 до 0,02 %

Одной из наиболее вероятных причин положительной реакции картофеля на поступление небольших концентраций йода является усиление биосинтеза триптофана и его трансаминирования в индольные ауксины, вызывающие

растяжение клеток меристемы и усиление транспорта питательных веществ (Кашин, 1987). Даже небольшое превышение оптимальной концентрации рабочего раствора КІ у растений картофеля вызвало снижение результирующей продукционного процесса. Причины негативной реакции по данным исследователей могут быть разными. Это и ингибирование восстановления нитратов и, как следствие, синтеза белков, возможная ответная защитная реакция растений на ускоренный синтез ауксинов в форме усиления выделения фитогормона этилена (Кашин, 1987). Негативная тенденция, появляющаяся при СКІ в 0,04 - 0,08 %, на более концентрированных растворах приобретает вид обратно пропорциональной прямолинейной функции, с коэффициентами корреляции на фоне NPK0, NPK1 и NPK2 в -0,998, -0,919 и -0,773, соответственно (рис. 4).

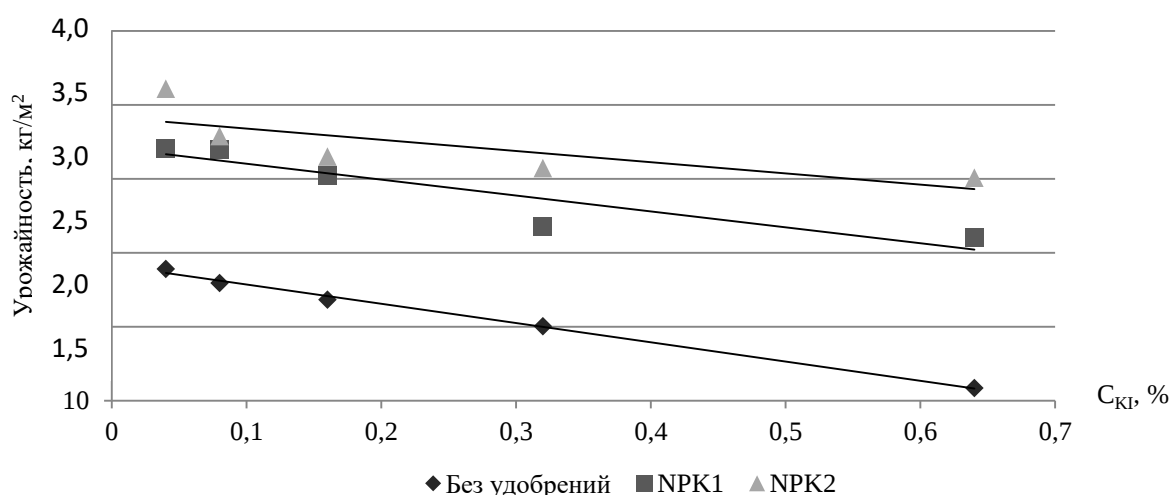


Рисунок 4 – Зависимость урожайности клубней картофеля от СКІ на участке от 0,04 до 0,64 %

Негативный эффект высоких дозировок йода достигает уже 8 – 37 % потерь, что можно охарактеризовать как проявление фитотоксичности микроудобрения.

По нашему мнению, у резкого перехода от стимулирующего к ингибирующему эффекту есть еще одно весьма вероятное биологическое объяснение. Наблюдениями за развитием растений было установлено, что повышение концентрации раствора КІ удлиняет период клубнеобразования, а

в условиях эпифитотии фитофтороза биопродукционный потенциал картофеля на фоне СКІ 0,04-0,08 просто не мог реализоваться даже при трехкратных фунгицидных обработках, тем более в вариантах с высокими дозами минеральных удобрений. Аналогичная ситуация резкого снижения отдачи от органических и минеральных удобрений на фоне эпифитотии фитофтороза фиксировалась и ранее (Иванов и др., 2019б). Очевидно, сдвиг оптимума в низкую концентрацию при лучшей удобренности стал следствием поражения растений фитофторозом и вынужденной уборки картофеля в удобренных йодом вариантах в физиологически более ранние сроки.

Изучение более детальной шкалы концентраций рабочего раствора в диапазоне от 0,01 до 0,10 % на картофеле сорта Метеор в более благоприятных по фитофторозу условиях не подтвердило наличие устойчивого достоверного токсического эффекта в диапазоне концентраций от 0,06 до 0,10 % (табл. 14). Более того, в более узком, чем в первом опыте,

Таблица 14 – Влияние окультуренности почвы, минеральной системы удобрения и концентрации раствора КІ на урожайность клубней картофеля

Вариант опыта			Показатели агрономической эффективности								
фактор А (окультуренность почвы)	фактор Б МСУ	фактор В СКІ, %	урожай ность, кг/м ²	Прибавка продуктивности							
				от СУ		от окультур.		от NPK		от КІ	
				кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средняя	NPK0	Контроль	2,247	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,01%	2,490	0,243	11					0,243	11
		0,02%	2,670	0,423	19					0,423	19
		0,04%	2,607	0,360	16					0,360	16
		0,06%	2,650	0,403	18					0,403	18
		0,08%	2,263	0,017	1					0,017	1
		0,10%	2,620	0,373	17					0,373	17
	NPK1	Контроль	2,465	0,218	10	-	-	0,218	10	-	-
		0,01%	2,410	0,163	7			-0,080	-3	-0,055	-2
		0,02%	3,543	1,297	58			0,873	33	1,078	44
		0,04%	3,410	1,163	52			0,803	31	0,945	38
		0,06%	3,542	1,295	58			0,892	34	1,077	44
		0,08%	2,888	0,642	29			0,625	28	0,423	17
		0,10%	3,657	1,410	63			1,037	40	1,192	48
	NPK2	Контроль	2,483	0,237	11			0,237	11	-	-
		0,01%	3,035	0,788	35			0,545	22	0,552	22

Продолжение таблицы 14

Продолжение таблицы 1											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средняя	NPK2	0,02%	3,430	1,183	53			0,760	28	0,947	38
		0,04%	3,760	1,513	67			1,153	44	1,277	51
		0,06%	4,055	1,808	80			1,405	53	1,572	63
		0,08%	3,967	1,720	77			1,703	75	1,483	60
		0,10%	4,108	1,862	83			1,488	57	1,625	65
Хорошая	NPK0	Контроль	2,383	0,137	6	0,137	6	-	-	-	-
		0,01%	2,017	-0,230	-10	-0,473	-19			-0,367	-15
		0,02%	2,603	0,357	16	-0,067	-2			0,220	9
		0,04%	2,553	0,307	14	-0,053	-2			0,170	7
		0,06%	2,077	-0,170	-8	-0,573	-22			-0,307	-13
		0,08%	2,435	0,188	8	0,172	8			0,052	2
		0,10%	2,195	-0,052	-2	-0,425	-16			-0,188	-8
	NPK1	Контроль	3,820	1,573	70	1,355	55	1,437	60	-	-
		0,01%	4,112	1,865	83	4,112	171	2,095	104	0,292	8
		0,02%	3,752	1,505	67	0,208	6	1,148	44	-0,068	-2
		0,04%	4,267	2,020	90	4,267	125	1,713	67	0,447	12
		0,06%	4,187	1,940	86	0,645	18	2,110	102	0,367	10
		0,08%	3,658	1,412	63	3,658	127	1,223	50	-0,162	-4
		0,10%	4,667	2,420	108	1,010	28	2,472	113	0,847	22
	NPK2	Контроль	4,282	2,035	91	1,798	72	1,898	80	-	-
		0,01%	5,465	3,218	143	2,430	80	3,448	171	1,183	28
		0,02%	5,123	2,877	128	1,693	49	2,520	97	0,842	20
		0,04%	5,150	2,903	129	1,390	37	2,597	102	0,868	20
		0,06%	6,042	3,795	169	1,987	49	3,965	191	1,760	41
		0,08%	4,928	2,682	119	0,962	24	2,493	102	0,647	15
		0,10%	5,130	2,883	128	1,022	25	2,935	134	0,848	20
Высокая	NPK0	Контроль	2,310	0,063	3	0,063	3	-	-	-	-
		0,01%	2,813	0,567	25	0,323	13			0,503	22
		0,02%	2,890	0,643	29	0,220	8			0,580	25
		0,04%	2,583	0,337	15	-0,023	-1			0,273	12
		0,06%	2,960	0,713	32	0,310	12			0,650	28
		0,08%	2,240	-0,007	0	-0,023	-1			-0,070	-3
		0,10%	2,315	0,068	3	-0,305	-12			0,005	0
	NPK1	Контроль	4,200	1,953	87	1,735	70	1,890	82	-	-
		0,01%	4,427	2,180	97	2,017	84	1,613	57	0,227	5
		0,02%	4,447	2,200	98	0,903	25	1,557	54	0,247	6
		0,04%	4,685	2,438	109	1,275	37	2,102	81	0,485	12
		0,06%	4,908	2,662	118	1,367	39	1,948	66	0,708	17
		0,08%	4,653	2,407	107	1,765	61	2,413	108	0,453	11
		0,10%	4,530	2,283	102	0,873	24	2,215	96	0,330	8
	NPK2	Контроль	4,830	2,583	115	2,347	94	2,520	109	-	-
		0,01%	5,568	3,322	148	2,533	83	2,755	98	0,738	15
		0,02%	5,087	2,840	126	1,657	48	2,197	76	0,257	5
0,04%		5,035	2,788	124	1,275	34	2,452	95	0,205	4	
0,06%		5,725	3,478	155	1,670	41	2,765	93	0,895	19	
0,08%		5,568	3,322	148	1,602	40	3,328	149	0,738	15	
0,10%		6,297	4,050	180	2,188	53	3,982	172	1,467	30	
НСР ₀₅				0,358		0,254		0,263		0,312	

концентрационном диапазоне рабочего раствора КІ обнаружилось некоторое превосходство концентрации этого раствора в 0,06 % (рис. 5). В среднем

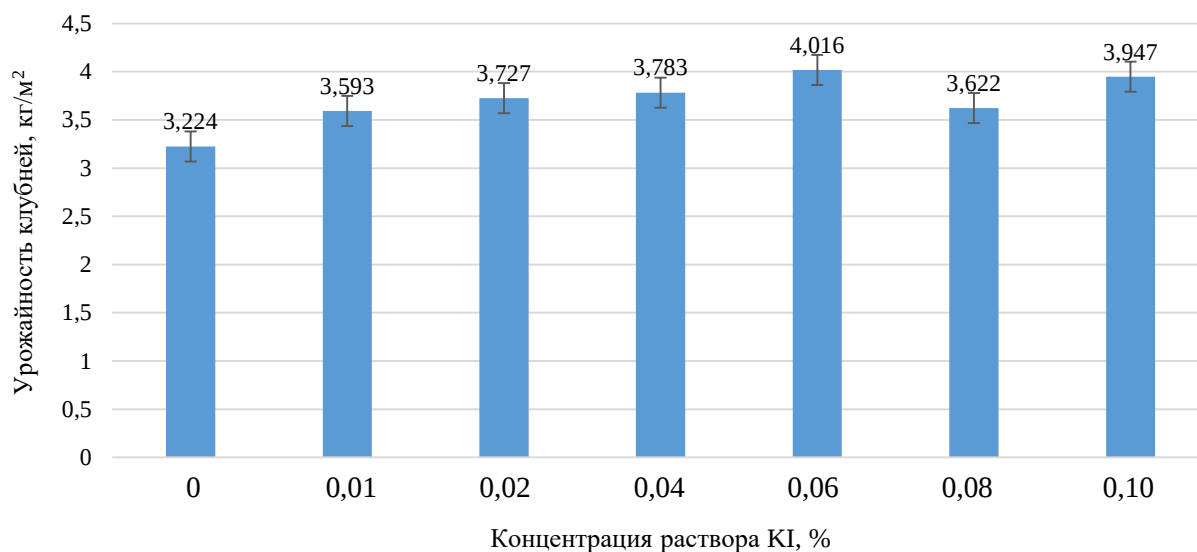


Рисунок 5 – Влияние концентрации рабочего раствора КІ на урожайность клубней картофеля

по всем вариантам опыта, то есть всем возможным почвенно-агрохимическим вариациям оптимальная концентрация рабочего раствора КІ на картофеле составила 0,02 %, обеспечившая увеличение урожайности клубней на 16 %. Более того, достоверные прибавки продуктивности культуры зафиксированы практически во всем диапазоне изученных дозировок. При этом в каждом конкретном варианте (сочетании почвенно-агрохимических условий) оптимальный уровень концентрации рабочего раствора варьировал от 0,02 до 0,06 %. Так в вариантах минеральной системы удобрения NPK0, NPK1 и NPK2 на среднеокультуренной почве это были концентрации 0,02, 0,02 и 0,06 %, на хорошо окультуренной почве – 0,02, 0,04 и 0,06 %, на высокоокультуренной – 0,06, 0,06 и 0,06 % соответственно. Из представленных данных видно, что по мере повышения уровня плодородия и удобренности агродерново-подзолистой почвы значение оптимальной концентрации рабочего раствора закономерно увеличивалось с 0,02 до 0,06 %. Средний уровень прибавки продуктивности картофеля от оптимальных

дозировок йода составил на среднеокультуренной почве 1,024 кг/м² (43 %), на хорошо окультуренной – 0,810 кг/м² (23 %) и на высокоокультуренной – 0,751 кг/м² (20 %). Одной из наиболее вероятных причин некоторого снижения отдачи от йодной некорневой подкормки по мере роста окультуренности почвы могла быть и более высокая обеспеченность окультуренных видов почвы йодом.

В обоих полевых экспериментах применение некорневой йодной подкормки привело к значительному повышению агрономической эффективности и окупаемости полного минерального удобрения. Средний уровень агрономической эффективности ускоренного окультуривания агродерново-подзолистой почвы (по сути, интенсивной и гиперинтенсивной органической системы удобрения) до хорошего и высокого уровня выразился в прибавке продуктивности картофеля (относительно среднего по вариантам на среднеокультуренной почве 3,062 кг/м²) на 1,202 и 1,132 кг/м² или 39 и 37 % соответственно. При этом в неудобряемых йодом вариантах, где картофель страдал на фоне крайнего переувлажнения почвы от избытка марганца, агрономическая эффективность окультуривания оказалась просто ничтожной (прибавки продуктивности картофеля составили лишь 0,137 и 0,063 кг/м²). Это значит, что за счет применения йода эффективность окультуривания почвы до хорошего и высокого уровня была повышена в 8,8 и 18 раз соответственно.

В вариантах с оптимальными дозировками йода во внекорневой подкормке картофеля в первом опыте окупаемость 1 кг д.в. основного удобрения удалось увеличить в 1,3 – 1,4 раза с 9,5 – 9,7 до 12,0 – 13,7 з.ед., а во втором опыте в 2,0 – 3,6 раза с 9,0 - 14,1 до 17,8 – 32,3 з.ед. Такое сверхэффективное действие йодной некорневой подкормки невозможно объяснить простым ростостимулирующим гормональным эффектом. В данном случае, с высокой вероятностью, также имело место положительное действие усиленного йодного питания на снятие последствий от фитотоксичности марганца, которая не позволила добиться желаемой отдачи от минеральных удобрений. Как известно, токсичность этого микроэлемента

существенно возрастает под действием минеральных азотных удобрений, особенно, на фоне перевлажнения почвы в дождливую погоду (Ефимов и др., 2002).

Закономерности, выявленные в микрополевом опыте в звене полевого севооборота, направленном на поиск оптимальной кратности некорневых подкормок, в целом, соответствовали установленным ранее в первых двух опытах. В частности, картофель положительно отозвался на ускоренное окультуривание почвы высокими дозами органических удобрений, увеличив свою продуктивность на хорошо и высокоокультуренной почвах на 36 и 89 % (табл. 15). Вполне ожидаемым было и снижение отдачи от полного минерального удобрения по мере повышения уровня эффективного плодородия почвы (прибавки урожайности клубней в вариантах NPK1 и NPK2 на среднеокультуренной почве составили 21 – 41, на хорошо окультуренной – 22 – 47, на высоко окультуренной – 4 – 15 %).

Оценка эффективности кратности некорневых подкормок картофеля 0,02 % раствором йодистого калия в третьем микрополевом опыте в звене полевого севооборота, подтвердила установленные в первых двух опытах с дозировками закономерности не в полной мере (табл. 15).

С одной стороны, увеличение кратности некорневых подкормок в ограниченных почвенно-агрохимических условиях, то есть, на неудобряемом и удобряемом NPK1 (N80P30K100) фоне средне- и хорошо культуренной почвы, вызвало существенное увеличение продуктивности культуры (0,628 кг/м² или 22 % в среднем по вариантам с оптимальной дозировкой) (рис. 6). В этих вариантах удалось также повысить в среднем в 2,4 раза натуральную окупаемость 1 кг действующего вещества минеральных удобрений (с 4,2 до 10 зерн. ед.). В результате на хорошо и высокоокультуренной, а также неудобряемой среднеокультуренной почве достоверно лучший результат получен при двукратной некорневой подкормке, а по фону полного минерального удобрения в вариантах NPK1 и NPK2 на среднеокультуренной почве максимальная агрономическая эффективность была достигнута при

Таблица 15 - Зависимость урожайности картофеля от окультуренности почвы, минеральной системы удобрения и кратности опрыскиваний КИ
(по Иванову и др., 2019а)

Вариант опыта			Показатели агрономической эффективности								
фактор А окультурен- ность почвы	фактор Б МСУ	фактор В СКИ,%	Урожай- ность, кг/м²	Прибавка урожайности клубней							
				от СУ		от окультур.		от NPK		от КИ	
				т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%
Средняя	NPK0	Контроль	2,040	-	-	-	-	-	-	-	-
		КИ-1	2,176	0,136	7			-	-	0,136	7
		КИ-2	2,368	0,328	16			-	-	0,328	16
		КИ-3	2,360	0,320	16			-	-	0,320	16
	NPK1	Контроль	2,472	0,432	21			0,432	21	-	-
		КИ-1	3,040	1,000	49			0,864	40	0,568	23
		КИ-2	3,088	1,048	51			0,720	30	0,616	25
		КИ-3	3,232	1,192	58			0,872	37	0,760	31
	NPK2	Контроль	2,880	0,840	41			0,840	41	-	-
		КИ-1	2,760	0,720	35			0,584	27	-0,120	-4
		КИ-2	3,240	1,200	59			0,872	37	0,360	13
		КИ-3	3,528	1,488	73			1,168	49	0,648	23
Хорошая	NPK0	Контроль	2,768	0,728	36	0,728	36	-	-	-	-
		КИ-1	3,040	1,000	49	0,864	40	-	-	0,272	10
		КИ-2	3,584	1,544	76	1,216	51	-	-	0,816	29
		КИ-3	3,320	1,280	63	0,960	41	-	-	0,552	20
	NPK1	Контроль	3,368	1,328	65	0,896	36	0,600	22	-	-
		КИ-1	3,700	1,660	81	0,660	22	0,660	22	0,332	10
		КИ-2	3,792	1,752	86	0,704	23	0,208	6	0,424	13
		КИ-3	3,800	1,760	86	0,568	18	0,480	14	0,432	13
	NPK2	Контроль	4,060	2,020	99	1,180	41	1,292	47	-	-
		КИ-1	4,072	2,032	100	1,312	48	1,032	34	0,012	0
		КИ-2	4,136	2,096	103	0,896	28	0,552	15	0,076	2
		КИ-3	4,240	2,200	108	0,712	20	0,920	28	0,180	4
Высокая	NPK0	Контроль	3,864	1,824	89	1,824	89	-	-	-	-
		КИ-1	4,000	1,960	96	1,824	84	-	-	0,136	4
		КИ-2	4,008	1,968	96	1,640	69	-	-	0,144	4
		КИ-3	3,848	1,808	89	1,488	63	-	-	-0,016	0
	NPK1	Контроль	4,024	1,984	97	1,552	63	0,160	4	-	-
		КИ-1	4,440	2,400	118	1,400	46	0,440	11	0,416	10
		КИ-2	4,816	2,776	136	1,728	56	0,808	20	0,792	20
		КИ-3	4,572	2,532	124	1,340	41	0,724	19	0,548	14
	NPK2	Контроль	4,448	2,408	118	1,568	54	0,584	15	-	-
		КИ-1	4,584	2,544	125	1,824	66	0,584	15	0,136	3
		КИ-2	4,584	2,544	125	1,344	41	0,576	14	0,136	3
		КИ-3	4,648	2,608	128	1,120	32	0,800	21	0,200	4
НСР ₀₅				0,234		0,093		0,185		0,204	

трехкратном опрыскивании.

С другой стороны, вследствие существенного удлинения вегетационного периода картофеля (на 4-7 дней) на фоне эпифитотии

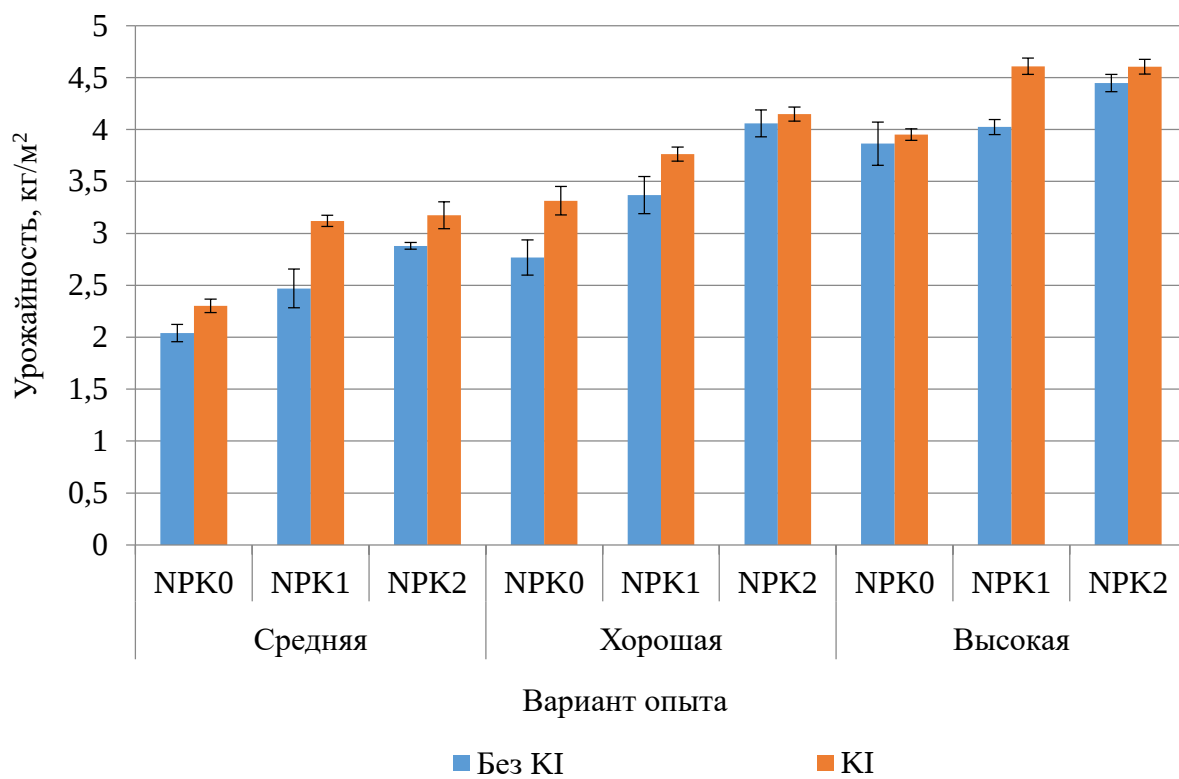


Рисунок 6 - Зависимость урожайности картофеля от применения йода (в среднем по вариантам), полного минерального удобрения и окультуренности ПОЧВЫ

фитофтороза продукционный потенциал культуры на высоком почвенно-агрохимическом фоне остался не реализован и, как следствие, и применение йодной подкормки – неэффективным. Агротехнологическая причина этого в вынужденном из-за поражения фитофторозом проведении уборки в сроки, не соответствующие физиологической спелости культуры в данных вариантах.

На неблагоприятном для эффективного действия фитосанитарном и погодно-климатическом фоне влияние некорневой йодной подкормки на товарность клубней картофеля носила неустойчивый характер (рис. 7):

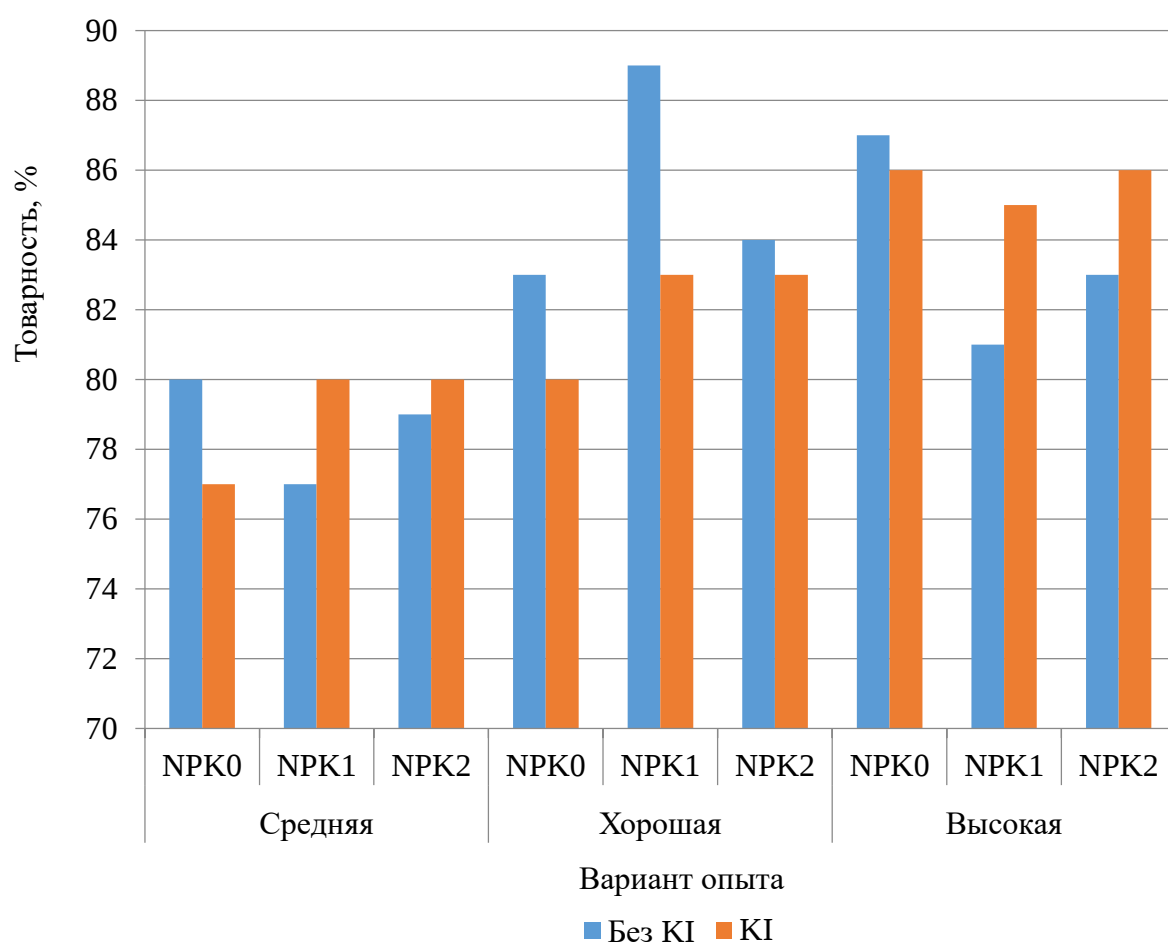


Рисунок 7 – Влияние некорневых обработок раствором KI на товарность картофеля

положительный на высоко окультуренной почве и отрицательный – на хорошо окультуренной почве.

Клубневой анализ показал, что положительный эффект от йода достигается, преимущественно, за счет доли крупных и средних клубней. Доля средних и крупных клубней повышается в 2 раза по сравнению с вариантами без применения йода. В 75% вариантов опыта (из 36) с обработками йодом происходило увеличение числа клубней по сравнению с контрольными вариантами. В 85 % опытных вариантов (из 36) с обработками раствором KI было отмечено увеличение массы клубней.

Таким образом, исследования на картофеле показали, что эта культура в условиях Северо-Запада является высоко отзывчивой на ускоренное окультуривание агродерново-подзолистой почвы и применение полного минерального удобрения, однако отдача от них, как и от йода снижается на фоне неблагоприятных погодных и фитосанитарных условий. По мере повышения уровня плодородия и удобренности агродерново-подзолистой почвы уровень оптимальной концентрации рабочего раствора йодистого калия закономерно увеличивался от 0,02 до 0,06 %. Средний уровень прибавки продуктивности картофеля от оптимальных доз йода составил на среднеокультуренной почве 1,024 кг/м² (43 %), на хорошо окультуренной – 0,810 кг/м² (23 %) и на высокоокультуренной – 0,751 кг/м² (20 %). Оптимальная кратность некорневых подкормок картофеля достигла 2 – 3 единиц, в зависимости от специфики сочетания почвенно-агрохимических, погодно-климатических и фитосанитарных условий.

При оптимальном дозировании йода во внекорневой подкормке картофеля окупаемость 1 кг д.в. основного удобрения удалось увеличить в 1,3 – 1,4 раза с 9,5 – 9,7 до 12,0 – 13,7 зерн. ед. в первом опыте, во втором опыте в 2,0 – 3,6 раза с 9,0 – 14,1 до 17,8 – 32,3 зерн. ед. – во втором опыте. и в 2,4 раза с 4,2 до 10 зерн. ед. – в третьем микрополевым опыте.

3.2 Агрономическая эффективность применения йодистого калия в системе удобрения однолетних трав

Однолетние травы, представляющие в условиях Северо-Запада России, преимущественно, смеси яровых зерновых и ценных зернобобовых культур относятся к числу малотребовательных и скороспелых кормовых культур. Это их преимущество используется земледельцами для формирования сырьевого конвейера заготовки высококачественных кормов. С этой целью часто высеваются в несколько сроков, причем поздние посевы могут быть

выполнены вплоть до середины июля (Архипов и др., 2015). Как правило, их возделывание ведется на фоне средних доз азотных удобрений и повышенных – калийных удобрений. Они часто используются как лучшая покровная культура для подсева многолетних трав, что также заставляет еще более акцентировать внимание на усиленном фосфорно-калийном удобрении с расчетом не только на однолетние, но и на потребности последующих многолетних трав (Ефимов и др., 2002; Иванов и др., 2002).

3.2.1 Влияние окультуренности почвы, систем удобрения и йодистого калия на рост и развитие однолетних трав

Начало весеннего полевого сезона 2019 года характеризовалось благоприятной теплой погодой, что позволило осуществить посев вико-овсяной смеси 28 апреля и на следующий день - многолетних трав. Сильные ливни, прошедшие 5 – 7 мая с последующей теплой ветреной погодой вызвали образование плотной почвенной корки, особенно, на среднеокультуренной почве опыта. Это не просто задержало прорастание семян, но и привело к частичной гибели проростков вики посевной. В результате фаза полных всходов на опыте была зафиксирована только 13 мая. Полевая всхожесть семян и густота стояния растений заметно ранжировались, исходя из специфики почвенных условий по вариантам опыта (табл. 16). Так на хорошо и высокоокультуренной почве густота стояния овса посевного и вики посевной оказалась на 15 – 40 и 13 % выше, чем на среднеокультуренной почве. Овес при прорастании в таких непростых условиях положительно отреагировал и на улучшение агрофизических свойств почвы при окультуривании, и на применение удобрений. Вследствие оптимизации агрофизических свойств густота посева вики увеличилась на 45 – 82 %, а ее реакция на полное минеральное удобрение оказалась разной: положительной

Таблица 16 – Зависимость густоты стояния растений в фазу полных всходов от почвенно-агрохимических условий в опыте

Вариант (фактор Б)	Густота стояния однолетних трав (шт/м ²) по видам почвы (фактор А)							
	среднеокуль- туренная		хорошо окультуренная		высокоокуль- туренная		средняя	
	овес	вика	овес	вика	овес	вика	овес	вика
НРК0	312	22	376	32	489	40	392	31
НРК1	372	36	424	36	515	32	437	35
НРК2	420	36	466	36	545	24	477	33
Средняя	368	31	422	35	516	35	435	33
НСР ₀₅ фактор А 7,4 фактор Б 9,1								

– на среднеокультуренной почве и резко отрицательной – на высокоокультуренной.

На фоне теплой благоприятной погоды растения быстро прошли начальную фазу роста и уже к 24 мая овес вступил в фазу кущения (табл. 17), когда была проведена первая некорневая подкормка посева в опыте с поиском оптимальной фазы опрыскивания раствором йодистого калия. Такая погода благоприятствовала и сорной растительности, специальной борьбы с которой в посевах однолетних трав не принято проводить. В среднем по вариантам уровень засоренности на среднеокультуренной почве составил 2 балла, а на хорошо и высокоокультуренной почве достиг 4 баллов. С фазы кущения овса (1-3 настоящих листьев у вики) началась в крайней степени острая засуха. Вплоть до уборки трав 4 июля (даты проведения учетов) выпало менее 20 мм осадков. С одной стороны, это резко затормозило продукционный процесс, с другой стороны вынудило растения проходить фазы онтогенеза в ускоренном режиме.

Влияние некорневой подкормки растворами КІ на развитие растений оказало весьма слабое влияние. На обеих культурах, как и на картофеле обнаружилась тенденция к задержке развития в заключительной части вегетационного периода. На фоне острой засухи в вариантах 0,32 и, особенно, 0,64 % к фазе бутонизации вики обнаружались внешние признаки химического токсикоза. Листья приобрели антоциановую окраску, начался их краевой некроз и затем гибель отдельных растений.

Таблица 17 – Влияние систем удобрения и КІ на рост и развитие овса
посевного и вики посевной

Вариант опыта		Даты наступления фенологических фаз овса				Даты наступления фенологических фаз вики				Высота расте-ний к уборке, см	
фактор А (МСУ	фактор Б (СКІ, %)	всход ы	куще- ние	выход в трубку	вымет- ывание метелк и	1-3 листа	ветвле- ние	бутони- зация	цвете- ние	овес	вика
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NPK0	Контроль	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	32,7	27,4
	0,005%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	34,7	30,1
	0,01%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	36,4	29,5
	0,02%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	39,0	29,8
	0,04%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	44,6	33,3
	0,08%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	45,2	34,4
	0,16%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	28.06	48,3	36,2
	0,32%	13.05	24.05	10.06	27.06	25.05	02.06	21.06	29.06	47,9	35,5
	0,64%	13.05	24.05	10.06	28.06	25.05	02.06	21.06	-	44,3	32,9
NPK1	Контроль	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	38,5	36,1
	0,005%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	41,3	40,3
	0,01%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	45,1	37,7
	0,02%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	44,3	39,7
	0,04%	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	50,4	42,2
	0,08%	13.05	24.05	10.06	27.06	25.05	02.06	21.06	27.06	52,2	41,7
	0,16%	13.05	24.05	10.06	28.06	25.05	02.06	21.06	28.06	53,1	43,4
	0,32%	13.05	24.05	10.06	28.06	25.05	02.06	21.06	29.06	52,8	40,5
	0,64%	13.05	24.05	10.06	28.06	25.05	02.06	21.06	-	47,6	39
NPK2	Контроль	13.05	24.05	9.06	25.06	25.05	02.06	21.06	27.06	42,0	38,8
	0,005%	13.05	24.05	9.06	25.06	25.05	02.06	21.06	27.06	43,1	40,4
	0,01%	13.05	24.05	9.06	25.06	25.05	02.06	21.06	27.06	46,2	38,2
	0,02%	13.05	24.05	9.06	25.06	25.05	02.06	21.06	27.06	49,8	39,9
	0,04%	13.05	24.05	9.06	25.06	25.05	02.06	21.06	27.06	50,2	42,1
	0,08%	13.05	24.05	9.06	27.06	25.05	02.06	21.06	27.06	51,2	42,4
	0,16%	13.05	24.05	9.06	28.06	25.05	02.06	21.06	28.06	47,9	39,9
	0,32%	13.05	24.05	9.06	29.06	25.05	02.06	21.06	29.06	47,5	41,9
	0,64%	13.05	24.05	9.06	29.06	25.05	02.06	21.06	-	46,7	38,9
HCP ₀₅	Фактор А									3,5	3,0
	Фактор Б									4,2	3,4

В области концентраций раствора от 0,01 до 0,16 % обнаруживалось ярко выраженное достоверное стимулирующее действие некорневой йодной подкормки. В лучших вариантах высота растений вики посевной превосходила контрольный вариант на 4 – 9 см, а овса посевного – на 9 – 16 см.

Характер действия изучаемых факторов на рост и развитие растений в посеве однолетних трав в третьем опыте был схожим (табл. 18). Он выражался

Таблица 18 – Влияние окультуренности почвы, системы удобрения и КІ на рост и развитие однолетних трав

Вариант опыта			Даты наступления фенологических фаз овса				Даты наступления фенологических фаз вики				Высота растений к уборке	
фактор А (окультуренность почвы)	фактор Б (МСУ)	фактор В (время провед. 0,02 % КІ)	всходы	кущение	выход в трубку	выметывание метелки	1-3 листа	ветвление	бутонизация	цветение	овес	вика
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Средняя	NPK0	Контроль	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	35,3	32,4
		КІ1	13.05	24.05	10.06	27.06	25.05	02.06	22.06	28.06	37,2	34,1
		КІ2	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	40,8	34,7
		КІ3	13.05	24.05	10.06	27.06	25.05	02.06	23.06	30.06	36,0	33,2
	NPK1	Контроль	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	42,1	39,1
		КІ1	13.05	24.05	10.06	27.06	25.05	02.06	22.06	28.06	44,2	40,5
		КІ2	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	21.06	27.06	47,6	41,8
		КІ3	13.05	24.05	10.06	29.06	25.05	02.06	23.06	30.06	46,9	39,9
	NPK2	Контроль	13.05	24.05	9.06	25.06	25.05	02.06	21.06	27.06	46,4	42,8
		К1	13.05	24.05	10.06	26.06	25.05	02.06	23.06	30.06	50,8	44,7
		КІ2	13.05	24.05	9.06	27.06	25.05	02.06	21.06	28.06	49,0	45,3
		КІ3	13.05	24.05	10.06	29.06	25.05	02.06	23.06	30.06	48,5	44,0
Хорошая	NPK0	Контроль	13.05	24.05	10.06	26.06	23.05	01.06	20.06	26.06	46,1	47,3
		КІ1	13.05	24.05	11.06	27.06	23.05	01.06	20.06	27.06	51,2	49,5
		КІ2	13.05	24.05	10.06	26.06	23.05	01.06	20.06	26.06	53,4	51,2
		КІ3	13.05	24.05	12.06	29.06	23.05	01.06	22.06	29.06	53,8	51,0
	NPK1	Контроль	13.05	24.05	10.06	26.06	23.05	01.06	21.06	27.06	48,0	50,4
		КІ1	13.05	24.05	12.06	29.06	23.05	01.06	23.06	30.06	50,6	53,3
		КІ2	13.05	24.05	10.06	27.06	23.05	01.06	22.06	29.06	52,1	51,8
		КІ3	13.05	24.05	11.06	29.06	23.05	01.06	23.06	30.06	49,3	52,9
	NPK2	Контроль	13.05	23.05	8.06	26.06	23.05	01.06	22.06	29.06	54,5	52,2
		КІ1	13.05	23.05	10.06	29.06	23.05	01.06	24.06	30.06	56,0	54,7
		КІ2	13.05	23.05	9.06	27.06	23.05	01.06	22.06	29.06	55,3	54,1
		КІ3	13.05	23.05	10.06	29.06	23.05	01.06	24.06	1.07	54,4	52,8

Продолжение таблицы 18

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Высокая	NPK0	Контроль	12.05	23.05	8.06	26.06	22.05	29.05	19.06	26.06	55,2	53,0
		KI1	12.05	23.05	11.06	29.06	22.05	29.05	21.06	27.06	56,1	52,6
		KI2	12.05	23.05	9.06	27.06	22.05	29.05	19.06	27.06	61,2	58,4
		KI3	12.05	23.05	12.06	30.06	22.05	29.05	23.06	1.07	56,1	53,7
	NPK1	Контроль	12.05	23.05	8.06	26.06	22.05	29.05	21.06	27.06	60,3	62,4
		KI1	12.05	23.05	10.06	29.06	22.05	29.05	23.06	1.07	62,7	64,6
		KI2	12.05	23.05	8.06	27.06	22.05	29.05	22.06	28.06	66,5	65,7
		KI3	12.05	23.05	12.06	30.06	22.05	29.05	23.06	29.06	60,2	63,1
	NPK2	Контроль	12.05	23.05	8.06	26.06	22.05	29.05	22.06	29.06	64,1	64,6
		KI1	12.05	23.05	11.06	29.06	22.05	29.05	24.06	2.07	64,4	65,5
		KI2	12.05	23.05	9.06	28.06	22.05	29.05	21.06	27.06	66,5	67,8
		KI3	12.05	23.05	13.06	30.06	22.05	29.05	24.06	2.07	65,0	67,1
HCP ₀₅	Фактор А											1,2
	Фактор Б											1,4
	Фактор В											1,5

в существенном положительном действии окультуренности почвы (до 10 – 20 см) и основного минерального удобрения (NPK1 и NPK2) на высоту растений (4,3 и 7,7 см у овса и 6,2 и 8,7 см – у вики соответственно). Положительный эффект от применения йода ограничивался приростами в 2,0 – 4,5 см на овсе посевном и 1,5 – 2,9 см – на вике посевной. Также было отмечено, что более поздняя обработка KI способствовала более быстрому наступлению фенофаз как растений вики, так и овса.

3.2.2 Агрономическая эффективность применения йодистого калия в системе удобрения однолетних трав

Остро засушливые погодные-климатические условия практически всего активного вегетационного периода, в том числе и т.н. периода максимального потребления у изучаемых культур, не позволили изреженному посеву (табл. 19) вики и овса использовать в полной мере питательные вещества почвы и удобрений.

Таблица 19 – Влияние минеральной системы удобрения и концентрации раствора КI на урожайность зеленой массы однолетних трав
(по Иванову и др., 2021)

Вариант опыта		Показатели агрономической эффективности						
фактор А (МСУ)	фактор Б (СКI, %)	Урожай- ность, кг/м ²	прибавка от системы удобрения		прибавка от основного удобрения		прибавка от КI	
			кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
NPK0	Контроль	0,462	-	-	-	-	-	-
	0,005%	0,510	0,048	11			0,049	11
	0,01%	0,519	0,057	12			0,058	12
	0,02%	0,598	0,136	30			0,136	30
	0,04%	0,649	0,187	41			0,187	41
	0,08%	0,661	0,199	43			0,199	43
	0,16%	0,830	0,369	80			0,369	80
	0,32%	0,745	0,284	61			0,284	61
	0,64%	0,576	0,115	25			0,115	25
NPK1	Контроль	0,488	0,026	6	0,026	6	-	-
	0,005%	0,533	0,071	15	0,023	4	0,045	9
	0,01%	0,544	0,082	18	0,025	5	0,056	12
	0,02%	0,580	0,119	26	-0,018	-3	0,093	19
	0,04%	0,608	0,146	32	-0,041	-6	0,120	25
	0,08%	0,672	0,211	46	0,011	2	0,185	38
	0,16%	0,822	0,360	78	-0,009	-1	0,334	68
	0,32%	0,688	0,226	49	-0,057	-8	0,200	41
	0,64%	0,655	0,193	42	0,079	14	0,167	34
NPK2	Контроль	0,658	0,196	43	0,196	43	-	-
	0,005%	0,691	0,229	50	0,180	35	0,033	5
	0,01%	0,695	0,234	51	0,176	34	0,037	6
	0,02%	0,724	0,262	57	0,126	21	0,066	10
	0,04%	0,742	0,280	61	0,093	14	0,084	13
	0,08%	0,788	0,327	71	0,127	19	0,130	20
	0,16%	0,620	0,158	34	-0,210	-25	-0,038	-6
	0,32%	0,560	0,098	21	-0,185	-25	-0,098	-15
	0,64%	0,516	0,055	12	-0,060	-10	-0,142	-22
НСР _{0,05}		0,046			0,052		0,068	

Результаты многолетних исследований, выполненных на Северо-Западе России, показывают, что в таких условиях практически полностью утрачивают свою эффективность органические, азотные и фосфорные удобрения (Иванов, Иванов, 2002; Фесенко и др., 2012; Производство..., 2018; и только калийные в силу особенной физиологической роли калия в регуляции обводненности цитоплазмы клеток могут сохранять и даже наращивать окупаемость

собственного действующего вещества (Прокошев, 1993, 1998; Иванова и др., 1997; Иванов, 1998; Прокошев, Дерюгин, 2000; Иванов, Конашенков, 2018). Прямым следствием этого стала очень низкая продуктивность однолетних трав, которая уступала результатам предшествующих лет исследований в агрофизическом стационаре в 2 – 3 раза и такая же неудовлетворительная эффективность полного минерального удобрения. Причем в варианте NPK1 (N30P30K60) она оказалась практически нулевой, а в варианте NPK2 (N60P30K90) при значительном относительном приросте продуктивности в 43 % его абсолютная величина 0,196 кг/м² все равно была низкой. И натуральная окупаемость 1 кг действующего вещества удобрений здесь составила всего 2,1 зерн. ед.

Учет ботанического состава зеленой массы при этом показал, что под действием азотного компонента минеральных удобрений существенно изменялось соотношение между викой и овсом. Если в среднем по неудобряемым вариантам опыта это соотношение было 57/43 то в вариантах NPK1 и NPK2 доля вики последовательно сокращалась до 42/58 и 12/88 соответственно. Причина этого связана с разной требовательностью вики и овса к азотному режиму, параметрами которого изучаемые виды почв резко отличались. Неприхотливость вики (вследствие симбиоза с клубеньковыми бактериями) позволяла ей при кратно меньшей численности доминировать по биомассе над овсом на среднеокультуренной почве. По мере оптимизации азотного режима почвы резко возрастала конкурентность овса, которая при количественном доминировании обеспечила абсолютное превосходство над викой и по общей биомассе на высоко окультуренной почве опыта. Действие йода на ботанический состав носило противоположный характер – доля вики в биомассе трав последовательно по мере увеличения концентрации рабочего раствора увеличивалась на 3 – 14 %.

На фоне столь неблагоприятной погоды отдача от некорневой подкормки растворами KI оказалась неожиданно высокой, конечно, в относительном измерении. Йодные обработки положительно повлияли на

урожайность трав, особенно выраженный эффект был отмечен в вариантах без удобрений и со средней дозой минеральных удобрений. По мере увеличения дозировки калия в основном удобрении отдача (прибавка урожая зеленой массы) от некорневой подкормки закономерно снижалась в среднем по вариантам с 0,183 кг/м² в неудобряемом минеральными удобрениями контроле до 0,139 и 0,052 кг/м² – по фону NPK1 и NPK2 соответственно. Относительный их уровень в вариантах с оптимальной концентрацией рабочего раствора для вариантов NPK0, NPK1 и NPK2 в 0,16, 0,16 и 0,08 % снизился с 80 до 68 и 20 % соответственно. Вероятной причиной высокой эффективности йодной подкормки на фоне засухи, зафиксированной и в других исследованиях (Серегина, Ахметжанов, 2024), является положительная роль обоих компонентов (йода и калия) в повышении обводненности цитоплазмы, а также в усилении под действием йода синтеза фенолпроизводных антиоксидантов, контролирующих общую устойчивость растений к неблагоприятным воздействиям (Wang et al., 2014). Из литературы известно и об участии йода в регуляции экспрессии ряда генов, ответственных за защитные реакции растений к биотическим и абиотическим факторам (Kiferle et al., 2021). Кроме того, воздействие KI в концентрациях до 20 мкм улучшало газообмен (~71%) и снижало перекисное окисление липидов у растений сои. Это связано с более высокой ферментативной антиоксидантной активностью, обнаруживаемой при добавлении йода (Lima et al., 2023). При этом нельзя обойти вниманием и факт выраженного некротического токсикоза при концентрациях раствора KI 0,32 и 0,64 % в варианте с дозой NPK2.

И все же, как и на картофеле по данным корреляционного и регрессионного анализа в области стимулирующих концентраций зависимость между дозировками йода (x, %) и продуктивностью однолетних трав (y, г/м²) носила прямолинейный характер с уровнем достоверности аппроксимации от 0,91 до 0,98. Сами же функции имели вид:

$$\text{вариант NPK0 } y = 2,058x + 0,512 \text{ (} r^2 = 0,91 \text{);}$$

$$\text{вариант NPK1 } y = 1,913x + 0,520 \text{ (} r^2 = 0,98 \text{);}$$

вариант NPK2 $y=1,457x + 0,679$ ($r^2 - 0,92$).

В силу снижения эффективности йода по мере увеличения доз полного минерального удобрения применение йодной некорневой подкормки не вызвало роста окупаемости действующего вещества макроудобрений, как это было зафиксировано на картофеле.

В опыте, посвященном изучению эффекта повторных некорневых обработок раствором KI с концентрацией 0,02 %, выполняемом в звене севооборота не только на среднеокультуренной, но и на хорошо и высокоокультуренных агродерново-подзолистых почвах было установлено, что окультуренность почвы в сложившихся критических условиях увлажнения играла ключевую роль в продукционном процессе однолетних трав. Существенная разница в комплексе агрофизических свойств этих почв (Иванов и др., 2022) обеспечила превосходство окультуренным почвам в обеспеченности пахотного слоя влагой (полевой влажности почвы) перед среднеокультуренной в отдельные даты июня до 3,2 4,4 %. В результате в среднем за вегетационный период однолетних трав полевая влажность средне-, хорошо и высокоокультуренной почвы в пределах пахотного слоя составила 11,22, 12,94 и 13,46 %, а преимущество последних двух видов – 1,72 и 2,23 %. По мере роста окультуренности почвы доля вики посевной в составе надземной биомассы трав сокращалась с 71 – 78 % на среднеокультуренной почве до 62 – 66 % и 43 – 47 % - на хорошо и высокоокультуренной почвах. Следствием этого стала высокая (64 и 206 %)

для малотребовательных культур отзывчивость на окультурирование (табл. 20). причине резко отличалась отзывчивость однолетних трав на основное полное минеральное удобрение на почвах разной окультуренности. На фоне засухи, в отличие от лет с нормальным увлажнением, эффективность минерального удобрения по мере роста окультуренности почвы не снижалась, а, напротив, увеличивалась.

Таблица 20 – Зависимость урожайности однолетних трав от окультуренности почвы, минеральной системы удобрения и времени проведения подкормки
КИ (по Иванову и др., 2021)

Вариант опыта			Показатели агрономической эффективности								
фактор А (окультурен- ность почвы)	фактор Б (МСУ)	фактор В (время провед.)	Урожай- ность, кг/м²	Прибавка урожайности зеленой массы							
				от СУ		от окультур.		от NPK		от KI	
				кг/м²	%	кг/м²	%	кг/м²	%	кг/м²	%
Средняя	NPK0	Контроль	0,453	-	-	-	-	-	-	-	-
		KI1	0,594	0,141	31			-	-	0,141	31
		KI2	0,627	0,174	38			-	-	0,174	38
		KI3	0,529	0,076	17			-	-	0,076	17
	NPK1	Контроль	0,503	0,050	11			0,050	11	-	-
		KI1	0,571	0,118	26			-0,023	-4	0,068	14
		KI2	0,665	0,212	47			0,038	6	0,162	32
		KI3	0,669	0,216	48			0,140	26	0,166	33
	NPK2	Контроль	0,645	0,192	42			0,192	42	-	-
		K1	0,713	0,260	57			0,119	20	0,068	11
		KI2	0,656	0,203	45			0,029	5	0,011	2
		KI3	0,605	0,152	34			0,076	14	-0,040	-6
Хорошая	NPK0	Контроль	0,744	0,291	64	0,291	64	-	-	-	-
		KI1	0,939	0,486	107	0,345	58	-	-	0,195	26
		KI2	0,965	0,512	113	0,338	54	-	-	0,221	30
		KI3	0,864	0,411	91	0,335	63	-	-	0,120	16
	NPK1	Контроль	1,122	0,669	148	0,619	123	0,378	51	-	-
		KI1	1,201	0,748	165	0,630	110	0,262	28	0,079	7
		KI2	1,199	0,746	165	0,534	80	0,234	24	0,077	7
		KI3	1,027	0,574	127	0,358	54	0,163	19	-0,095	-8
	NPK2	Контроль	1,372	0,919	203	0,727	113	0,628	84	-	-
		KI1	1,421	0,968	214	0,708	99	0,482	51	0,049	4
		KI2	1,470	1,017	225	0,814	124	0,505	52	0,098	7
		KI3	1,321	0,868	192	0,716	118	0,457	53	-0,051	-4
Высокая	NPK0	Контроль	1,388	0,935	206	0,935	206	-	-	-	-
		KI1	1,482	1,029	227	0,888	149	-	-	0,094	7
		KI2	1,737	1,284	283	1,110	177	-	-	0,349	25
		KI3	1,296	0,843	186	0,767	145	-	-	-0,092	-7
	NPK1	Контроль	2,133	1,680	371	1,630	324	0,745	54	-	-
		KI1	2,365	1,912	422	1,794	314	0,883	60	0,232	11
		KI2	2,422	1,969	435	1,757	264	0,685	39	0,289	14
		KI3	2,044	1,591	351	1,375	206	0,748	58	-0,089	-4
	NPK2	Контроль	2,189	1,736	383	1,544	239	0,801	58	-	-
		KI1	2,291	1,838	406	1,578	221	0,809	55	0,102	5
		KI2	2,493	2,040	450	1,837	280	0,756	44	0,304	14
		KI3	2,197	1,744	385	1,592	263	0,901	70	0,008	0
HCP _{0,05}			0,122			0,092		0,148		0,160	

В среднем по вариантам опыта прибавка урожайности зеленой массы однолетних трав от основного минерального удобрения составила по трем видам почв 0,078, 0,389 и 0,791 кг/м², т.е. агрономическая эффективность макроудобрений возросла на хорошо и высокоокультуренной почвах возросла в 5,0 и 10,1 раза (табл. 20, рис. 8).

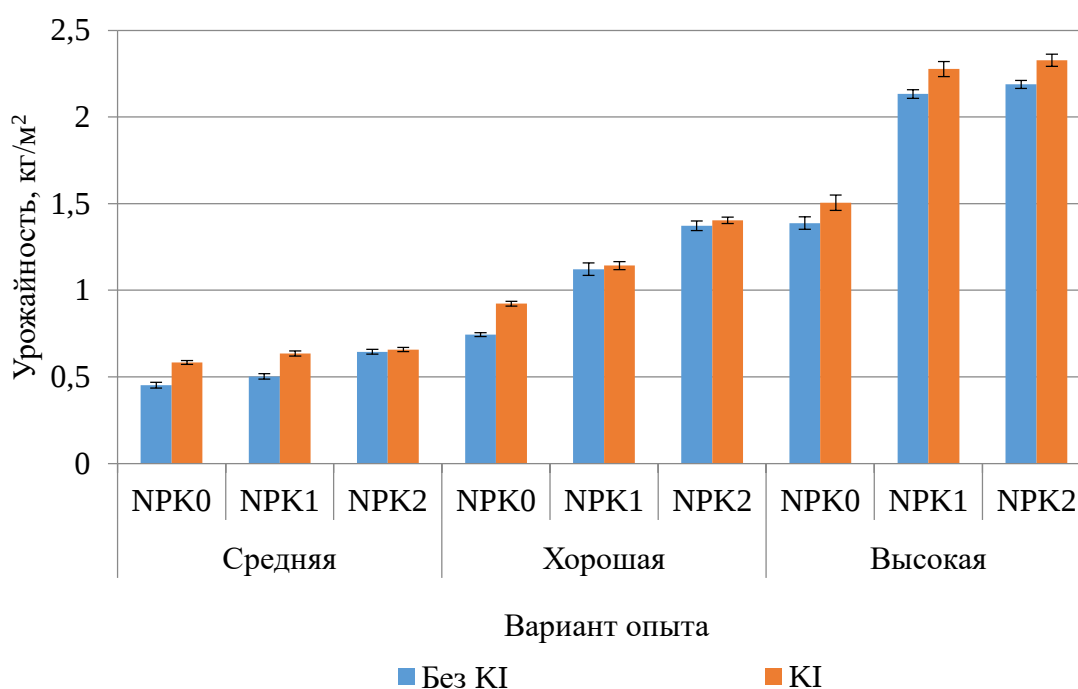


Рисунок 8 - Зависимость урожайности однолетних трав от применения йода (в среднем по вариантам), полного минерального удобрения и окультуренности почвы

На таком фоне агрономическая эффективность некорневой йодной подкормки может быть оценена как средняя (высокая на низком почвенно-агрохимическом фоне и низкая – на высоком почвенно-агрохимическом фоне). Ведь следует принимать во внимание, что в данном опыте концентрация рабочего раствора составляла 0,02 %, что было существенно ниже установленного в первом опыте оптимального значения в 0,08 и 0,16 %. При этом проявилась отмеченная в первом опыте закономерность снижения отдачи от йода по мере увеличения дозы полного минерального удобрения в среднем

по вариантам с 0,142 до 0,099 и 0,061 кг/м². Из двух испытанных в данном опыте сроков (фаз) применения некорневой подкормки однозначное преимущество получил поздний срок ее проведения в фазу выхода в трубку (вариант КІ2 – урожайность зеленой массы 1,359 кг/м²), обеспечивший прибавку продуктивности к неподкармливаемому контролю (урожайность зеленой массы 1,172 кг/м²) 16 %, тогда как при раннем сроке опрыскивания в фазу кущения (урожайность 1,286 кг/м²) – только 10 %. У такой разницы в эффективности есть вполне объективное объяснение, связанное с тем, что к фазе кущения овса посев однолетних трав имеет настолько низкое проективное покрытие, что значительная часть раствора попала не на растения, а на почву. При этом объяснить однозначно отсутствие положительного эффекта от двукратного опрыскивания посева трав 0,02 % раствором КІ пока не представляется возможным. Можно лишь предполагать, что этот эффект также стал специфическим последствием засухи и усиленного йодного питания, связанным с задержкой развития и удлинением вегетационного периода вики посевной и овса посевного. Но даже при оптимальной фазе проведения подкормки опрыскивание 0,02 % раствором йодистого калия обеспечило достоверную прибавку урожайности однолетних трав от 14 до 38 % только в шести из девяти изученных в опыте почвенно-агрохимических сочетаний систем удобрения (фактор А и Б). Исходя из данных первого опыта, вполне очевидно, что это стало следствием неоптимального уровня концентрации рабочего раствора йодистого калия во втором опыте.

Таким образом, исследования на однолетних травах показали, что, вопреки бытующему в среде специалистов мнению, эта культура в условиях острой засухи также является высоко отзывчивой на ускоренное окультуривание агродерново-подзолистой почвы и применение полного минерального удобрения. На фоне засухи натуральная окупаемость 1 кг действующего вещества удобрений увеличивалась по мере оптимизации агрофизических свойств почвы при окультуривании с 1,56 зерн. ед. на

среднеокультуренной почве, до 7,78 зерн.ед. – на хорошо окультуренной и 15,82 ед. – на высокоокультуренной почве. По мере повышения удобренности агродерново-подзолистой почвы уровень оптимальной концентрации рабочего раствора йодистого калия (0,16, 0,16 и 0,08 % для средне-, хорошо и высокоокультуренной почвы) и отдачи от него снижался с 80 до 68 и 20 % соответственно. Средний уровень прибавки продуктивности однолетних трав от оптимальных дозировок йода составил на неудобренной почве 0,369 кг/м² (80 %), на фоне NPK1 – 0,334 кг/м² (68 %) и на фоне NPK2 – 0,130 кг/м² (20 %). Оптимальная фаза (срок) проведения йодной некорневой подкормки на однолетних травах – это фаза выхода в трубку у овса посевного и начала ветвления – у вики посевной, обеспечивающая среднюю прибавку продуктивности в 16 % с дифференциацией от почвенно-агрохимических условий в пределах 2 – 38 %.

На натуральную окупаемость полного минерального, варьирующие у однолетних трав от низкого уровня на среднеокультуренной до высокого – на хорошо- и высокоокультуренной почве некорневая йодная подкормка положительного влияния не оказала.

3.3 Агрономическая эффективность применения йодистого калия в системе удобрения многолетних трав

Многолетние травы, возделываемые на пашне, в настоящее время представляют собой основной сырьевой ресурс производства кормов для регионального животноводства (Архипов и др., 2015; Научные основы ..., 2018). Главной его задачей является получение необходимого количества не просто высококачественных кормов, а отвечающих физиологическим потребностям высокопродуктивных животных (например, для крупного рогатого скота с молочной продуктивностью до 11-13 тыс. литров в год), испытывающих особенно острую потребность в балансировании не только

вещественного, но и микроэлементной состава (Архипов и др., 2015; Рекомендации..., 2022).

Более 80 % посевов многолетних трав на Северо-Западе России – это многовидовые злаково-бобовые смеси (Иванов и др., 1998; Архипов и др., 2015). Абсолютной доминантой среди них на почвах нормального увлажнения являются двухкомпонентные смеси на основе клевера лугового и тимopheевки луговой или овсяницы луговой. Посев именно такой смеси клевера лугового Орфей и тимopheевки луговой Ленинградская 204 стала объектом исследования в наших опытах. Поскольку минеральные удобрения под многолетние травы правильнее применять под предшествующие культуры (Иванов и др., 2002), то из схемы опытов с ними были исключены варианты с полным минеральным удобрением.

3.3.1 Влияние окультуренности почвы и йодистого калия на рост и развитие многолетних трав

Многолетние травы входят в число культур с максимальной потребностью в воде, поэтому вследствие высокой повторяемости поздневесенних-раннелетних засух, они наиболее уязвимы и нуждаются в мелиоративном регулировании водного режима и усиленном калийном питании (Иванов и др., 2016; Иванов, Конашенков, 2018). В годы возделывания многолетних трав в опыте (2020 и 2021 г.), погода продолжала сохранять крайне неустойчивый характер (разд. 2.2). В оба года многолетние травы попали под воздействие этой засухи, однако её проявление носило разный характер и воздействие на посевы многолетних трав. В 2020 г весна была поздней и затяжной, несмотря на теплую погоду уже в первой декаде апреля, ночные заморозки продолжались вплоть до конца месяца. Начало отрастания, несколько изреженных засухой в первый год жизни и хорошо перенесших период зимнего покоя многолетних трав, пришлось на 20 апреля (табл. 21).

Таблица 21 – Влияние окультуренности почвы и КІ на рост и развитие клевера лугового и тимopheевки луговой 1 года пользования

Вариант опыта		Даты наступления фенологических фаз тимopheевки луговой				Даты наступления фенологических фаз клевера лугового				Высота растений к уборке, см	
фактор А (окультур.)	фактор Б (СКІ, %)	весен-нее отраста-ние	куще-ние	выход в трубку	выметы-вание султана	весен-нее отраста-ние	стебле-вание	бутони-зация	нач. цвете-ния	тимо-феевка луговая	клевер луговой
Средняя	Контроль	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	23.06	39,9	37,7
	0,005%	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	23.06	39,2	38,3
	0,01%	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	23.06	40,2	37,5
	0,02%	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	23.06	40,7	39,5
	0,04%	20.04	6.05	4.06.	14.06	20.04	28.05	12.06	24.06	41,8	39,9
	0,08%	20.04	6.05	4.06.	14.06	20.04	28.05	12.06	26.06	41,6	39,7
	0,16%	20.04	6.05	4.06.	15.06	20.04	28.05	12.06	27.06	42,9	40,6
	0,32%	20.04	6.05	4.06.	17.06	20.04	28.05	12.06	27.06	41,8	37,9
	0,64%	20.04	6.05	4.06.	17.06	20.04	28.05	12.06	28.06	41,3	35,3
Хорошая	Контроль	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	25.06	43,4	40,7
	0,005%	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	25.06	44,2	40,3
	0,01%	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	26.06	43,7	41,0
	0,02%	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	26.06	44,8	41,8
	0,04%	20.04	6.05	2.06.	17.06	20.04	27.05	11.06	27.06	46,4	42,6
	0,08%	20.04	6.05	2.06.	17.06	20.04	27.05	11.06	25.06	46,8	42,4
	0,16%	20.04	6.05	2.06.	18.06	20.04	27.05	11.06	28.06	47,5	42,9
	0,32%	20.04	6.05	2.06.	18.06	20.04	27.05	11.06	28.06	46,7	41,0
	0,64%	20.04	6.05	2.06.	18.06	20.04	27.05	11.06	29.06	46,3	40,3
Высокая	Контроль	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	10.06	24.06	49,1	38,9
	0,005%	20.04	6.05	2.06.	15.06	20.04	25.05	10.06	26.06	51,1	38,6
	0,01%	20.04	6.05	2.06.	15.06	20.04	25.05	10.06	25.06	50,8	39,8
	0,02%	20.04	6.05	2.06.	16.06	20.04	27.05	10.06	25.06	51,6	39,7
	0,04%	20.04	6.05	2.06.	17.06	20.04	25.05	10.06	26.06	52,6	40,8
	0,08%	20.04	6.05	2.06.	17.06	20.04	25.05	10.06	27.06	54,1	41,7
	0,16%	20.04	6.05	2.06.	18.06	20.04	25.05	10.06	28.06	54,7	42,3
	0,32%	20.04	6.05	2.06.	19.06	20.04	25.05	10.06	28.06	53,2	41,7
	0,64%	20.04	6.05	2.06.	19.06	20.04	25.05	10.06	29.06	53,4	40,9
НСР ₀₅		Фактор А								2,0	1,7
		Фактор Б								2,3	2,1

Начальный рост и развитие клевера и тимopheевки сдерживали недостаток влаги и тепла (осадки отсутствовали с середины апреля до середины мая). Нормальные условия для жизни многолетние травы получили только с начала третьей декады мая. Однако благоприятный характер их сохранялся не более 2 недель, так как со 2-ой недели июня наступила весьма острая засуха с температурами воздуха в отдельные дни до 32 °С. Такое

сочетание погодных условий привело к задержке в наступлении фазы ветвления у клевера лугового, а последующая засуха, напротив ускорила наступление бутонизации и цветения (в среднем на 2-5 дней). При этом общая продолжительность вегетационного периода на фоне засухи оказалась сокращенной на 5 – 7 дней относительно обычных для этих культур и сортов сроков.

Изучаемые в опыте факторы на фоне неблагоприятной для трав погоды оказали хоть и менее выраженное, но всё же достоверное действие на рост и развитие клевера лугового и тимopheевки луговой. Во-первых, окультуривание почвы, позволившее ей иметь более благоприятные тепло- и водно-физические характеристики ускорило на 1-2 дня наступление фаз выхода в трубку у тимopheевки и бутонизации – у клевера, а следующие межфазные периоды, напротив, увеличило на 2-4 дня. Йодная некорневая подкормка по мере увеличения концентрации рабочего раствора, как и на предшествующих культурах задерживала наступление генеративного развития тимopheевки луговой и клевера лугового на 2 – 4 дня.

Высота растений в посеве к моменту проведения уборки в фазу начала цветения составила у тимopheевки луговой и клевера лугового на среднеокультуренной почве 39,9 и 37,7 см, на хорошо окультуренной почве – 43,4 и 40,7 см и на высокоокультуренной почве – 49,1 и 38,9 см. Повышение окультуренности почвы способствовало росту конкурентности тимopheевки луговой и ослаблению – клевера лугового, что и оказало соответствующее действие на один из важных биометрических показателей посева трав.

В лучших вариантах с применением йодной некорневой подкормки высота растений тимopheевки и клевера увеличилась на 3,0 – 5,6 и 2,2 – 3,4 см соответственно. Однако, несмотря на это нельзя не признать, что к моменту проведения уборки посев многолетних трав имел весьма подавленное засухой состояние.

Характер действия ускоренного окультуривания агродерново-подзолистой почвы и сроков проведения йодной некорневой подкормки в опыте № 3 был аналогичен первому опыту (табл. 22). То-есть, с повышением

Таблица 22 – Влияние окультуренности почвы и времени проведения подкормки КІ на рост и развитие клевера лугового и тимopheевки луговой 1 года пользования

Вариант опыта		Даты наступления фенологических фаз тимopheевки луговой				Даты наступления фенологических фаз клевера лугового				Высота растений к уборке, см	
фактор А (окультур.)	фактор В (время провед. 0,02 % КІ)	весен-нее отраста-ние	куще-ние	выход в трубку	выметы-вание султана	весен-нее отраста-ние	стебле-вание	бутони-зация	нач. цвете-ния	тимо-феевка луговая	клевер луговой
Средняя	Контроль	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	23.06	39,3	37,3
	КІ1	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	23.06	40,7	39,8
	КІ2	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	23.06	40,5	38,8
	КІ3	20.04	6.05	4.06.	12.06	20.04	28.05	12.06	24.06	40,8	39,7
Хорошая	Контроль	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	25.06	42,9	41,0
	КІ1	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	25.06	44,4	41,8
	КІ2	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	26.06	43,6	41,3
	КІ3	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	11.06	27.06	44,7	41,7
Высокая	Контроль	20.04	6.05	2.06.	14.06	20.04	27.05	10.06	25.06	49,6	39,2
	КІ1	20.04	6.05	2.06.	15.06	20.04	25.05	10.06	26.06	52,2	40,9
	КІ2	20.04	6.05	2.06.	15.06	20.04	26.05	10.06	26.06	51,4	39,4
	КІ3	20.04	6.05	2.06.	16.06	20.04	25.05	10.06	28.06	52,4	40,9
НСР ₀₅ Фактор А										1,4	1,2
Фактор Б										1,8	1,5

уровня окультуренности почвы начальные фазы онтогенеза наступали раньше на 1 – 3 дня, а заключительные – позже на 2 – 4 дня. Состояние клевера лугового было лучше на хорошо окультуренной почве, а тимopheевки луговой – на высокоокультуренной почве. Эффекты от йодной некорневой подкормки здесь оказались менее выраженными, чем в первом опыте, что вероятно связано с относительно низким уровнем концентрации рабочего раствора КІ в данном опыте.

Погодно-климатические условия 2021 года заметно отличались от предыдущего, что в целом, положительно повлияло на рост и развитие многолетних трав. Самое главное отличие, что острая засуха оказалась

несколько смещена (на 2 – 3 недели позднее) по срокам и затронула практически целиком июнь и июль, а также ей предшествовал начальный период вегетации с практически четырехкратным превышением многолетней нормы осадков в мае. Да и весна 2021 года в целом была более ранней и дружной. По этой причине начало отрастания многолетних трав пришлось уже на 12 апреля, тепловые и водные ресурсы которого оказались очень близкими к средним многолетним показателям (табл. 23). Продолжительность межфазных периодов на фоне более благоприятной для трав погоды оказалась существенно большей, чем в 2020 году. Как следствие этого и общая продолжительность вегетационного периода увеличилась в среднем практически на 2 недели. Естественно, что данный фактор имел принципиальное значение для продукционного процесса многолетних трав.

Средняя по вариантам опыта высота растений тимopheевки луговой и клевера лугового в 2021 году составила 79,9 и 67,3 см против 53,4 и 40,9 см – в 2020 году, т.е. по данному показателю превосходство тимopheевки достигло 49 %, а клевера – 65 %.

Общий характер действия изучаемых факторов, не смотря на существенно отличающиеся погодно-климатические условия, остался прежним. При переходе со среднеокультуренной к хорошо и высокоокультуренной почве продолжительность вегетационного периода обеих культур увеличивалась на 2 – 3 дня, а высота растений тимopheевки и клевера в посеве – на 3,3 – 11,7 и 1,2 – 2,4 см. То есть, на фоне относительно благоприятной влагообеспеченности клевер луговой отзывался на окультуривание агродерново-подзолистой почвы значительно слабее, чем тимopheевка луговая, что объясняется его меньшей требовательностью к почвенным условиям и относительной независимостью от азотного режима почвы. Аналогичный характер действия имела и йодная подкормка в лучших своих вариантах, слабо задерживая развитие культур в заключительной фазе вегетации и повышая высоту растений тимopheевки и клевера в посеве на 2,5 – 3,7 и 1,4 – 2,2 см

Таблица 23 – Влияние окультуренности почвы и КІ на рост и развитие клевера лугового и тимopheевки луговой 2 года пользования

Вариант опыта		Даты наступления фенологических фаз тимopheевки луговой				Даты наступления фенологических фаз клевера лугового				Высота растений к уборке, см	
фактор А (окультур.)	фактор Б (СКІ, %)	весен-нее отраста-ние	куще-ние	выход в трубку	выметы-вание султана	весен-нее отраста-ние	стебле-вание	бутони-зация	нач. цвете-ния	тимо-феевка луговая	клевер луговой
Средняя	Контроль	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	30.06	73,2	66,7
	0,005%	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	30.06	72,5	66,6
	0,01%	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	30.06	73,9	66,9
	0,02%	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	30.06	74,1	67,5
	0,04%	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	01.07	75,4	68,1
	0,08%	12.04	28.04	29.05.	28.06	12.04	16.05	15.06	01.07	75,4	67,8
	0,16%	12.04	28.04	29.05.	30.06	12.04	16.05	15.06	01.07	75,7	67,1
	0,32%	12.04	28.04	29.05.	30.06	12.04	16.05	15.06	01.07	75,2	66,9
	0,64%	12.04	28.04	29.05.	30.06	12.04	16.05	15.06	01.07	74,5	64,3
Хорошая	Контроль	12.04	28.04	28.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	01.07	76,6	69,1
	0,005%	12.04	28.04	28.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	01.07	77,5	69,4
	0,01%	12.04	28.04	28.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	03.07	77,5	69,4
	0,02%	12.04	28.04	28.05.	30.06	12.04	16.05	13.06	03.07	78,2	70,7
	0,04%	12.04	28.04	28.05.	30.06	12.04	16.05	13.06	04.07	79,4	71,2
	0,08%	12.04	28.04	28.05.	30.06	12.04	16.05	13.06	04.07	80,4	70,8
	0,16%	12.04	28.04	28.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	05.07	80,3	71,3
	0,32%	12.04	28.04	28.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	03.07	80,0	69,1
	0,64%	12.04	28.04	28.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	03.07	79,6	68,3
Высокая	Контроль	12.04	28.04	26.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	02.07	84,9	67,9
	0,005%	12.04	28.04	26.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	02.07	84,6	67,9
	0,01%	12.04	28.04	27.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	02.07	85,3	68,4
	0,02%	12.04	28.04	27.05.	30.06	12.04	16.05	13.06	02.07	87,2	68,1
	0,04%	12.04	28.04	27.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	03.07	87,1	69,5
	0,08%	12.04	28.04	28.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	03.07	87,6	70,1
	0,16%	12.04	28.04	28.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	04.07	87,2	69,4
	0,32%	12.04	28.04	28.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	03.07	86,6	68,1
	0,64%	12.04	28.04	28.05.	01.07	12.04	16.05	13.06	03.07	86,4	67,3
НСР ₀₅		Фактор А								2,3	1,9
		Фактор Б								2,7	2,3

В опыте с оценкой эффективности сроков применения некорневой йодной подкормки в посевах многолетних трав 2 года пользования описанные выше закономерности нашли свое дополнительное подтверждение (табл. 24).

Таблица 24 – Влияние окультуренности почвы и времени проведения подкормки КІ на рост и развитие клевера лугового и тимopheевки луговой
2 года пользования

Вариант опыта		Даты наступления фенологических фаз тимopheевки луговой				Даты наступления фенологических фаз клевера лугового				Высота растений к уборке, см	
фактор А (окультур.)	фактор Б (время провед. КІ)	весен-нее отраста-ние	куще-ние	выход в трубку	выметы-вание султана	весен-нее отраста-ние	стебле-вание	бутони-зация	нач. цвете-ния	тимо-феевка луговая	клевер луговой
Средняя	Контроль	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	30.06	73,5	65,8
	КІ1	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	01.07	74,1	67,5
	КІ2	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	30.06	73,4	66,9
	КІ3	12.04	28.04	29.05.	27.06	12.04	16.05	15.06	01.07	75,6	68,5
Хорошая	Контроль	12.04	28.04	28.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	01.07	76,6	69,1
	КІ1	12.04	28.04	28.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	02.07	78,2	70,7
	КІ2	12.04	28.04	28.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	02.07	77,5	69,4
	КІ3	12.04	28.04	28.05.	30.06	12.04	16.05	13.06	03.07	78,8	71,3
Высокая	Контроль	12.04	28.04	26.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	02.07	85,6	67,5
	КІ1	12.04	28.04	26.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	03.07	86,6	68,9
	КІ2	12.04	28.04	27.05.	29.06	12.04	16.05	13.06	02.07	85,9	68,1
	КІ3	12.04	28.04	27.05.	30.06	12.04	16.05	13.06	03.07	87,4	69,2
НСР ₀₅		Фактор А								1,8	1,3
		Фактор Б								2,1	1,6

Особенность влияния сроков некорневой подкормки на биометрические показатели посева многолетних трав в 2021 году, по всей видимости, во многом связана с характером погодных условий. Как и в 2020 году по показателю высоты растений ранний срок проведения подкормки на многолетних травах оказался более эффективным, однако в большинстве вариантов это преимущество выразилось лишь в форме тенденции к положительному действию. Вероятно, это связано с общим дождливым характером погоды во время проведения первой некорневой подкормки. Поэтому вариант с двукратным опрыскиванием посева раствором КІ также имел выраженную тенденцию к положительному действию относительно варианта с ранним сроком подкормки.

3.3.2 Зависимость продуктивности многолетних трав от окультуренности почвы и применения йодистого калия

Многолетние травы в условиях Северо- Западного региона России превосходят другие сельскохозяйственные культуры сочетанием высокого потенциала продуктивности и кормовой ценности с устойчивостью к широкому кругу негативных факторов (Архипов и др., 2015; Иванов и др., 2017; Рекомендации..., 2022).

Таблица 25 – Влияние окультуренности почвы и концентрации раствора КІ на урожайность зеленой массы многолетних трав 1 года пользования

Вариант опыта		Показатели агрономической эффективности						
фактор А (окультур. почвы)	фактор Б (СКИ, %)	Урожай- ность, кг/м ²	прибавка от системы удобрения		прибавка от окультуривания		прибавка от КІ	
			кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
Средняя	Контроль	1,028	-	-	-	-	-	-
	0,005%	1,015	-0,013	-1			-0,013	-1
	0,01%	1,095	0,067	7			0,067	7
	0,02%	1,203	0,175	17			0,175	17
	0,04%	1,229	0,201	20			0,201	20
	0,08%	1,368	0,340	33			0,340	33
	0,16%	1,383	0,355	35			0,355	35
	0,32%	1,222	0,194	19			0,194	19
	0,64%	1,003	-0,025	-2			-0,025	-2
Хорошая	Контроль	1,457	0,429	42	0,429	42	-	-
	0,005%	1,501	0,473	46	0,486	48	0,044	3
	0,01%	1,602	0,574	56	0,507	46	0,145	10
	0,02%	1,688	0,660	64	0,485	40	0,231	16
	0,04%	1,754	0,726	71	0,525	43	0,297	20
	0,08%	1,862	0,834	81	0,494	36	0,405	28
	0,16%	1,833	0,805	78	0,450	33	0,376	26
	0,32%	1,784	0,756	74	0,562	46	0,327	22
	0,64%	1,637	0,609	59	0,634	63	0,180	12
Высокая	Контроль	1,695	0,667	65	0,667	65	-	-
	0,005%	1,667	0,639	62	0,652	64	-0,028	-2
	0,01%	1,764	0,736	72	0,669	61	0,069	4
	0,02%	1,896	0,868	84	0,693	58	0,201	12
	0,04%	1,975	0,947	92	0,746	61	0,280	17
	0,08%	2,113	1,085	106	0,745	54	0,418	25
	0,16%	2,101	1,073	104	0,718	52	0,406	24
	0,32%	2,108	1,080	105	0,886	73	0,413	24
	0,64%	1,894	0,866	84	0,891	89	0,199	12
НСР _{0,05}			0,127		0,084		0,109	

Однако к засухе, этим влаголюбивым культурам адаптироваться сложно, что подтвердили исследования в 2020 г. (табл. 25). Вследствие остро засушливых условий продуктивность многолетних трав оказалась одной из самых низких за все годы исследований в агрофизическом стационаре. При этом за счет существенной разницы в обеспеченности почвенной влагой прибавка продуктивности от ускоренного окультуривания почвы составила 42 и 65 %, а на второй год пользования – 52 и 72 % соответственно (табл. 26). Во многом это стало следствием изменения

Таблица 26 – Влияние окультуренности почвы и концентрации раствора КІ на урожайность зеленой массы многолетних трав 2 года пользования

Вариант опыта		Показатели агрономической эффективности						
фактор А (окультур. почвы)	фактор Б (СКІ, %)	Урожай- ность, кг/м ²	прибавка от системы удобрения		прибавка от окультуривания		прибавка от КІ	
			кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
Средняя	Контроль	1,750	-	-	-	-	-	-
	0,005%	1,779	0,029	2			0,029	2
	0,01%	1,864	0,114	7			0,114	7
	0,02%	2,039	0,289	17			0,289	17
	0,04%	2,142	0,392	22			0,392	22
	0,08%	2,228	0,478	27			0,478	27
	0,16%	2,238	0,488	28			0,488	28
	0,32%	2,007	0,257	15			0,257	15
	0,64%	1,694	-0,056	-3			-0,056	-3
Хорошая	Контроль	2,654	0,904	52	0,904	52	-	-
	0,005%	2,686	0,936	53	0,907	51	0,032	1
	0,01%	2,779	1,029	59	0,915	49	0,125	5
	0,02%	2,951	1,201	69	0,912	45	0,297	11
	0,04%	3,265	1,515	87	1,123	52	0,611	23
	0,08%	3,443	1,693	97	1,215	55	0,789	30
	0,16%	3,480	1,73	99	1,242	55	0,826	31
	0,32%	3,074	1,324	76	1,067	53	0,420	16
	0,64%	2,826	1,076	61	1,132	67	0,172	6
Высокая	Контроль	3,003	1,253	72	1,253	72		
	0,005%	3,029	1,279	73	1,250	70	0,026	1
	0,01%	3,138	1,388	79	1,274	68	0,135	4
	0,02%	3,340	1,59	91	1,301	64	0,337	11
	0,04%	3,377	1,627	93	1,235	58	0,374	12
	0,08%	3,662	1,912	109	1,434	64	0,659	22
	0,16%	3,806	2,056	117	1,568	70	0,803	27
	0,32%	3,455	1,705	97	1,448	72	0,452	15
	0,64%	3,072	1,322	76	1,378	81	0,069	2
НСР _{0,05}			0,178		0,139		0,148	

ботанического состава травостоя. Возделываемый в опыте клевер луговой позднеспелого сортотипа отличает повышенная чувствительность к засухе. Засуха привела к частичной гибели растений клевера и увеличению в составе биомассы доли тимофеевки луговой. Аналогично влияло на состав многолетних трав и окультуривание почвы, которое сильнее повышало конкурентоспособность тимофеевки луговой. В результате, если в 2020 году на средне-, хорошо и высокоокультуренной почвах доля клевера в составе биомассы достигала 76 – 88, 73 – 84 и 69 – 73 % соответственно, то в 2021 году – 69 – 71, 54 – 58 и 40 – 46 % соответственно. Увеличение доли тимофеевки луговой стало одной из главных причин удовлетворительной отзывчивости посева многолетних трав на окультуривание агродерново-подзолистой почвы. В среднем за 2 года исследований на многолетних травах отдача от ускоренного окультуривания почвы до хорошего уровня составила 48 %, а до высокого уровня – 69 %.

Оценка агрономической эффективности испытанных в опыте концентраций рабочего раствора KI показала, что несмотря на существенное отличие погодно-климатических условий, её оптимальный уровень во всех вариантах составил 0,08 %. И лишь на травах второго года хозяйственного использования на фоне высокоокультуренной почвы, когда доля тимофеевки луговой достигла практически 60 %, оптимальная концентрация раствора KI достигла 0,16 %, обеспечив и среднему за 2 года результату положительную тенденцию к эффективному действию (табл. 27). Из этого можно предположить, оптимум концентрации на многолетних травах с доминированием злакового компонента окажется в 1,5 – 2 раза больше, чем при доминировании бобового компонента.

Агрономическая эффективность оптимального дозирования йода (0,08 % KI), выраженная прибавкой урожайности зеленой массы, составила в 1-ый и 2-ой год хозяйственного пользования на среднеокультуренной почве 0,340 и 0,478 кг/м², на хорошо окультуренной – 0,405 и 0,789 кг/м² и на

высокоокультуренной почве – 0,418 – 0,803 кг/м². Т.е. отдача от йода существенно возросла только при переходе от среднеокультуренной почвы к

Таблица 27 – Влияние окультуренности почвы и концентрации раствора KI на урожайность зеленой массы многолетних трав в среднем за 2 года

Вариант опыта		Показатели агрономической эффективности						
фактор А (окультур. почвы)	фактор Б (SKI, %)	Урожай- ность, кг/м ²	прибавка от системы удобрения		прибавка от окультуривания		прибавка от KI	
			кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
Средняя	Контроль	1,389	-	-	-	-	-	-
	0,005%	1,397	0,008	1			0,008	1
	0,01%	1,480	0,091	7			0,091	7
	0,02%	1,621	0,232	17			0,232	17
	0,04%	1,686	0,297	21			0,297	21
	0,08%	1,798	0,409	29			0,409	29
	0,16%	1,811	0,422	30			0,422	30
	0,32%	1,615	0,226	16			0,226	16
	0,64%	1,349	-0,04	-3			-0,04	-3
Хорошая	Контроль	2,056	0,667	48	0,667	48	-	-
	0,005%	2,094	0,705	51	0,697	50	0,038	2
	0,01%	2,191	0,802	58	0,711	48	0,135	7
	0,02%	2,320	0,931	67	0,699	43	0,264	13
	0,04%	2,510	1,121	81	0,824	49	0,454	22
	0,08%	2,653	1,264	91	0,855	48	0,597	29
	0,16%	2,657	1,268	91	0,846	47	0,601	29
	0,32%	2,429	1,04	75	0,814	50	0,373	18
	0,64%	2,232	0,843	61	0,883	65	0,176	9
Высокая	Контроль	2,349	0,96	69	0,960	69	-	-
	0,005%	2,348	0,959	69	0,951	68	-0,001	0
	0,01%	2,451	1,062	76	0,971	66	0,102	4
	0,02%	2,618	1,229	88	0,997	62	0,269	11
	0,04%	2,676	1,287	93	0,990	59	0,327	14
	0,08%	2,888	1,499	108	1,090	61	0,539	23
	0,16%	2,954	1,565	113	1,143	63	0,605	26
	0,32%	2,782	1,393	100	1,167	72	0,433	18
	0,64%	2,483	1,094	79	1,134	84	0,134	6
НСР _{0,05}			0,153		0,112		0,129	

хорошо окультуренной. Кроме того, эффективность йодной подкормки на фоне острой засухи (прибавка урожайности в среднем по оптимальным вариантам 0,388 кг/м² или 29 %) оказалась в 1,8 раза ниже, чем при более благоприятной погоде (0,690 кг/м² или 28 %).

Таблица 28 – Зависимость урожайности многолетних трав от окультуренности почвы и сроков применения некорневой подкормки

Вариант		Показатели агрономической эффективности						
фактор А (окультуренность почвы)	фактор Б (время провед. КИ)	Урожай- ность, кг/м ²	Прибавка урожайности					
			от системы удобрения		от окультурен- ности почвы		от КИ	
			кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
Многолетние травы 1 года пользования								
Средняя	Контроль	0,933	-	-	-	-	-	-
	КИ-1	1,300	0,367	39			0,367	39
	КИ-2	1,567	0,633	68			0,633	68
	КИ-3	1,500	0,567	61			0,567	61
Хорошая	Контроль	1,457	0,524	56	0,524	56	-	-
	КИ-1	1,680	0,747	80	0,447	34	0,223	15
	КИ-2	1,580	0,647	69	0,013	1	0,123	8
	КИ-3	1,750	0,817	88	0,250	17	0,293	20
Высокая	Контроль	1,533	0,600	64	0,600	64	-	-
	КИ-1	1,886	0,953	102	0,586	45	0,353	23
	КИ-2	1,650	0,717	77	0,083	5	0,117	8
	КИ-3	1,817	0,883	95	0,317	21	0,283	18
НСР ₀₅			0,085		0,100		0,126	
Многолетние травы 2 года пользования								
Средняя	Контроль	2,161	-	-	-	-	-	-
	КИ-1	2,694	0,533	25			0,533	25
	КИ-2	2,213	0,052	2			0,052	2
	КИ-3	2,600	0,439	20			0,439	20
Хорошая	Контроль	2,481	0,320	15	0,320	15	-	-
	КИ-1	2,876	0,715	33	0,182	7	0,395	16
	КИ-2	2,716	0,555	26	0,503	23	0,231	9
	КИ-3	2,906	0,745	34	0,306	12	0,425	17
Высокая	Контроль	2,571	0,410	19	0,410	19	-	-
	КИ-1	2,734	0,573	27	0,040	1	0,163	6
	КИ-2	2,684	0,523	24	0,471	21	0,113	4
	КИ-3	2,811	0,650	30	0,211	8	0,240	9
НСР ₀₅			0,065		0,100		0,126	
Многолетние травы в среднем за 2 года								
Средняя	Контроль	1,547	-	-	-	-	-	-
	КИ-1	1,997	0,450	29			0,450	29
	КИ-2	1,890	0,343	22			0,343	22
	КИ-3	2,050	0,503	33			0,503	33
Хорошая	Контроль	1,969	0,422	27	0,422	27	-	-
	КИ-1	2,278	0,731	47	0,281	14	0,309	16
	КИ-2	2,148	0,601	39	0,258	14	0,179	9
	КИ-3	2,328	0,781	50	0,278	14	0,359	18
Высокая	Контроль	2,052	0,505	33	0,505	33	-	-
	КИ-1	2,310	0,763	49	0,313	16	0,258	13
	КИ-2	2,167	0,620	40	0,277	15	0,115	6
	КИ-3	2,314	0,767	50	0,264	13	0,262	13
НСР ₀₅			0,075		0,092		0,108	

Как и в первом микрополевым опыте, в первый год хозяйственного пользования трав в третьем опыте, в силу недостаточности развития растений, урожайность зеленой массы была низкой (табл. 28). Достоверные прибавки урожайности трав были получены во всех почвенно-агрохимических условиях. Наибольшие прибавки от применения йода наблюдались на среднеокультуренной почве, где максимальная прибавка в 2020 г. составила 68 %. Как и другие культуры в опытах концентрации рабочего раствора в 0,32 и 0,64 % обладали определенным токсическим эффектом, чувствительность к которому была выше у клевера лугового.

Анализ ежегодных и средних за два года данных продуктивности многолетних трав показал, что лучшим сроком применения йодной некорневой подкормки на многолетних травах является более ранний, приходящийся на фазу кущения тимopheевки луговой (т.е. через 15-20 дней после начала весеннего отрастания). В среднем по опыту некорневая подкормка 0,02 % раствором KI в эти сроки увеличила урожайность зеленой массы трав на средне-, хорошо и высокоокультуренной почве на 0,450 кг/м² или 29 %, на 0,309 кг/м² или 16 % и на 0,258 кг/м² или 13 %. По мере повышения уровня окультуренности почвы отклик трав на йод несколько снижался.

Высокая эффективность поздней йодной подкормки была зафиксирована только на фоне засухи на среднеокультуренной почве. Во всех остальных вариантах данный срок заметно (в 1,6 раза) уступал по прибавке продуктивности трав (0,212 кг/м²) варианту с ранним сроком ее применения (0,339 кг/м²). Двукратная некорневая подкормка раствором KI, вопреки нашим гипотетическим ожиданиям, дополнительного положительного результата не обеспечила, что пока не находит однозначного объяснения.

Таким образом, оценка агрономической эффективности йодной некорневой подкормки на многолетних травах показала, что многолетние травы, представленные смесью клевера лугового и тимopheевки луговой, на фоне неблагоприятных засушливых погодно-климатических условий

оказываются относительно отзывчивыми на окультуривание агродерново-подзолистой почвы. Уровень прибавки продуктивности многолетних трав от окультуривания до хорошей степени достиг 42 – 52 %, а до высокой степени – 65 – 72 %.

Оптимальная концентрация рабочего раствора KI на многолетних травах достигла значения в 0,08 % и была весьма стабильной во всех изученных в опыте почвенно-агрохимических условиях. И лишь на высокоокультуренной почве лучший результат был получен в варианте с подкормкой 0,16 % раствором KI. Агрономическая эффективность оптимального дозирования йода (0,08 % KI), выраженная прибавкой урожайности зеленой массы, в среднем за 2 года составила на среднеокультуренной почве 0,409 кг/м² (29 %), на хорошо окультуренной – 0,597 кг/м² (29 %) и на высокоокультуренной почве – 0,539 кг/м² (23 %). При этом эффективность йодной подкормки на фоне острой засухи (прибавка урожайности в среднем по оптимальным вариантам (0,388 кг/м² или 29 %) оказалась в 1,8 раза ниже, чем при более благоприятной погоде (0,690 кг/м² или 28 %).

Избыточное дозирование йода (раствора 0,32 и 0,64 %) фитотоксично для клевера лугового.

Оптимальным сроком проведения некорневой подкормки на многолетних травах является начальная фаза вегетации (кущение у тимофеевки луговой и активное отрастание у клевера лугового – через 15-20 дней после начала весеннего отрастания). В среднем по опыту некорневая подкормка 0,02 % раствором KI в эти сроки увеличила урожайность зеленой массы трав на средне-, хорошо и высокоокультуренной почве на 0,450 кг/м² или 29 %, на 0,309 кг/м² или 16 % и на 0,258 кг/м² или 13 %. Данный результат может быть оценен как вполне удовлетворительная агрономическая эффективность йодной некорневой подкормки.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЙОДА НА КАЧЕСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

При поступлении в растение йод проявляет высокую физиологическую активность, облегчая за счет изменения валентности передачу электронов от субстрата к ферменту, ускоряя их синтез и регенерацию, контролируя в определенной мере синтез белков, углеводов и ряда росторегулирующих и иммуномодулирующих компонентов (Кашин, 1987; Osuna et al., 2014; Smoleń et al., 2014, 2015; Golubkina et al., 2018). В условиях, когда определяющей целью регулирования йодного питания растений является обогащение продукции этим элементом, наряду с положительными эффектами аккумуляции йода (Dai et al., 2004; Ранделин и др., 2013; Блинникова, Елисеева, 2015; Синдирева и др., 2016; Котляров, 2017), могут обнаруживаться и определенные негативные последствия, например, в форме накопления нитратов и др.

Исходя из этого, нами акцентировано внимание на основных качественных показателях сельскохозяйственной продукции, определяющих ее питательную или кормовую ценность, уровне накопления в ней йода и нитратов.

4.1 Зависимость основных показателей качества продукции от применения йода в системе удобрения

Для оценки влияния йода на качество клубней картофеля были проведены аналитические исследования по основным качественным показателям (табл. 29). В первом и втором экспериментах, проведенных с целью подбора оптимальных концентраций раствора KI при применении на среднеокультуренной почве, было выявлено, что воздействие йода на качество продукции изменяется в зависимости от почвенно-климатических условий.

Воздействие минеральной системы удобрения на качество клубней

Таблица 29 – Влияние систем удобрения и КІ на качество клубней картофеля

Вариант опыта		Показатели качества клубней по опытам							
фактор А (МСУ)	фактор Б (СКІ, %)	Опыт № 1						Опыт № 2	
		сухое ве- щество, %	крахмал, %	сырой протеин % а.с.в.	N, % а.с.в.	P ₂ O ₅ , % а.с.в.	K ₂ O, % а.с.в.	крахмал, %	витамин С, мг/кг н.в.
NPK0	Контроль	22,5	14,19	1,58	0,25	0,23	2,38	14,36	38,5
	0,005%	22,4	14,01	1,59	0,25	0,22	2,32	-	-
	0,01%	22,8	14,46	1,60	0,26	0,23	2,06	12,65	37,4
	0,02%	24,4	15,09	1,46	0,23	0,20	1,80	13,85	36,8
	0,04%	24,2	16,25	1,43	0,23	0,19	1,84	13,94	37,4
	0,08%	23,2	16,52	1,68	0,27	0,21	1,96	11,88	36,3
	0,16%	23,4	15,80	1,56	0,25	0,20	1,91	-	-
	0,32%	22,8	15,36	1,79	0,29	0,23	2,33	-	-
	0,64%	20,6	13,11	1,74	0,28	0,22	2,06	-	-
NPK1	Контроль	22,0	13,33	1,61	0,26	0,20	2,46	12,57	39,7
	0,005%	22,8	14,37	1,51	0,24	0,19	2,32	-	-
	0,01%	22,3	14,19	1,49	0,24	0,22	2,24	12,65	37,9
	0,02%	22,8	14,37	1,51	0,24	0,20	2,35	11,69	38,6
	0,04%	22,2	14,01	1,70	0,27	0,20	2,32	11,97	41,8
	0,08%	22,8	13,67	1,81	0,29	0,21	2,76	13,59	39,7
	0,16%	21,8	13,47	1,90	0,30	0,23	2,67	-	-
	0,32%	21,0	12,57	2,01	0,32	0,22	2,85	-	-
	0,64%	21,6	12,84	1,76	0,28	0,20	2,80	-	-
NPK2	Контроль	21,4	12,21	1,66	0,27	0,20	2,85	11,54	41,8
	0,005%	21,8	12,91	1,50	0,24	0,19	2,55	-	-
	0,01%	22,6	13,49	1,64	0,26	0,20	2,73	11,29	37,4
	0,02%	23,0	13,74	1,60	0,26	0,19	2,76	10,94	38,5
	0,04%	23,6	14,01	1,79	0,29	0,22	2,79	10,94	39,1
	0,08%	21,4	13,11	1,83	0,29	0,22	2,55	11,63	44,0
	0,16%	20,8	12,93	1,80	0,29	0,19	2,70	-	-
	0,32%	20,2	12,84	1,85	0,30	0,21	2,62	-	-
	0,64%	20,0	11,94	1,85	0,30	0,21	2,88	-	-
НСР ₀₅	Фактор А	0,38	0,35	0,13	0,02	Fф<F ₀₅	0,35	0,53	2,2
	Фактор Б	0,43	0,40	0,14	0,02	Fф<F ₀₅	0,39	0,60	2,5

картофеля носило, в целом, хорошо изученный характер (Иванов, 2001; Ефимов и др., 2002; Иванов и др., 2002; Симоненко, 2009; Иванов и др., 2019б). В частности, под действием полного минерального удобрения в высокой дозе, усиливающего в первую очередь обводненность цитоплазмы клеток и белковый синтез, обнаружилось относительное снижение содержания сухого вещества на 5 %, крахмала – на 14 - 20 % и, напротив, увеличение содержания азота и сырого протеина – на 5 %, витамина С – на 9 % и калия – на 20 %.

Расход углеводов на связывание поступающего в составе удобрений азота увеличивается, поэтому в клубнях часто отмечают снижение содержания крахмала. Установлено, что удобрения в целом снижают содержание крахмала в клубнях картофеля на 0,1-3,3% (Симоненко, 2009). Уровень накопления фосфора в клубнях соответствовал очень высокой обеспеченности почвы подвижными соединениями этого элемента, был стабильным и не зависел от изучаемых систем удобрения. Накопление же калия, в клубнях определялось не столько уровнем его применения в составе основного удобрения, сколько эффектом биологического разбавления, вследствие существенного увеличения урожайности клубней в удобренных вариантах.

На этом фоне, влияние йодной некорневой подкормки на качество клубней оказалось неожиданно значительным. В первом опыте с широким диапазоном дозировок йода обнаружили разнонаправленные эффекты. Во-первых, под действием растворов малых концентраций (до 0,02 – 0,04 %) обнаружилось определенное разбавление азота и калия (в NPK0), что привело к снижению накопления сырого протеина в вариантах с оптимальными дозировками йода (0,04 % - NPK0, 0,02 % - NPK2 и NPK3) на 4 – 10 % и увеличению содержания в клубнях картофеля сухого вещества на 4 – 8 % и крахмала – на 8 – 15 %. Во-вторых, дальнейшее повышение дозировок йода до максимальных значений вело к последовательному достоверному усилению накопления азотистых веществ и сокращению содержания сухого вещества и крахмала.

Во втором опыте данные крахмалистости клубней не подтвердили существенную положительную роль некорневых йодных подкормок в его накоплении. Здесь эффект в отдельных вариантах оказался весьма неустойчивым. В клубнях картофеля происходит как синтез, так и распад крахмала под воздействием ферментов. Ферменты, разрушающие крахмал, можно разделить на две категории — гидролитические (α - и β -амилазы) и фосфоролитические (α -гликан-фосфорилазы) (Сергеева и др., 2022). Ранее было установлено, что применение йода повышало активность амилазы и

тирозиндекарбоксидазы в листьях картофеля (Важенин, Белякова, 1952), что способствует гидролизу крахмала.

В данном эксперименте, также не подтвердилась и наша гипотеза о вероятной положительной роли йода в синтезе и накоплении витамина С в клубнях картофеля.

В третьем микрополевым эксперименте по поиску оптимальной кратности некорневых подкормок картофеля йодом, были зафиксированы отмеченные ранее закономерности и ряд новых тенденций (табл. 30). В их числе такие эффекты как:

- положительная роль ускоренного окультуривания агродерново-подзолистой почвы в обогащении клубней картофеля основными макроэлементами (до 10 % по N, до 15 % - по P_2O_5 и до 20 % - по K_2O) и сырым протеином и отрицательная – в накоплении крахмала (до 6 %);

- снижение содержания сухого вещества и крахмала в клубнях картофеля по мере оптимизации почвенно-агрохимических условий под действием полного минерального удобрения на 5 – 14 и 5 – 18 % (отн.) соответственно, а также повышение обеспеченности клубней фосфором и калием (на 15 – 25 %);

- йодная некорневая подкормка в данном опыте также оказала разнонаправленное действие. В однократном варианте она слабо ингибировала накопление азотистых веществ и стимулировала, особенно, на улучшенном почвенно-агрохимическом фоне на 5 % - крахмала (13,1 % против 12,5 % в контроле) и сухого вещества (22,1 % против 21,1 % в контроле). На зольный состав клубней при этом влияла слабо;

- с повышением кратности подкормок до двух и трех содержание сухого вещества в клубнях продолжило расти (до 22,5 и 23,4 % абс.,) на 7-16 %, а крахмалистость клубней, напротив, снижаться (до 12,2 и 11,8 % абс.) на 2-5 % относительно контроля:

- влияние частоты йодной подкормки на накопление азота, фосфора и сырого протеина не имело системного характера, тогда как уровень

Таблица 30 – Влияние окультуренности почвы, системы удобрения и КІ на качество клубней картофеля

Вариант опыта			Показатели качества клубней					
фактор А (окультуре нность почвы)	фактор Б (МСУ)	фактор В (кратность подкормок 0,02 % КІ)	сухое ве- щество, %	крахмал, %	сырой протеин % а.с.в.	N, % а.с.в.	P ₂ O ₅ , % а.с.в.	K ₂ O, % а.с.в.
Средняя	NPK0	Контроль	21,8	14,19	1,78	0,29	0,20	1,81
		КІ1	22,0	13,56	1,80	0,29	0,21	1,71
		КІ2	21,0	12,75	2,13	0,34	0,17	2,32
		КІ3	22,6	12,23	1,84	0,30	0,19	2,53
	NPK1	Контроль	20,2	14,02	1,75	0,28	0,18	2,03
		КІ1	22,4	13,83	1,94	0,31	0,18	2,01
		КІ2	22,2	13,56	2,03	0,33	0,16	2,75
		КІ3	24,8	12,30	2,30	0,37	0,20	3,14
	NPK2	Контроль	20,8	12,65	2,14	0,34	0,20	2,30
		К1	22,4	13,38	2,30	0,37	0,21	2,74
		КІ2	22,2	12,57	2,27	0,36	0,19	3,36
		КІ3	24,2	11,67	2,30	0,37	0,20	3,25
Хорошая	NPK0	Контроль	23,4	14,28	1,69	0,27	0,21	1,92
		КІ1	24,4	14,82	1,70	0,27	0,21	2,18
		КІ2	25,6	12,39	1,92	0,31	0,20	3,04
		КІ3	25,2	12,57	1,70	0,27	0,19	2,86
	NPK1	Контроль	22,4	11,78	2,53	0,41	0,23	2,54
		КІ1	19,6	12,21	2,47	0,40	0,22	2,50
		КІ2	23,8	12,01	2,33	0,37	0,21	3,41
		КІ3	23,4	11,49	1,98	0,32	0,19	2,90
	NPK2	Контроль	20,2	11,67	2,83	0,45	0,30	2,73
		КІ1	24,2	12,57	2,33	0,37	0,25	2,37
		КІ2	23,2	11,55	2,22	0,36	0,22	3,06
		КІ3	25,8	11,44	2,52	0,40	0,26	3,40
Высокая	NPK0	Контроль	21,4	13,29	1,97	0,32	0,23	2,27
		КІ1	22,4	14,37	1,98	0,32	0,23	2,40
		КІ2	22,0	12,30	2,16	0,35	0,22	3,39
		КІ3	22,8	12,45	2,05	0,33	0,24	3,07
	NPK1	Контроль	20,6	10,42	2,55	0,41	0,23	3,29
		КІ1	20,9	12,58	2,34	0,38	0,26	2,71
		КІ2	22,8	12,19	2,27	0,36	0,28	3,42
		К3	21,2	12,48	2,39	0,38	0,28	3,42
	NPK2	Контроль	19,4	9,88	2,91	0,47	0,33	2,85
		КІ1	20,6	10,93	2,64	0,42	0,30	3,56
		КІ2	20,0	10,51	2,75	0,44	0,32	3,66
		КІ3	20,6	9,34	2,66	0,43	0,30	3,56
НСР ₀₅		Фактор А	0,29	0,23	0,19	0,03	Fφ<F ₀₅	0,28
		Фактор Б	0,37	0,29	0,25	0,04	Fφ<F ₀₅	0,33
		Фактор В	0,51	0,40	0,38	0,06	Fφ<F ₀₅	0,42

содержания калия в клубнях существенно (на 29-30 %) увеличивался с повышением кратности обработок: с 2,42 и 2,46 в контроле и КІ1 до 3,15 и 3,12

% - в вариантах КІ2 и КІ3. Вполне вероятно, что подобный эффект мог быть связан с наличием в составе подкормочного раствора значительного количества калия.

Характер влияния изученных систем удобрения на качество сырья для приготовления кормов из однолетних и многолетних трав имел много общего с картофелем (табл. 31). В условиях засухи эффект даже от полного

Таблица 31 – Влияние системы удобрения и КІ на качество зеленой массы однолетних трав

Вариант опыта		Показатели качества зеленой массы						
фактор А (МСУ)	фактор Б (СКІ, %)	сухое ве- щество, %	сырой протеин % а.с.в.	сырая клетчатка, % а.с.в.	сырая зола, % а.с.в.	N, % а.с.в.	P ₂ O ₅ , % а.с.в.	K ₂ O, % а.с.в.
NPK0	Контроль	27,4	17,75	22,5	4,22	2,52	0,29	2,08
	0,005%	27,4	16,44	23,6	4,40	2,47	0,30	2,11
	0,01%	27,1	16,38	23,1	3,74	2,62	0,28	2,05
	0,02%	27,2	16,81	22,8	4,38	2,69	0,30	2,13
	0,04%	26,8	17,56	22,2	4,40	2,81	0,30	2,20
	0,08%	26,9	17,81	21,4	4,69	2,85	0,31	2,22
	0,16%	27,1	17,63	21,6	4,51	2,82	0,31	2,06
	0,32%	28,3	18,25	23,9	4,80	2,44	0,28	2,04
	0,64%	30,3	14,88	24,7	4,52	2,38	0,28	1,96
NPK1	Контроль	27,9	16,94	22,8	4,80	2,55	0,31	2,12
	0,005%	28,1	16,13	22,3	4,55	2,58	0,31	2,23
	0,01%	27,7	16,81	22,2	4,99	2,69	0,30	2,23
	0,02%	27,5	17,25	21,8	4,91	2,76	0,32	2,15
	0,04%	27,5	18,00	21,1	4,60	2,88	0,32	2,16
	0,08%	27,4	18,19	21,3	5,24	2,91	0,31	2,28
	0,16%	27,2	18,38	21,9	5,65	2,94	0,30	2,19
	0,32%	27,4	18,00	22,1	4,83	2,72	0,29	2,09
	0,64%	29,8	16,13	22,5	5,05	2,58	0,30	2,12
NPK2	Контроль	28,2	15,25	24,9	5,67	2,28	0,33	2,48
	0,005%	27,8	15,16	24,5	5,12	2,33	0,32	2,42
	0,01%	27,6	15,20	23,8	5,64	2,40	0,31	2,40
	0,02%	27,6	15,81	23,8	4,99	2,53	0,32	2,44
	0,04%	27,3	16,38	23,3	5,29	2,62	0,32	2,53
	0,08%	27,4	16,63	23,6	5,29	2,66	0,32	2,41
	0,16%	27,1	17,06	23,4	4,35	2,73	0,30	2,37
	0,32%	27,5	18,38	23,5	5,20	2,70	0,30	2,30
	0,64%	27,8	15,66	24,7	4,94	2,41	0,29	2,15
НСР ₀₅	Фактор А	0,31	0,51	0,94	0,23	0,04	F _ф <F ₀₅	0,31
	Фактор Б	0,34	0,55	1,03	0,27	0,05	F _ф <F ₀₅	0,36

минерального удобрения оказался подавленным. Оно не оказало заметного влияния на содержание сухого вещества в зеленой массе однолетних трав и ее обеспеченность фосфором. За счет сокращения доли вики в составе биомассы на высокоокультуренной почве уровень накопления в ней азота и сырого протеина снизился, а сырой клетчатки, напротив, увеличился на 6 % (отн.). Достоверный же положительный эффект основного минерального удобрения варианта NPK2 был зафиксирован в накоплении сырой золы и калия на 34 и 25 % соответственно.

Некорневая подкормка растворами KI с повышением их концентрации до уровня 0,08-0,16 % усиливала накопление сырого протеина и ограничивала – сырой клетчатки, что очень ценно с позиций кормовой питательности данного зеленого корма. В оптимальных по дозировкам вариантах (0,16 % - NPK0, 0,16 % - NPK2 и 0,08 % - NPK3) относительный прирост содержания сырого протеина составил 3 – 7 %, а снижения сырой клетчатки – 4 – 8 %.

В третьем микрополевым опыте по отработке сроков применения некорневой йодной подкормки был подтвержден разносторонний характер действия ускоренного окультуривания, минеральной системы удобрения и йода на качество кормового сырья (табл. 32). Ожидаемое усиление накопления сырого протеина по мере оптимизации почвенно-агрохимических условий и повышения доз азотных удобрений в опыте резко нивелировалось трансформацией ботанического состава посева в пользу овса посевного, что привело даже к обратному от желаемого эффекту – некоторому сокращению содержания сырого протеина. Увеличение доли овса способствовало и повышению содержания сухого вещества в биомассе на 0,5-3,9 % (абс.) или 2 – 14 % (отн.). При этом их положительное влияние на накопление зольных веществ и, в частности, калия было вполне однозначным и достоверным. Окультурирование почвы до хорошего и высокого уровня привело к увеличению содержания сырой золы на 11 и 39 %, калия – на 19 и 37 % соответственно. Применение полного минерального удобрения в среднем по вариантам влияло слабее, но увеличило данные показатели на 7 – 14 % и 2 – 11 % соответственно.

Таблица 32 – Влияние окультуренности почвы, системы удобрения и КІ на качество зеленой массы однолетних трав

Вариант опыта			Показатели качества клубней						
фактор А (окультуре нность почвы)	фактор Б (МС0У)	фактор В (срок подкормки 0,02 % КI)	сухое ве- щество, %	сырой протеин % а.с.в.	сырая клетчатка, % а.с.в.	сырая зола, % а.с.в.	N, % а.с.в.	P ₂ O ₅ , % а.с.в.	K ₂ O, % а.с.в.
Средняя	NPK0	Контроль	27,6	15,25	23,3	4,22	2,44	0,29	2,08
		KI1	26,9	15,35	22,6	4,15	2,46	0,29	2,05
		KI2	27,1	14,02	24,2	4,38	2,24	0,31	2,01
		KI3	27,5	14,10	24,5	4,41	2,26	0,30	2,10
	NPK1	Контроль	28,1	15,94	24,4	4,80	2,55	0,31	2,12
		KI1	27,9	16,06	23,7	4,88	2,57	0,32	2,15
		KI2	27,5	15,21	24,5	4,94	2,43	0,29	2,05
		KI3	27,3	16,20	26,0	4,97	2,59	0,29	2,29
	NPK2	Контроль	28,2	17,25	25,2	5,67	2,76	0,33	2,48
		K1	27,5	17,11	25,5	5,79	2,74	0,32	2,40
		KI2	27,4	15,02	26,0	6,20	2,40	0,33	2,41
		KI3	27,7	16,95	25,6	6,13	2,71	0,31	2,52
Хорошая	NPK0	Контроль	29,4	17,02	26,1	4,67	2,72	0,33	2,57
		KI1	29,0	17,20	25,7	4,69	2,75	0,30	2,59
		KI2	28,8	17,25	26,3	5,11	2,76	0,33	2,62
		KI3	28,6	17,28	25,9	5,07	2,76	0,32	2,74
	NPK1	Контроль	30,8	16,85	25,6	4,81	2,70	0,31	2,66
		KI1	29,4	16,64	26,1	4,95	2,66	0,31	2,58
		KI2	28,7	17,13	26,8	5,20	2,74	0,31	2,54
		KI3	28,5	16,88	25,1	5,32	2,70	0,33	2,77
	NPK2	Контроль	31,5	16,55	25,5	4,95	2,65	0,33	2,75
		KI1	31,1	16,57	25,8	5,10	2,65	0,32	2,78
		KI2	29,5	16,78	25,0	5,31	2,68	0,32	2,69
		KI3	28,9	16,53	25,8	5,28	2,64	0,33	2,88
Высокая	NPK0	Контроль	31,5	16,78	25,0	5,87	2,68	0,32	2,85
		KI1	31,0	16,54	25,2	6,01	2,65	0,31	2,75
		KI2	30,4	16,67	25,6	6,32	2,67	0,33	2,79
		KI3	30,3	16,60	25,5	6,10	2,66	0,32	2,84
	NPK1	Контроль	32,8	16,50	25,0	6,04	2,64	0,33	2,83
		KI1	32,0	16,65	24,7	6,01	2,66	0,31	2,85
		KI2	31,3	16,71	24,8	6,23	2,67	0,31	2,88
		K3	31,0	16,31	25,4	6,13	2,61	0,32	2,97
	NPK2	Контроль	34,4	16,52	24,1	6,15	2,64	0,34	3,11
		KI1	34,0	16,29	24,8	6,03	2,61	0,34	3,03
		KI2	33,1	16,73	24,5	6,35	2,68	0,32	3,10
		KI3	32,8	15,91	25,6	6,36	2,55	0,32	3,15
НСР ₀₅		Фактор А	0,32	0,24	0,61	0,05	0,10	Fφ<F ₀₅	0,12
		Фактор Б	0,41	0,31	0,79	0,07	0,13	Fφ<F ₀₅	0,15
		Фактор В	0,58	0,43	1,11	0,10	0,17	Fφ<F ₀₅	0,22

Сроки проведения йодной некорневой подкормки влияли на состав зеленой массы по-разному: ранний срок – в целом весьма слабо и практически недостоверно. У позднего срока внесения также оказалось весьма мало значимых эффектов. Однако к последним можно отнести положительное влияние на накопление сырой золы (на 6 % отн.) и отрицательное (в форме тенденции снижения на 0,37 % абс.) – на содержание сырого протеина. Негативный характер действия йодной подкормки в данном опыте может быть объяснен двумя причинами: недостаточным (далеким от оптимального значения) уровнем дозировки йода и доминированием на таком фоне т.н. эффекта биологического разбавления, при котором общая интенсификация продукционного процесса не позволяла существенно видоизменять и биохимический состав растений. К сожалению, эта же закономерность проявилась и в отношении биохимического состава зеленой надземной массы многолетних трав в этом же опыте.

На многолетних травах, активный продукционный процесс которых пришелся также на остро засушливые условия в 2020 году и засушливые после избыточного увлажнения в 2021 году более значимые эффекты также были связаны с действием почвенно-агрохимической дифференциации в связи с разным уровнем окультуренности почвы. И здесь эти эффекты зачастую носили противоположный от ожидаемого характер, так как повышение окультуренности почвы увеличивало в составе травостоя конкурентность и долю тимopheевки луговой, что негативно сказывалось на уровне накопления азота, сырого протеина (табл. 33). И лишь содержание зольных элементов теснее коррелировало с почвенным плодородием, чем с ботаническим составом травостоя. В результате под действием ускоренного окультуривания почвы в зеленой массе многолетних трав снизилось содержание азота и сырого протеина на 9 %, а сырой клетчатки и сырой золы – увеличилось на 6 и 24 % соответственно. При этом на фоне быстрой утраты почвой подвижных соединений калия, уровень его накопления в зеленой массе на почвах разной окультуренности оказался практически одинаковым.

Таблица 33 – Влияние окультуренности почвы и СКІ на качество зеленой массы многолетних трав (в среднем за 2 года)

Вариант опыта		Показатели качества зеленой массы						
фактор А окультур. почвы	фактор Б (СКІ, %)	сухое ве- щество, %	сырой протеин % а.с.в.	сырая клетчатка, % а.с.в.	сырая зола, % а.с.в.	N, % а.с.в.	P ₂ O ₅ , % а.с.в.	K ₂ O, % а.с.в.
Средняя	Контроль	22,7	16,75	23,5	4,89	2,68	0,37	1,49
	0,005%	22,8	16,44	23,6	4,95	2,63	0,36	1,52
	0,01%	22,6	17,38	23,1	4,94	2,78	0,37	1,43
	0,02%	22,2	17,81	22,7	5,03	2,85	0,35	1,41
	0,04%	21,7	18,56	22,2	5,11	2,97	0,35	1,38
	0,08%	21,4	18,81	21,4	5,15	3,01	0,34	1,35
	0,16%	21,5	18,63	21,6	5,14	2,98	0,36	1,52
	0,32%	22,9	16,25	23,9	5,03	2,60	0,36	1,64
	0,64%	25,8	15,88	24,7	5,01	2,54	0,38	1,77
Хорошая	Контроль	23,3	16,94	22,8	5,12	2,71	0,38	1,64
	0,005%	23,3	17,13	22,3	5,2	2,74	0,36	1,58
	0,01%	22,5	17,81	22,2	5,22	2,85	0,38	1,58
	0,02%	21,8	18,25	21,8	5,31	2,92	0,37	1,59
	0,04%	21,8	19,00	21,1	5,32	3,04	0,35	1,51
	0,08%	21,4	19,19	21,3	5,36	3,07	0,38	1,60
	0,16%	21,7	19,38	21,9	5,31	3,10	0,39	1,77
	0,32%	23,5	18,00	22,1	5,05	2,88	0,39	1,79
	0,64%	24,4	17,13	22,5	4,91	2,74	0,38	1,99
Высокая	Контроль	23,3	15,25	24,9	6,04	2,44	0,41	1,46
	0,005%	22,9	15,56	24,5	5,98	2,49	0,39	1,52
	0,01%	22,4	16,00	23,8	6,12	2,56	0,38	1,43
	0,02%	22,2	16,81	23,8	6,16	2,69	0,40	1,40
	0,04%	21,6	17,38	23,3	6,15	2,78	0,38	1,42
	0,08%	21,1	17,63	23,6	6,14	2,82	0,39	1,38
	0,16%	21,0	18,06	23,4	6,08	2,89	0,40	1,51
	0,32%	23,3	17,88	23,5	6,13	2,86	0,41	1,64
	0,64%	24,7	16,06	24,7	5,22	2,57	0,42	1,81
НСР ₀₅	Фактор А	0,42	0,31	0,38	0,21	0,05	Fф<F ₀₅	0,27
	Фактор Б	0,55	0,35	0,42	0,24	0,06	Fф<F ₀₅	0,31

Характер действия некорневой подкормки многолетних трав растворами КІ различной концентрации имел сходие с ранее установленными на однолетних травах закономерностями черты. Повышение концентрации раствора йодистого калия вплоть до оптимального значения (0,08 % - для среднеокультуренной, 0,08 % - для хорошо окультуренной и 0,16 % - для высокоокультуренной почвы) на фоне удлинения вегетационного периода вызвало снижение содержания сухого вещества в зеленой массе на 6 – 10 %,

сырой клетчатки – на 6 – 9 % и, напротив, увеличило - азота и сырого протеина – на 12 – 18 %, сырой золы – на 13 – 18 %. Существенного влияния на содержание фосфора обнаружено не было, так как уровень его накопления соответствовал высокой обеспеченности почвы этим элементом. Содержание по мере увеличения продуктивности трав подчинялось эффекту разбавления, а с уровня оптимальных йодных дозировок увеличивалось под действием калийного компонента подкормочного раствора.

Эффект биологического разбавления в опыте со сроками применения йодной подкормки в силу низкой концентрации рабочего раствора (0,02 %) был еще более выражен (табл. 34). Здесь в первую очередь, следует отметить, что отличие погодно-климатических условий острая жаркая засуха в 2020 году, и не критическая с нормальным приходом тепла в 2021 году оказали влияние на состав зеленой массы многолетних трав. При жаркой погоде были более благоприятные условия для синтеза белков, расходования углеводов, поглощения азота и калия. В среднем по вариантам содержание сырого протеина в зеленой массе в 2020 и 2021 годах составило 17,1 и 16,6 %, сухого вещества – 23,4 и 21,6 %, сырой клетчатки 24,8 и 26,3 %, сырой золы 4,14 и 4,73 % соответственно.

Влияние эффективного плодородия почвы, выраженного уровнем ее окультуренности, носило закономерный характер, predetermined изменением ботанического состава в форме сокращения доли клевера лугового на высокоокультуренной почве. Следствием это стало снижение содержания сырого протеина на 8 %, увеличение содержания сырой клетчатки – на 5 %, сырой золы – на 15 %.

В среднем по вариантам опыта изученные сроки применения некорневой подкормки в форме 0,02 % раствора KI показали весьма близкую результативность. При этом вопреки гипотетическим ожиданиям двукратное опрыскивание посева не обеспечило достоверного улучшения качества сырья для производства кормов. В силу недостаточной концентрации рабочего раствора достоверные эффекты в среднем по фактору «срок применения»

Таблица 34 – Влияние окультуренности почвы и КІ на качество зеленой массы многолетних трав

Вариант опыта			Показатели качества клубней					
фактор А (окультуренность почвы)	фактор В (срок подкормки 0,02 % КІ)	сухое ве- щество, %	сырой протеин % а.с.в.	сырая клетчатка, % а.с.в.	сырая зола, % а.с.в.	N, % а.с.в.	P ₂ O ₅ , % а.с.в.	K ₂ O, % а.с.в.
Многолетние травы 1 года пользования								
Средняя	Контроль	23,1	17,31	24,0	3,83	2,77	0,41	1,68
	КІ1	22,4	17,38	25,4	3,38	2,78	0,34	1,33
	КІ2	22,7	16,19	24,1	3,66	2,59	0,36	1,24
	КІ3	22,1	17,63	24,5	4,43	2,82	0,38	1,28
Хорошая	Контроль	24,5	16,88	27,2	4,11	2,70	0,36	1,51
	КІ1	23,3	17,44	24,7	3,59	2,79	0,38	1,60
	КІ2	23,9	17,56	25,2	4,33	2,81	0,36	1,33
	КІ3	23,5	16,88	23,9	4,48	2,70	0,38	1,44
Высокая	Контроль	24,9	15,38	26,1	4,38	2,46	0,36	1,30
	КІ1	23,1	16,79	25,3	3,92	2,69	0,36	1,45
	КІ2	23,8	16,06	24,2	4,09	2,57	0,36	1,38
	КІ3	23,3	17,25	24,0	4,49	2,76	0,36	1,43
Многолетние травы 2 года пользования								
Средняя	Контроль	22,6	16,44	26,0	4,27	2,63	0,36	1,18
	КІ1	21,4	17,31	25,8	4,55	2,77	0,36	1,20
	КІ2	20,8	18,00	26,8	5,58	2,88	0,43	1,40
	КІ3	21,5	16,75	26,7	4,47	2,68	0,38	1,15
Хорошая	Контроль	22,8	17,63	26,6	4,91	2,82	0,41	1,28
	КІ1	21,2	18,00	27,0	4,75	2,88	0,41	1,37
	КІ2	21,4	17,50	26,8	4,75	2,80	0,45	1,24
	КІ3	20,8	17,56	26,5	5,01	2,81	0,41	1,24
Высокая	Контроль	22,0	15,75	26,6	4,85	2,52	0,43	1,38
	КІ1	21,5	16,75	25,3	4,63	2,68	0,41	1,12
	КІ2	22,2	15,88	26,5	4,42	2,54	0,36	1,09
	КІ3	21,4	17,83	25,7	4,61	2,85	0,43	1,18
Многолетние травы								
Средняя	Контроль	22,9	16,88	25,0	4,05	2,70	0,39	1,43
	КІ1	21,9	17,35	25,6	3,97	2,78	0,35	1,27
	КІ2	21,8	17,10	25,5	4,62	2,74	0,40	1,32
	КІ3	21,8	17,19	25,6	4,45	2,75	0,38	1,22
Хорошая	Контроль	23,7	17,26	26,9	4,51	2,76	0,39	1,40
	КІ1	22,3	17,72	25,9	4,17	2,84	0,40	1,49
	КІ2	22,7	17,53	26,0	4,54	2,81	0,41	1,29
	КІ3	22,2	17,22	25,2	4,75	2,76	0,40	1,34
Высокая	Контроль	23,5	15,57	26,3	4,62	2,49	0,40	1,34
	КІ1	22,3	16,77	25,3	4,28	2,69	0,39	1,29
	КІ2	23,0	15,97	25,3	4,26	2,56	0,36	1,24
	КІ3	22,4	17,54	24,9	4,55	2,81	0,40	1,31
НСР ₀₅	Фактор А	0,39	0,25	0,20	0,42	0,04	Fф<F ₀₅	0,22
	Фактор Б	0,48	0,33	0,26	0,54	0,05	Fф<F ₀₅	0,29

йодной подкормки» были получены только на двух показателях качества продукции: содержании сухого вещества при раннем сроке внесения (снизилось на 4 % отн.) и содержании сырого протеина, которое повысилось также на 4 % отн.

Таким образом, в ходе исследования было установлено, что окультуривание агродерново-подзолистой почвы, основное полное минеральное удобрение и некорневая йодная подкормка оказывают многостороннее действие на основные качественные показатели продукции полеводства. Их влияние на отдельные показатели может носить как положительный, так и негативный характер, связанный с усилением одних синтетических процессов в ущерб другим, а также с видоизменением ботанического состава кормовых трав под действием улучшения азотного питания при внесении минеральных удобрений и окультуривании почвы.

Применение некорневой йодной подкормки в оптимальных дозировках привело: на картофеле к снижению содержания в клубнях сырого протеина на 4 – 10 % и увеличению – сухого вещества на 4 – 8 % и крахмала – на 8 – 15 %; на однолетних травах – к увеличению содержания сырого протеина на 3 – 7 %, а снижению сырой клетчатки – на 4 – 8 %; на многолетних травах - снижение содержания сухого вещества в зеленой массе на 6 – 10 %, сырой клетчатки – на 6 – 9 % и увеличило - азота и сырого протеина – на 12 – 18 %, сырой золы – на 13 – 18 %. Повышение кратности йодных обработок вело к некоторому снижению крахмалистости клубней, а на состав зеленой массы трав влияло весьма слабо.

4.2 Влияние систем удобрения с использованием KI на накопление йода в продукции

Применение йодных микроудобрений в условиях геохимической аномалии его недостатка, безусловно, главной своей целью имеет биообогащение товарной продукции и кормов этим важнейшим

микроэлементом. Целый ряд исследований у нас в стране и за рубежом показал обоснованность таких ожиданий (Dai et al., 2004; Ранделин и др., 2013; Блинникова, Елисеева, 2015; Синдирева и др., 2016; Котляров, 2017).

Закладка и проведение серии полевых экспериментов с охватом широкого диапазона современных почвенно-агрохимических условий Северо-Западного региона не только подтвердила гипотетические ожидания, но и позволила установить ряд своеобразных закономерностей. Независимо от уровня удобренности почвы содержание йода в сухом веществе картофельных клубней было очень низким 168 – 178 мкг/кг (рис. 9).

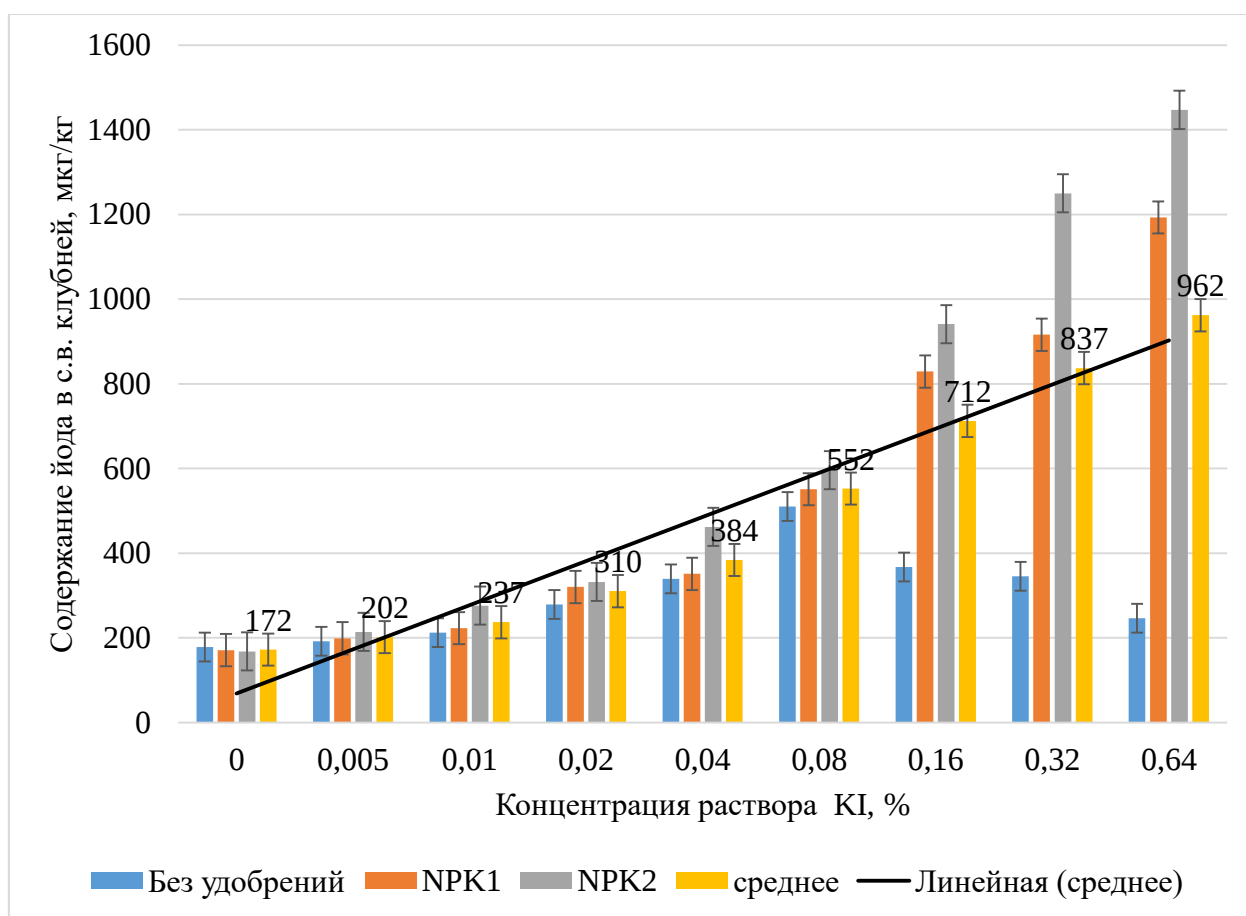


Рисунок 9 – Зависимость содержания йода в клубнях картофеля от применения удобрений (фактор А) и концентрации раствора KI (фактор Б)
(НСР₀₅: фактор А – 25, фактор Б – 36, взаимодействие АБ – 64 мкг/кг)

Достоверное повышение его содержания обнаружилось только с концентрации раствора в 0,02 %. При установленном в опыте оптимальном дозировании в 0,02 – 0,04 % KI содержание йода удалось повысить в среднем

до 310 – 384 мкг/кг, т.е. на 80 – 123 %. При этом видно, по мере роста концентрации рабочего раствора содержание йода в клубнях продолжало практически линейно расти.

Без применения удобрений концентрация йода в клубнях 550 мкг/кг стала предельной, после чего растения начали испытывать токсикоз и ограничили усвоение йода. Предельный же уровень накопления микроэлемента в клубнях на фоне средней и повышенной доз полного минерального удобрения достиг 1193 и 1447 мкг/кг. При этом средний по вариантам удобренности почвы потенциал аккумуляции йода в клубнях составил в контроле 296, NPK1 – 528 и NPK2 – 632 мкг/кг (в среднем 485 мкг/кг). Причина такой разницы, вероятно, связана с необходимостью интенсивного азотного питания для успешного освоения избытка йода.

При оценке влияния йодных микроудобрений на содержание йода в продукции необходимо учитывать погодные условия, где наиболее значимым фактором становятся осадки в момент и после некорневой обработки KI.

Так, в 2018 году обработка йодистым калием проводилась 9 июля. С 9 по 19 июля осадков не выпадало. Первые осадки после обработки выпали 20 июля (1,5 мм) и 21 июля (53,3 мм). Это способствовало аккумуляции йода растениями, что и продемонстрировал рис. 9. Обработка в 2022 году проводилась 13 июля. С 13 по 18 июля каждый день выпадали осадки, что составили суммарно 35,9 мм. В результате эффективность йодной некорневой подкормки оказалась намного ниже (рис. 10).

Была отмечена роль окультуренности почвы в накоплении йода клубнями картофеля. Так, обнаружилась достоверная разница в содержании йода в клубнях картофеля, выращенного на среднеокультуренной (среднее значение составило 230 мкг/кг) и на высокоокультуренной (100 мкг/кг) почвах. Хорошо окультуренная почва в этом ряду заняла промежуточное положение (190 мкг/кг). Минеральные удобрения (вариант NPK2) способствовали меньшей аккумуляции йода в клубнях картофеля по

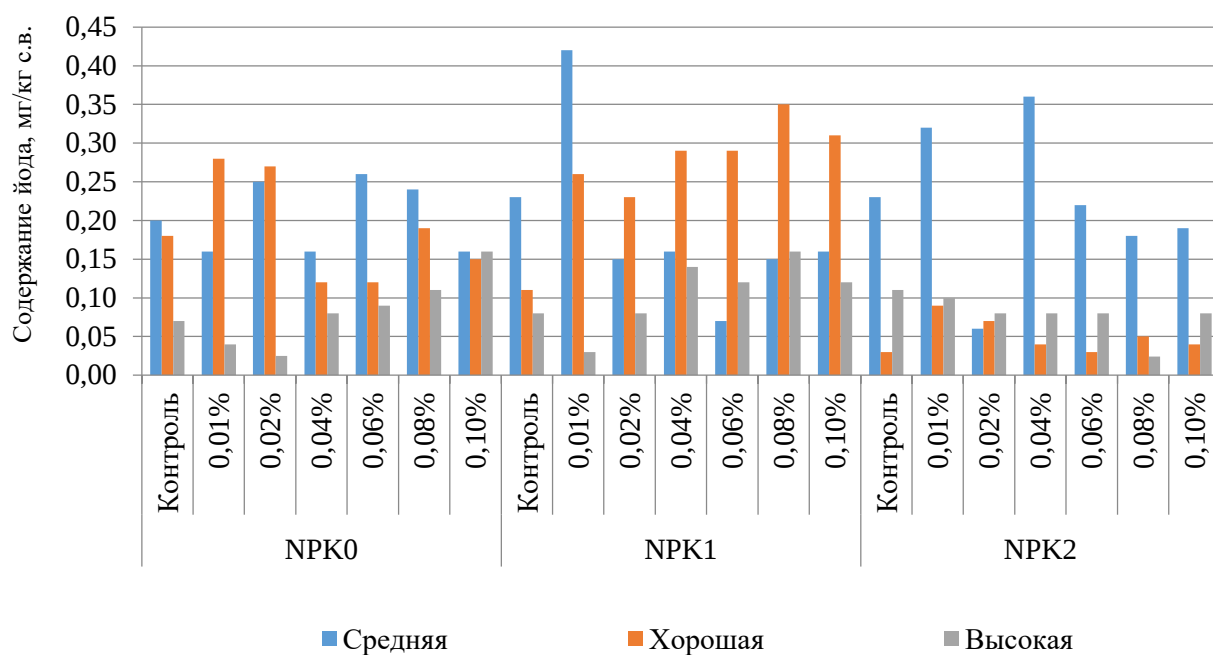


Рисунок 10 - Зависимость накопления йода в массе клубней картофеля от системы удобрения (опыт № 2 - 2022 г.)

сравнению с другими вариантами системы удобрения, продемонстрировали эффект биологического разбавления.

По схеме опыта при проведении статистического анализа было выделено 2 области значений, которые позволяют сделать вывод о значимости фактора окультуривания в накоплении йода клубнями картофеля. Первая область – варианты на менее окультуренных почвах – выделяется повышенным содержанием йода вне зависимости от обработок. Среднее значение составляет 0,239 мг/кг и дисперсия выборки равна 0,02. В то время как вторая область, связанная с вариантами на более окультуренных почвах, дает среднее значение содержания йода 0,086 с дисперсией равной 0,004. К первой области относятся все варианты на среднеокультуренной почве и 2 варианта наименее удобренных (NPK0 и NPK1) на хорошо окультуренной почве. Ко второй относится вариант на хорошо окультуренной почве с дозой минеральных удобрений NPK2 и все варианты на высокоокультуренной почве. Данный факт является статистическим подтверждением наличия

эффекта биологического разбавления при ограниченном поступлении йода в растения.

В аналогичных почвенно-агрохимических условиях, но на фоне критической засухи однолетние травы откликались на применение йода его аккумуляцией в надземной биомассе даже лучше, чем картофель (рис. 11).

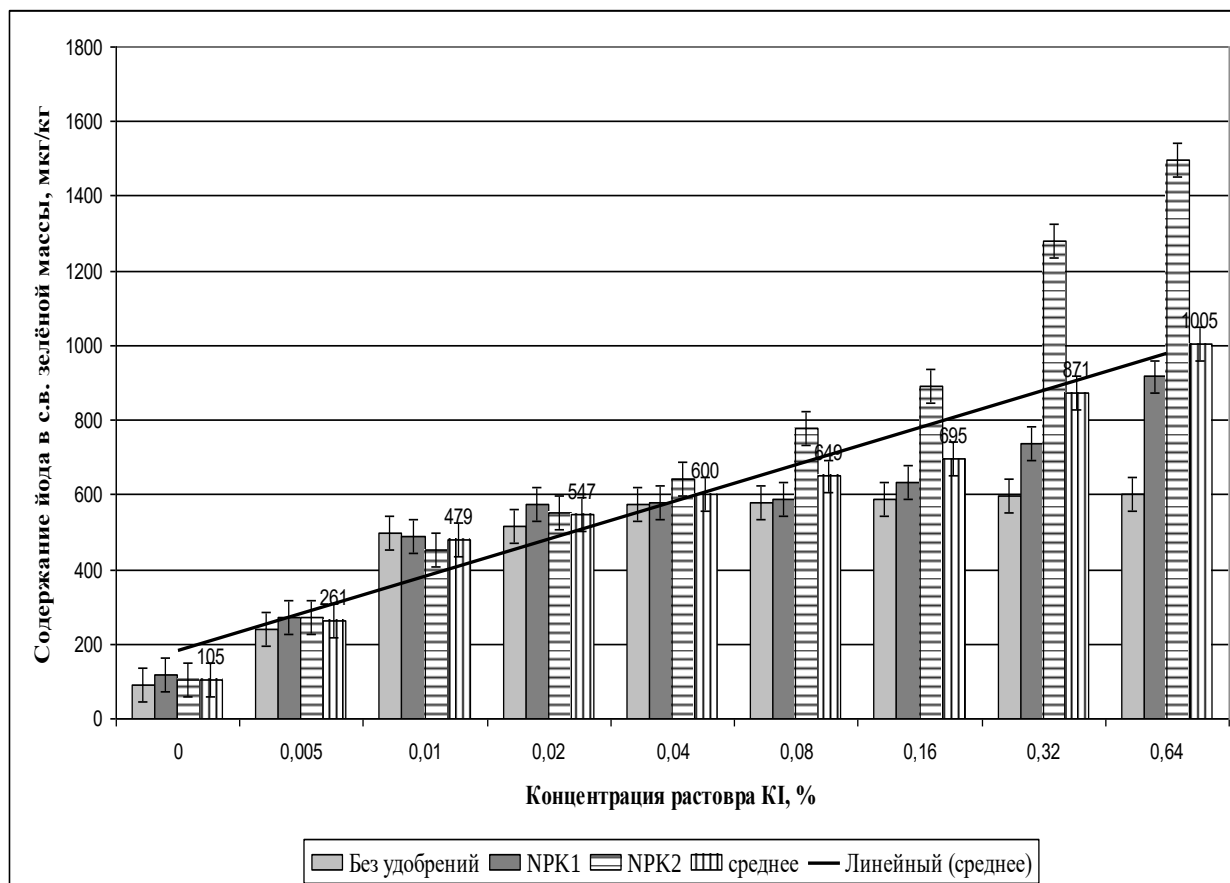


Рисунок 11 – Зависимость содержания йода в зелёной массе однолетних трав от применения удобрений (фактор А) и концентрации раствора KI (фактор Б)

(НСР₀₅: фактор А – 18, фактор Б – 32, взаимодействие АБ – 55 мкг/кг)

Средний по вариантам опыта потенциал накопления йода в зеленой массе однолетних трав составил от 476 в контроле, 545 – в варианте NPK1 и 719 мкг/кг в варианте NPK2. Т.е. по данному показателю (в среднем 580 мкг/кг) однолетние травы превзошли картофель в 1,2 раза, что вполне объяснимо биологическими различиями между оцениваемыми видами продукции.

Зависимость между дозировкой и накоплением йода в зеленой массе, как и на картофеле имела практически линейную зависимость и только на

неудобренном фоне она принимала экспоненциальный вид. При очень низкой стартовой обеспеченности зеленой массы йодом (90 – 118 мкг/кг) растения его хорошо аккумулировали из удобрения. При оптимальных дозировках в 0,08 – 0,16 % содержание йода достигло 640 – 695 мкг/кг, т.е. превысило контрольное значение на 510 – 562 %. Одной из главных причин значительного превосходства над картофелем стала разница в оптимальных дозировках йода на этих культурах. Предельная концентрация йода, достигнутая в сложившихся почвенно-агрохимических условиях, составила в вариантах NPK0, NPK1 и NPK2 602, 916 и 1496 мкг/кг.

В отличие от картофеля и однолетних трав характер накопления йода в зеленой массе многолетних трав практически не зависел от изученных в опыте почвенно-агрохимических условий (рис. 12) и имел вид прямолинейной

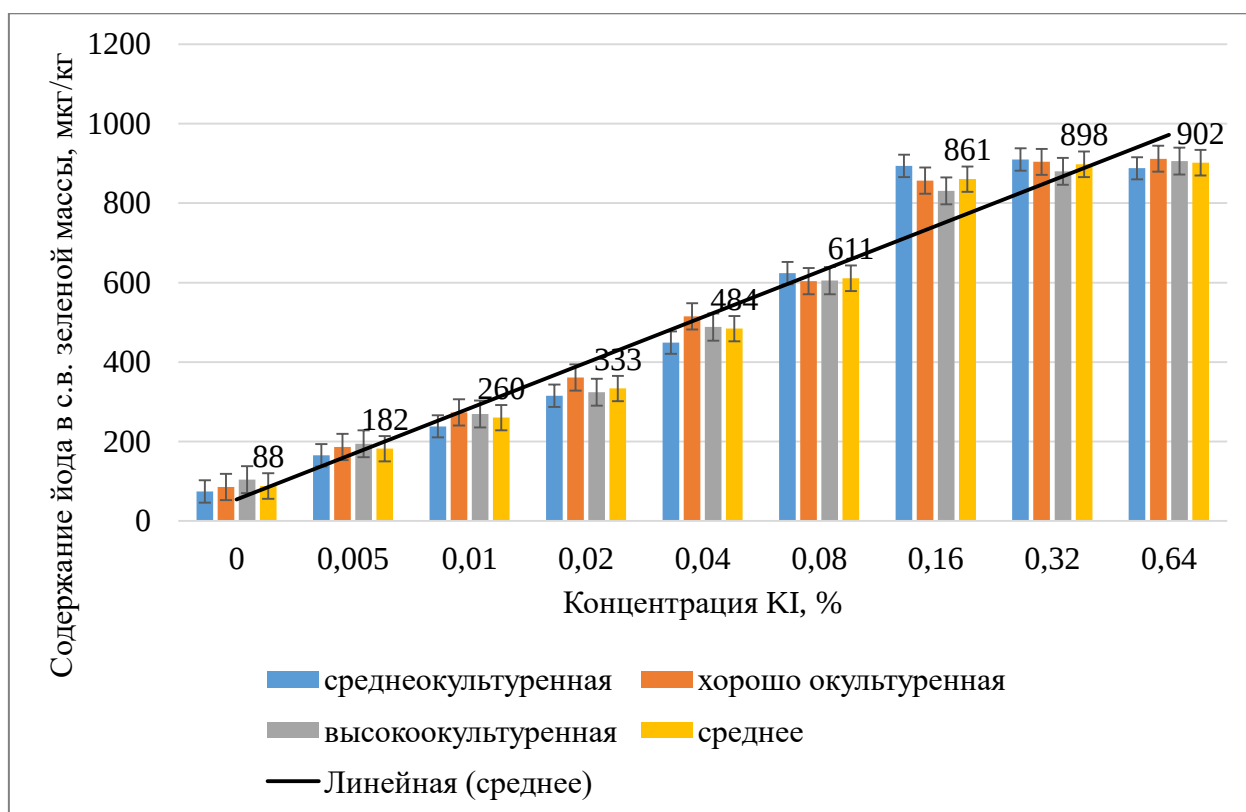


Рисунок 12 – Зависимость содержания йода в зелёной массе многолетних трав от вида почвы (фактор А) и концентрации раствора KI (фактор Б)
(НСР₀₅: фактор А – 25, фактор Б – 37, взаимодействие АБ – 64 мкг/кг)

зависимости, экспонирующей при переходе через концентрацию в 0,16 % KI.

Фактически средний потенциал накопления йода в зеленой массе многолетних трав за 2 года хозяйственного использования составил на среднеокультуренной почве 506 мкг/кг, на хорошо окультуренной – 522 мкг/кг и на высокоокультуренной – 511 мкг/кг. Аналогично практически одинаковым в разных почвенно-агрохимических условиях оказался и предельный уровень аккумуляции йода многолетними травами – 910, 912 и 906 мкг/кг соответственно. Одной из наиболее вероятных причин отсутствия значимых различий по уровням окультуренности почвы является относительная неприхотливость данной полевой культуры к условиям возделывания в данном опыте. Но, вероятно, это могло быть также и следствием засушливых погодно-климатических условий в годы проведения исследований с травами.

При оптимальном дозировании йода в 0,08 – 0,16 % КІ содержание микроэлемента в зеленой массе многолетних трав удалось повысить с 88 до 611 – 861 мкг/кг, т.е. на 594 – 878 %.

В опыте с кратностью и сроками проведения некорневой подкормки была подтверждена главная закономерность, выражающаяся в прямой зависимости уровня содержания йода от применения йодных микроудобрений (рис. 13). В клубнях картофеля концентрация йода последовательно увеличивалась с повышением частоты обработок. На среднеокультуренной почве лучший эффект был достигнут при двукратном опрыскивании, на хорошо- и высокоокультуренной – при трехкратном. При этом уровень содержания йода в клубнях картофеля удалось повысить относительно контроля в 4 – 6,8 раза.

Исходя из уровня накопления йода в продукции, на многолетних травах оказалось более предпочтительным двукратное опрыскивание. При этом достоверной разницы по этому показателю между ранним и поздним сроком опрыскивания не обнаружилось. Однолетние же травы по этому показателю предпочли более поздний срок опрыскивания, что вполне объяснимо с учетом значимых потерь удобрения при внесении на недостаточно развитом посеве однолетних трав.

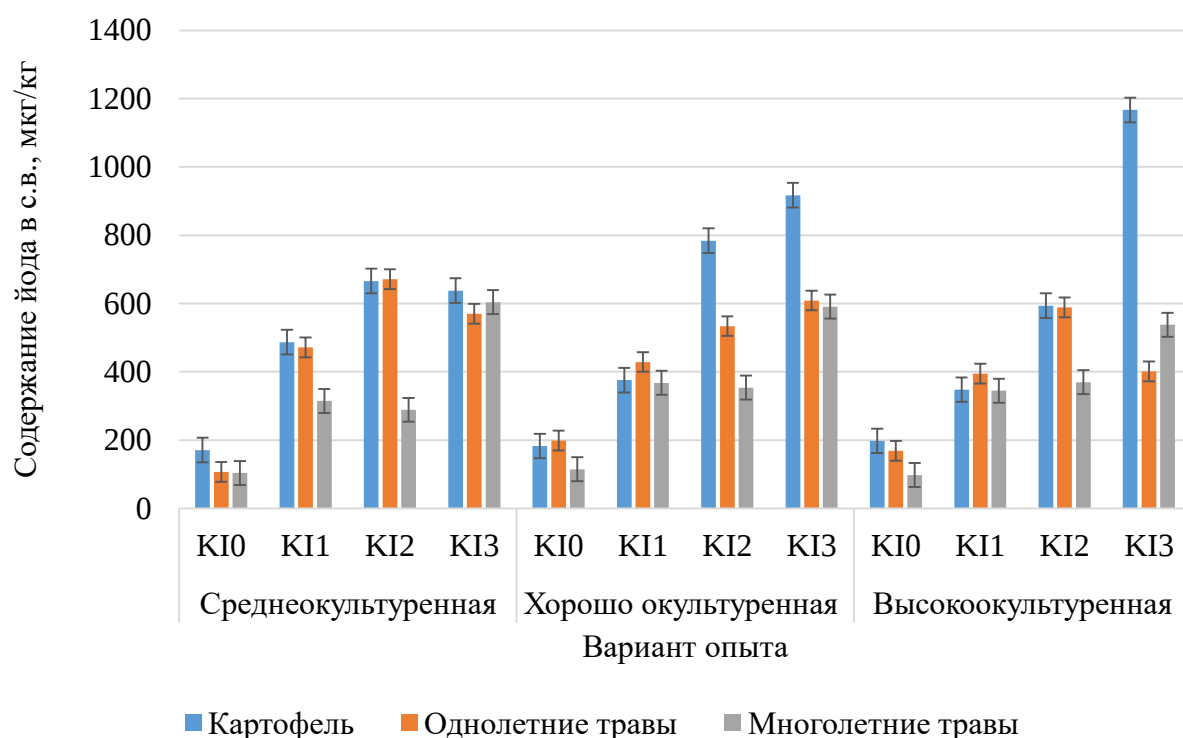


Рисунок 13 – Зависимость накопления йода в клубнях картофеля и зеленой массе однолетних и многолетних трав от кратности сроков обработки 0,02% раствором KI

Анализируя полученные в опытах данные, неоднозначные по некоторым вариантам и аспектам необходимо принимать во внимание факт высокой подвижности йода, даже поступившего в растения. Как только йод транспортируется в различные органы растения, он становится нестабильным и может улетучиваться с участием ферментов, называемых галоидионметилтрансферазами (НМТ) и галогенидтиолметилтрансферазами (НТМТ), зависящими от S-аденозилметионина (Itoh et al., 2009; Medrano-Macías et al., 2016). Было показано, что улетучивание постоянно уменьшает запас йода, присутствующего в растениях (Landini et al., 2012; Gonzali et al., 2017). Способность к улетучиванию была продемонстрирована при получении растений арабидопсиса с повышенным накоплением йода путем подавления гена HOL-1, который кодирует галогенидметилтрансферазу (Landini et al., 2012). Эти сведения могут частично объяснять нестабильный эффект

некорневых обработок в накоплении йода растениями, поскольку процесс улетучивания может зависеть от разных факторов. Однако этот вопрос ещё до конца не изучен и требует внимания.

Таким образом, в ходе исследования установлено, что уровень накопления йода в клубнях картофеля и зеленой массе кормовых трав в широком диапазоне почвенно-агрохимических условий очень низкий и может дополнительно снижаться за счет эффекта биологического разбавления при окультуривании почвы или применении минеральных систем удобрения. Между дозировками йодных микроудобрений и уровнем накопления микроэлемента в сельскохозяйственной продукции существует прямая функциональная и экспоненциальная зависимость. Ее характер определяется уровнем окультуренности почвы и применения полного минерального удобрения.

Оптимальное дозирование йодного микроудобрения на картофеле (0,02-0,04 % KI) позволяет повысить его содержание со 172 до 310 – 384 мкг/кг (на 80 – 123) %, на однолетних травах (0,08-0,16 % KI) – со 105 до 640 – 695 мкг/кг (на 510 – 562 %) и на многолетних травах (0,08-0,16 % KI) – с 88 до 611 – 861 мкг/кг (на 594 – 878 %). При этом повышение кратности обработок служит фактором дальнейшего обогащения продукции йодом на картофеле и многолетних травах. Оптимальный срок опрыскивания на однолетних травах поздний (фаза выхода в трубку овса посевного), а на многолетних травах – двукратное опрыскивание в обе фазы (кущение и выход в трубку тимopheевки луговой).

4.3 Зависимость содержания нитратов в продукции от систем удобрения с использованием йодистого калия

Нитратная форма азота представляет собой совершенно естественное соединение, активно участвующее в биологическом круговороте этого

органогенного элемента. Любые препятствия для нитрификации аммонийной формы азота в почве чреваты физиологическими нарушениями для растений и даже токсикозами. Для растений это совершенно естественный источник питания и не несущий в естественном концентрационном диапазоне никаких проблем. Однако повышенная токсичность нитратов для человека и теплокровных животных, связанная, главным образом с образованием метгемоглобина и нитрозаминов, заставляет вести жесткий мониторинг всей товарной продукции земледелия и кормов на содержание этого компонента.

Результаты многолетних исследований показывают, что сверхнормативное накопление нитратов практически всегда является следствием грубых агротехнологических нарушений. Чаще среди таковых бывают сплошные или локальные (при неравномерном внесении) передозировки азотных и органических удобрений, вынужденная уборка урожая в неспелом состоянии, неудачное сочетание высоких доз удобрений с неблагоприятной (холодной и дождливой) погодой и др. (Ефимов и др., 2002; Иванов и др., 2002; Конашенков, 2012; Конашенков и др., 2014).

В нашем исследовании, встроенном в «агрофизический стационар», системы удобрения были исходно рассчитаны на достижение верхних пределов продуктивности отдельных культур, т.е. некоторые риски накопления нитратов в наиболее интенсивных почвенно-агрохимических условиях присутствовали. Это в свою очередь давало возможность провести оценку йодной подкормки с позиций участия йода в регулировании нитратной компоненты растений.

В ходе исследования в первом опыте было установлено, что все изученные факторы оказали существенное влияние на аккумуляцию йода в сельхозпродукции, однако превышения его предельных концентраций в опытах не было зафиксировано. В среднем по всем полевым экспериментам окультуривание почвы до хорошего и высокого уровня за счет оптимизации азотного режима усилило накопление нитратов в клубнях картофеля на 34 и

Таблица 35 – Зависимость содержания нитратов в продукции исследуемых культур от применяемой системы удобрения на среднекультуренной почве

Система удобрения (картофель и одн.тр.) / окультуренность почвы (многол. тр.) Фактор А	СКІ, % Фактор Б	Содержание нитратов, мг/кг			
		Картофель (опыт 1) (ест. вл.)	Картофель (опыт 2) (ест. вл.)	Однолетние травы (с.в.)	Многолетние травы (с.в.)
Без удобрений / Среднекультуренная почва	Контроль	60	35	363	346
	СКІ – 0,005%	56	-	354	329
	СКІ – 0,01%	52	57	357	326
	СКІ – 0,02%	32	33	327	304
	СКІ – 0,04%	45	29	317	315
	СКІ – 0,08%	58	39	304	335
	СКІ – 0,16%	81	-	307	374
	СКІ – 0,32%	109	-	359	416
	СКІ – 0,64%	104	-	388	469
НРК1 / Хорошо окультуренная почва	Контроль	80	97	487	379
	СКІ – 0,005%	77	-	480	363
	СКІ – 0,01%	86	92	466	355
	СКІ – 0,02%	84	34	450	341
	СКІ – 0,04%	131	101	438	340
	СКІ – 0,08%	125	63	432	369
	СКІ – 0,16%	164	-	445	424
	СКІ – 0,32%	146	-	568	459
	СКІ – 0,64%	128	-	628	511
НРК2 / Высокоокультуренная почва	Контроль	119	150	806	384
	СКІ – 0,005%	79	-	785	371
	СКІ – 0,01%	77	172	777	360
	СКІ – 0,02%	90	104	764	348
	СКІ – 0,04%	131	95	703	362
	СКІ – 0,08%	153	238	650	392
	СКІ – 0,16%	144	-	692	421
	СКІ – 0,32%	134	-	827	465
	СКІ – 0,64%	172	-	1025	498
НСР ₀₅		15	30	26	21
ПДК		250	250	2000	2000

34 %, в зеленой массе однолетних трав на 13 и 132 %, в зеленой массе многолетних трав - на 25 и 30 % соответственно. Применение полного минерального удобрения в средних и повышенных дозах привело за счет

азотной компоненты к увеличению содержания нитратов в клубнях картофеля на 33 и 98 % и в зеленой массе однолетних трав на 34 и 122 % соответственно.

На всех изученных полевых культурах действие йода в широком диапазоне доз делится на два разнонаправленных вектора (участка):

- при увеличении концентрации раствора KI от 0,005 % до оптимального значения (у картофеля 0,02 %, у однолетних трав – 0,08 %, у многолетних трав - 0,02 %) йод стимулировал синтетические процессы и снижал содержание нитратов в клубнях картофеля и зеленой массе однолетних и многолетних трав на 47, 16 и 12 % соответственно;

- при превышении оптимума концентрации рабочего раствора обнаруживается ингибирование восстановительных ферментов, вследствие чего нитраты начинают аккумулироваться в сельскохозяйственной продукции. При этом пик этого негативного эффекта приходится на максимальные дозировки йода. Тем не менее, при оптимальных (по агрономической эффективности) дозировках йода содержание нитратов в продукции относительно контрольных вариантов удается сократить в клубнях картофеля и в зеленой массе однолетних трав в среднем на 15 %.

Многолетние травы по уровню накопления нитратов были менее чувствительны как к окультуриванию почвы, так и к применению йодной подкормки. Это положение нашло свое подтверждение и в третьем полевом опыте, результаты которого подтвердили негативную роль йода в торможении восстановления нитратов и их накоплении в сельскохозяйственной продукции при проведении повторных некорневых подкормок картофеля 0,02 % раствором KI (табл. 36). На многолетних и однолетних травах, нуждающихся в превосходящих дозировках йода повторное опрыскивание, напротив, способствовало достоверному снижению содержания нитратов на всех трех видах почв по окультуренности. Его абсолютный и относительный уровень достиг 297 мг/кг или 53 % на однолетних травах и 162 мг/кг или 34 % - на многолетних травах.

Таблица 36 – Зависимость содержания нитратов в продукции от применяемой системы удобрения

Окультуренность почвы (Фактор А)	Кратность или срок подкормки (Фактор Б)	Содержание нитратов, мг/кг		
		Картофель	Однолетние травы	Многолетние травы
Среднеокulturенная почва	Контроль	90	380	369
	KI-1	98	371	310
	KI-2	104	250	304
	KI-3	178	238	288
Хорошо окультуренная почва	Контроль	121	431	512
	KI-1	113	375	347
	KI-2	133	285	360
	KI-3	142	275	334
Высокоокulturенная почва	Контроль	121	881	547
	KI-1	123	733	352
	KI-2	134	627	366
	KI-3	148	288	321
HCP ₀₅ фактор А фактор Б		8	96	63
		13	64	41
ПДК		250	2000	2000

Таким образом, в ходе исследования было установлено, что основным фактором повышения содержания нитратов в основной сельскохозяйственной продукции выступает оптимизация азотного режима почвы за счет ее ускоренного окультурирования известью и органическими удобрениями и применения азотных удобрений. При их обоснованном сочетании риски превышения нормативов содержания нитратов минимальны.

Применение йодной некорневой подкормки в оптимальных дозах достоверно снижает содержание нитратов в клубнях картофеля и зеленой массе однолетних и многолетних трав на 47, 16 и 12 % соответственно. Положительно влияет в этом направлении и повторные подкормки на однолетних и многолетних травах, сокращающие их уровень в кормовом сырье на 34 – 53 %. Превышение оптимальных дозировок сопряжено с риском повышенного накопления нитратов.

ГЛАВА 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕКОРНЕВЫХ ПОДКОРМОК ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР ЙОДИСТЫМ КАЛИЕМ

Проведение полевых исследований в масштабе микрополевого опыта без производственных испытаний не позволяет вести объективную оценку экономической эффективности вариантов применения йодной подкормки, признанных оптимальными по результатам расчета агрономической эффективности. С этой целью ранее была предложена методика расчета энергетической эффективности отдельных приемов агротехники и целых агротехнологий (Калашников и др., 1985; Булаткин, 1986, 1997; Чумаченко, Прошкин, 1997, Прошкин, Величко, 2000).

Ее апробация на ряде объектов по обоснованию адаптивных методов и средств в системах удобрения севооборотов в условиях Северо-Западного региона показала, что энергетические затраты на окультуривание дерново-подзолистых почв крайне велики и их полной окупаемости зачастую не добиться даже за пять лет высокопродуктивного овощного севооборота (Иванов, 2000; Конашенков, 2013). В связи с этим применение йодной подкормки актуально не только с позиции биообогащения сельскохозяйственной продукции йодом, но и поиска агрохимических средств, обеспечивающих рост отдачи от затратных химико-мелиоративных окультуривающих мероприятий.

Одним из важных элементов объективной оценки изучаемого нами агротехнологического приема является расчет его энергетической эффективности, для проведения которого была использована адаптированная под агрохимические задачи методика проф. Ивановых (Иванов и др., 2002). С этой целью был выполнен расчет энергетических технологических затрат, связанных с приобретением и применением йодистого калия в некорневой подкормке, а также уборкой дополнительного урожая, полученного от ее использования (Приложение В). Набор технологических операций, состав агрегатов и их производительность копируют фактически реализуемые в

агрофизическом стационаре технологии, а отдельные их характеристики (нормы выработки, накладные расходы и др.) получены из данных производственно-экономической деятельности Меньковского филиала АФИ.

Результаты расчета затрат и их структуры показали, что их общий уровень сильно зависит от вида культуры, а точнее от технологии уборки урожая, так как затраты на применение йодных удобрений в целом низкие и в структуре затрат даже при дозировке в 0,16 % не превышают 2 % (табл. 37).

Таблица 37 - Энергетические затраты и их структура на применение КІ и уборку дополнительного урожая полевых культур

Вариант опыта	Затраты по статьям и культурам, МДж/га / %						Всего
	Техниче- ские средства	ГСМ и электроэнер- гия	Живой труд	Удоб- рения	Прочие прямые	Наклад- ные	
Картофель							
NPK0, 0,04% KI	402,0	372	128,9	11,6	91,5	70,4	1076,4
	37	35	12	1	8	7	100
NPK1, 0,02% KI	2105,6	1666	670,2	5,8	444,8	342,5	5234,8
	40	32	13	0	8	7	100
NPK2, 0,02% KI	1140,7	934	363,6	5,8	244,4	188,2	2876,7
	40	32	13	0	8	7	100
Однолетние травы							
NPK0, 0,16% KI	641,8	1343,2	150,8	46,4	218,22	168,0	2568,4
	25	52	6	2	8	7	100
NPK1, 0,16% KI	585,5	1225,9	138,1	46,4	199,59	153,7	2349,2
	25	52	6	2	8	7	100
NPK2, 0,08% KI	256,9	540,8	63,7	23,2	88,46	68,1	1041,2
	25	52	6	2	8	7	100
Многолетние травы (среднее за 2 года)							
среднеок. почва, 0,08% KI	690,2	1426,2	160,2	23,2	230,0	177,1	2706,9
	25	53	6	1	8	7	100
хорошо ок. почва, 0,08% KI	985,6	2033,7	226,4	23,2	326,9	251,7	3847,5
	26	53	6	1	8	7	100
высокоок. почва, 0,16% KI	998,1	2059,5	229,2	46,4	333,3	256,7	3923,2
	25	52	6	1	8	7	100

В технологии возделывания картофеля используется значительное количество энергоемкой техники (комбайны и другое), вследствие чего в структуре

энергетических затрат эта статья самая значительная (до 40 %). У убираемых на сено однолетних и многолетних трав эта статья затрат в 1,5 раза менее значимая в относительном исчислении и в 2,4 раза – в абсолютном энергетическом выражении. При этом заготовка кормов обходится значительно (в 1,6 раза) дороже по статье горюче-смазочных материалов. Несмотря на это, совокупные затраты на применение некорневой йодной подкормки и уборку дополнительного урожая столь отличающихся в биологическом и агротехнологическом смысле культур оказались вполне сопоставимыми. В оптимальных вариантах некорневого опрыскивания растворами KI затраты составили в среднем 3063 МДж/га на картофеле, 2106 МДж/га – на однолетних травах, 3458 МДж/га – на многолетних травах 1 и 2 года пользования.

Сопоставление этих затрат с энергоемкостью прибавки урожая, полученной в опыте в вариантах с оптимальным дозированием йода показало, что уровень энергетической эффективности его применения может быть охарактеризован как очень высокий (табл. 38).

Таблица 38 – Энергетическая эффективность некорневой йодной подкормки полевых культур

Вариант	Прибавка урожая		Затраты энергии, МДж/га	Окупаемость живого труда МДж/МДж	Кэ *
	т/га	МДж/га			
NPK0, 0,04% KI	1,60	6080	1076,4	47,2	5,65
NPK1, 0,02% KI	9,28	35264	5234,8	52,6	6,74
NPK2, 0,02% KI	4,93	18734	2876,7	51,5	6,51
NPK0, 0,16% KI	1,18	18290	2568,4	121,3	7,12
NPK1, 0,16% KI	1,07	16585	2349,9	120,1	7,06
NPK2, 0,08% KI	0,42	6510	1041,2	102,8	6,25
Среднеок. почва, 0,08% KI	1,03	15965	2706,9	99,7	5,90
Хорошо ок. почва, 0,08%	1,50	23250	3847,5	102,7	6,04
Высокоок. почва, 0,16% KI	1,52	23560	3923,2	102,8	6,01

Кэ – биоэнергетический коэффициент

Среднее значение биоэнергетического коэффициента некорневой йодной подкормки в оптимальных концентрациях рабочего раствора составило на картофеле 6,30, на однолетних травах 6,81 и на многолетних травах – 5,98 ед. Высокая биоэнергетическая эффективность некорневой подкормки растворами КІ имеет довольно простое объяснение. Несмотря на высокий энергетический эквивалент йодистого калия, его доза настолько мала, что энергетические затраты на него в общей структуре затрат составляют всего 1 – 2 %. Когда речь идет о применении органических или минеральных удобрений, то даже на фоне высокой продуктивности культур в севооборотах антропогенные энергетические затраты на них составляют от 30 до 60 % от всей совокупности агротехнологических издержек (Конашенков, 2013).

Полученные в ходе исследования и энергетического расчета данные показывают, что энергетическая эффективность йодных микроудобрений в современных почвенно-агрохимических условиях Северо-Запада России столь высока, что они безусловно должны использоваться и как эффективный инструмент для мобилизации созданного ресурса эффективного плодородия агродерново-подзолистых почв и повышения общей окупаемости затрат на применение удобрений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования были получены новые экспериментальные данные и знания в области управления продукционным процессом картофеля, однолетних и многолетних трав в широком диапазоне современных почвенно-агрохимических условий Северо-Запада России с использованием некорневой подкормки растворами йодистого калия. Отзывчивость полевых культур на применение йодной подкормки зависела от их биологических особенностей, специфики погодно-климатических, фитосанитарных и почвенно-агрохимических условий. Агрономическая оценка широкого диапазона дозировок КІ в некорневой подкормке выявила наличие биологически обусловленных стимулирующих и подавляющих диапазонов, описываемых прямолинейными и экспоненциальными функциями.

Наиболее важные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) Культуры травянопропашного звена полевого севооборота «картофель - однолетние травы – многолетние травы 1 г.п. – многолетние травы 2 г.п.» положительно реагировали на оптимизацию почвенно-агрохимических условий агродерново-подзолистой почвы за счет окультуривания и применения полного минерального удобрения: в пользу злакового компонента изменялся ботанический состав кормовых трав; ускорялся в начальной стадии и удлинялся на 2 – 3 дня вегетационный период культур; высота растений увеличивалась на 11,3 - 28,7 см у картофеля, на 4,3 - 7,7 см у овса посевного, 6,2 - 8,7 см – у вики посевной, на 3,3 – 11,7 – у тимopheевки луговой и на 1,2 – 2,4 см – у клевера лугового; продуктивность культур от окультуривания почвы до хорошего и высокого уровня и применения средних и высоких доз удобрений увеличилась на 36 – 89 и 16 и 34 % у картофеля, на 64 – 206 % и 11 – 54 % - у однолетних трав и на 42 – 52 и 65 - 72 % - у многолетних трав соответственно.

2) Влияние некорневой подкормки растворами йодистого калия на рост и развитие картофеля, однолетних и многолетних трав может носить разносторонний характер. При оптимальном дозировании (концентрации рабочего раствора в 0,02-0,16 % KI и кратности от 1 до 3 раз) йод стимулировал рост растений (высота растений увеличилась на 1,1 – 1,9 см у картофеля, на 2,0 – 4,5 см – у овса посевного, на 1,5 – 2,9 см – у вики посевной, на 3,3 – 11,7 – у тимopheевки луговой и на 1,2 – 2,4 см – у клевера лугового) и увеличивал продолжительность заключительной фазы вегетации и всего вегетационного периода на 2-4 дня. Превышение оптимальных дозировок (выше 0,08 % - 0,16 % KI) сокращало вегетационный период, ускоряя наступление увядания растений на 2-4 дня и вызывая при концентрациях рабочего раствора выше 0,32 % их токсикоз и частичную гибель. К избытку йода более чувствительны бобовые культуры (вика посевная и клевер луговой), менее – злаковые (овес посевной и тимopheевка луговая).

3) По мере повышения уровня плодородия и удобрённости агродерново-подзолистой почвы уровень оптимальной концентрации рабочего раствора йодистого калия на картофеле увеличивался от 0,02 до 0,06 %. Прибавка урожайности клубней картофеля достигла на среднеокультуренной почве 1,024 кг/м² (43 %), на хорошо окультуренной – 0,810 кг/м² (23 %) и на высокоокультуренной – 0,751 кг/м² (20 %). Оптимальная кратность некорневых подкормок картофеля достигла 2 – 3 единиц, в зависимости от специфики сочетания почвенно-агрохимических, погодно-климатических и фитосанитарных условий. При этом йодная некорневая подкормка увеличила окупаемость 1 кг д.в. основного удобрения в 1,3 – 3,6 раза и сформировала биоэнергетический коэффициент в 5,65 – 6,51 ед.

4) Уровень оптимальной концентрации рабочего раствора йодистого калия на однолетних травах составил 0,16 % на неудобренном фоне, 0,16 % - при применении средних доз и 0,08 % - при внесении высоких доз полного минерального удобрения. Он обеспечил повышение урожайности зеленой массы на 0,369 кг/м² (80 %), 0,334 кг/м² (68 %) и 0,130 кг/м² (20 %) и

формирование биоэнергетического коэффициента в 6,25 – 7,12 ед. Оптимальная фаза (срок) проведения йодной некорневой подкормки на однолетних травах – это фаза выхода в трубку у овса посевного и начала ветвления – у вики посевной, обеспечивающая среднюю прибавку продуктивности в 16 % с дифференциацией по почвенно-агрохимическим условиям в пределах 2 – 38 %.

5) Оптимальная концентрация рабочего раствора KI на многолетних травах на средне-, хорошо и высокоокультуренной почвах составила 0,08, 0,08 и 0,16 % соответственно. Лучшим сроком проведения некорневой подкормки на многолетних травах является начальная фаза вегетации (кущение у тимофеевки луговой и фаза третьего тройчатого листа у клевера лугового – через 15-20 дней после начала весеннего отрастания). Агрономическая эффективность оптимального дозирования йода в среднем за 2 года составила на среднеокультуренной почве 0,409 кг/м² (29 %), на хорошо окультуренной – 0,597 кг/м² (29 %) и на высокоокультуренной почве – 0,539 кг/м² (23 %). Биоэнергетический коэффициент достиг 5,90 – 6,04 ед. Эффективность йодной подкормки на фоне острой засухи (прибавка урожайности в среднем по оптимальным вариантам (0,388 кг/м² или 29 %) оказалась в 1,8 раза ниже, чем при более благоприятной погоде (0,690 кг/м² или 28 %).

6) Некорневая йодная подкормка оказала многостороннее действие на основные качественные показатели продукции полеводства. Ее применение в оптимальных дозировках привело: на картофеле к снижению содержания в клубнях сырого протеина на 4 – 10 %, увеличению – сухого вещества на 4 – 8 % и крахмала – на 8 – 15 %; на однолетних травах – к увеличению содержания сырого протеина на 3 – 7 % и снижению содержания сырой клетчатки – на 4 – 8 %; на многолетних травах – к снижению содержания сухого вещества в зеленой массе на 6 – 10 %, сырой клетчатки – на 6 – 9 % и увеличению содержания сырого протеина – на 12 – 18 % и сырой золы – на 13 – 18 %. Повышение кратности йодных обработок вело к некоторому снижению крахмалистости клубней, а на состав зеленой массы трав влияло слабо.

7) Уровень накопления йода в клубнях картофеля и зеленой массе кормовых трав в широком диапазоне почвенно-агрохимических условий очень низкий и склонен к снижению за счет эффекта биологического разбавления при окультуривании почвы или применении минеральных систем удобрения. Оптимальное дозирование йодного микроудобрения на картофеле (0,02-0,04 % KI) позволяет повысить его содержание со 172 до 310 – 384 мкг/кг (на 80 – 123) %, на однолетних травах (0,08-0,16 % KI) – со 105 до 640 – 695 мкг/кг (на 510 – 562 %) и на многолетних травах (0,08-0,16 % KI) – с 88 до 611 – 861 мкг/кг (на 594 – 878 %). При этом повышение кратности обработок служит фактором дальнейшего обогащения продукции йодом на картофеле и многолетних травах.

8) Ведущим фактором повышения содержания нитратов в основной сельскохозяйственной продукции выступает оптимизация азотного режима почвы за счет ее ускоренного окультуривания известью и органическими удобрениями и применение азотных удобрений. Применение йодной некорневой подкормки в оптимальных дозах достоверно снизило содержание нитратов в клубнях картофеля и зеленой массе однолетних и многолетних трав на 47, 16 и 12 % соответственно. Повторные подкормки на однолетних и многолетних травах сократили уровень их накопления в кормовом сырье на 34 – 53 %. Превышение оптимальных дозировок KI сопряжено с риском повышенного накопления нитратов в продукции.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НАУЧНЫХ ВЫВОДОВ

Сформированная в ходе исследования информационная база управления производственным процессом полевых культур и йодным статусом продукции земледелия в условиях Северо-Запада России с использованием йодистого калия может быть использована:

- при разработке технологического регламента применения йодистого калия в качестве микроудобрения для некорневой подкормки полевых культур в течение вегетационного периода;

- при обосновании средств и систем удобрения, направленных на производство в условиях Северо-Запада РФ высококачественной сельскохозяйственной продукции функциональной по обеспеченности физиологически ценными йодсодержащими компонентами.

- при планировании дальнейших исследований по совершенствованию фундаментально-прикладных основ йодной биофортификации товарной продукции и кормов в условиях геохимической аномалии недостатка йода на Северо-Западе России.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Наиболее актуальными перспективными направлениями исследований могут быть:

- поиск взаимосвязей и факторов, определяющих эффективность йодных микроудобрений, в том числе погодных, почвенных, фитосанитарных условий, а также возможности и формы аккумуляции йода растительной массой;
- разработка новых формул йодсодержащих удобрений и мелиорантов, обеспечивающих высокую эффективность и экологическую безопасность;
- поиск перспективных сочетаний йодных микроудобрений с магнием, селеном и тирозином.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus и рекомендованных ВАК РФ:

1. Иванов, А. И. Некоторые возможности управления продуктивностью и качеством картофеля (*Solanum tuberosum* L.) с использованием йода [Текст] / А.И. Иванов, **П.С. Филиппова**, П.А. Филиппов // Проблемы агрохимии и экологии. 2019. № 4. С. 43-49.
2. Иванов, А. И. Эффективность систем удобрения с применением йода на однолетних травах [Текст] / А.И. Иванов, **П.С. Филиппова**, П.А. Филиппов // Агрохимия. 2021. № 5. С. 37-46.
3. Биологические особенности отклика кормовых трав на применение йода на агродерново-подзолистых почвах различной окультуренности [Текст] / А.И. Иванов, М.В. Рак, Ж.А. Иванова, **П.С. Филиппова**, П.А. Филиппов // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57, № 3. С. 486-499.
4. Данилова, Т. А. Влияние йодистого калия на урожайность и качественные показатели свеклы столовой и картофеля [Текст] / Т.А. Данилова, **П.С. Филиппова**, З.П. Котова // Агрохимический вестник. 2022. № 5. С. 16-20.
5. Перспективы применения йода в системе удобрения дерново-подзолистых почв на примере картофеля [Текст] / **П.С. Филиппова**, П.А. Филиппов, Н.С. Прияткин, Т.А. Данилова, Ю.А. Тюкалов // Агрохимический вестник. 2024. № 3. С. 36-41.
6. **Filippova, P.S.** Effect of Fertilizer Systems with Iodine on the Quality and Yield of *Solanum tuberosum* L. [Текст] / P.S. Filippova, Z.P. Kotova. Agriculture digitalization and organic production. Saint-Petersburg: Smart Innovation, Systems and Technologies, 2023. Vol. 331. P. 211-220.
7. **Филиппова, П.С.** Эффективность применения йодистого калия на картофеле в условиях Северо-Запада [Текст] / П.С. Филиппова // Journal of Agriculture and Environment. 2024. № 9(49).

Публикации в других научных изданиях:

1. **Филиппова, П.С.** Влияние йода на продуктивность и качество клубней картофеля [Текст] / П.С. Филиппова. Мелиорация почв для устойчивого развития сельского хозяйства. Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения профессора Александра Филипповича Тимофеева. Киров, 2019. С. 307-314.

2. **Филиппова, П.С.** О роли йода в продукционном процессе картофеля [Текст] / П.С. Филиппова, П.А. Филиппов. Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. Материалы II Международной научной конференции посвященной памяти академика Е.И. Ермакова, Санкт-Петербург: АФИ, 2019. С. 758-764.

3. **Филиппова, П.С.** О роли йода в накоплении нитратов в клубнях картофеля на среднеокультуренной дерново-подзолистой почве [Текст] / П.С. Филиппова. Фундаментальные проблемы управления циклом азота в современном земледелии, Владимир, 17–20 сентября 2019 года. Владимир: АО "ПРЕССТО", 2019. С. 298-303.

4. **Филиппова, П.С.** Эффективность оптимизации йодного питания на культуре картофеля [Текст] / П.С. Филиппова. Научные приоритеты адаптивной интенсификации сельскохозяйственного производства. Материалы Международной научно-практической конференции с элементами школы молодых ученых, Краснодар, 03–05 июля 2019 года. Краснодар: Изд-во "ЭДВИ", 2019. С. 142-144.

5. Иванова, Ж.А. К вопросу о поиске оптимальной концентрации йода для подкормки однолетних трав в Агрофизическом стационаре [Текст] / Ж.А. Иванова, П.А. Филиппов, **П.С. Филиппова**. Современное состояние, приоритетные задачи и перспективы развития аграрной науки на мелиорированных землях. Материалы международной научно-практической конференции. Тверь: ТГУ, 2020. С. 103-106.

6. Иванова, Ж.А. Эффективность некорневой подкормки многолетних трав йодистым калием [Текст] / Ж.А. Иванова, **П.С. Филиппова**.

Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства.
Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург: АФИ,
2022. С. 646-650.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адерихин, П.Г. Йод в почвах Центрально-Черноземных областей / П.Г. Адерихин, Н.А. Протасова // Почвоведение. - 1969. - № 11. - С. 53–60.
2. Александровская, Е.И. Поведение йода в почве / Е.И. Александровская // Почвоведение. - 1979. - №6. - С. 150-152.
3. Алексеев, А.П. Влияние предпосевной обработки йодистым калием на состояние воды в тканях листа кукурузы / А.П. Алексеев // Физиология и продуктивность растений в Забайкалье. - Улан-Удэ, 1969. - № 2. - С. 13-17.
4. Аникина, А.П. Йод в почвах геохимически сопряженных ландшафтах Центральной Барабы / А.П. Аникина // Почвоведение. - 1975. - №1. - С. 66-72.
5. Анисимов, А.А. Регуляция ферментативной активности у растений и ионный состав тканей / А.А. Анисимов, И.Ф. Александрова, А.П. Веселов // Ферменты, ионы и биоэлектрогенез у растений. - Горький, 1982. - С. 3-11.
6. Анспок, П.И. Микроудобрения / П.И. Анспок. - Ленинград: Агропромиздат, 1990. - 272 с.
7. Архипов, М.В. Методологические и информационно-технологические основы развития кормопроизводства в Северо-Западном регионе РФ / М.В. Архипов, А.И. Иванов, С.М. Синицына [и др.] – Санкт-Петербург, 2015. – 184 с.
8. Белолобцев, А.И. Агроклиматическое обеспечение продукционных процессов сельскохозяйственных культур в условиях Центрального района Нечерноземной зоны / А.И. Белолобцев, И.Ф. Асауляк // Известия ТСХА. - 2013. - №4. - С. 66-84.
9. Березкин, В.Ю. Особенности распределения йода в системе почва-картофель в агроландшафтах Брянской области / В.Ю. Березкин, Е.М. Коробова, Л.И. Колмыкова [и др.] // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева и Всероссийской с междунар. участием

научной конф. (Белгород, 15-22 августа 2016 г.). – Белгород: Белгород, 2016. - С. 404-405.

10.Блинникова, О.М. Методология обогащения плодов и ягод йодом для обеспечения рационального питания населения / О.М. Блинникова, Л.Г. Елисеева // Функциональные продукты питания. Пищевая промышленность. - 2015. - №9. - С. 42-44.

11.Борисов, В.А. Система удобрения овощных культур / В.А. Борисов. - Москва: Росинформагротех, 2016. - 392 с.

12.Бузовер, Ф.Я. Влияние микроэлементов на урожайность и крахмалистость клубней картофеля / Ф.Я Бузовер // Микроэлементы и естественная радиоактивность почв. - Ростов-на-Дону, 1962. - С. 148-149.

13.Булаткин, Г.А. Эколого-энергетические аспекты продуктивности агроценозов / Г.А. Булаткин. - Пущино: АН СССР, 1986. - 209 с.

14.Булаткин, Г.А. Энергетическая эффективность земледелия и агроэкосистем: взаимосвязи и противоречия / Г.А. Булаткин, В.В. Ларионов // Агрохимия. - 1997. - № 3. - С. 63-66.

15.Буркат, С.Е. Гигиеническое значение адсорбции йода гуминовыми кислотами / С.Е. Буркат // Гигиена и санитария. -1965. - № 1.

16.Важенин, И.Г. Влияние бора, брома, йода и других микроэлементов на урожай, содержание углеводов и ферментативную деятельность картофеля на легких дерново-подзолистых почвах / И.Г. Важенин, В.И. Белякова // Микроэлементы в жизни растений и животных. - Москва, 1952. - С. 121-136.

17.Вернадский, В.И. Химические элементы, их классификация и формы нахождения в земной коре / В.И. Вернадский // Избранные сочинения. Т.1. - Москва, 1954.

18.Виноградов, А.П. Биогеохимические провинции и эндемии / А.П. Виноградов // Доклад АН СССР. – Москва, 1938. - №18. - С. 283-286.

19.Виноградов, А.П. Введение в геохимию океана / А.П. Виноградов. - Москва: Наука, 1967.

- 20.Вишневская, Т.И. Комплекс технологий получения йод- и альгинатсодержащих продуктов из бурых водорослей дальневосточных морей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Татьяна Ивановна Вишневская; ФГУП «ТИНРО-Центр». - Владивосток, 2003. - 24 с.
- 21.Власюк, П.А. Значение микроэлементов для стартово-пусковых механизмов прорастания семян / П.А. Власюк // Биологическая роль микроэлементов и их применение в сельском хозяйстве и медицине. - Москва, 1974. - С. 41-47.
- 22.Власюк, П.А. Участие микроэлементов в обмене веществ растений / П.А. Власюк, В.А. Жидков, В.И. Ивченко [и др.] // Биологическая роль микроэлементов. - Москва, 1983. - С. 97-105.
- 23.Войткевич, Г.В. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е. Мирошников, А.С. Поваренных [и др.]. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва, 1977. - 184 с.
- 24.Гаджимусиева, Н.Т. О динамике подвижных форм йода в компонентах аридных экосистем Западного Прикаспия / Н.Т. Гаджимусиева, А.А. Сайдиева // Аридные экосистемы. - 2017. - Т. 23. № 2(71). - С. 62-67.
- 25.Гинс, М.С. Значение овощных культур в коррекции биохимического состава рациона человека / М.С. Гинс, В.К. Гинс, В.Ф. Пивоваров [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. - 2017. - № 2. - С. 3-5.
- 26.Голубкина, Н.А. Перспективы обогащения сельскохозяйственных растений йодом и селеном (обзор) / Г.А. Голубкина, Е.Г. Кекина, С.М. Надежкин // Микроэлементы в медицине. - 2015. - № 16 (3). - С. 12-19.
- 27.Горбунов, А.В. Поступление селена и йода в организм человека с различными рационами питания / А.В. Горбунов, С.М. Ляпунов, О.И. Окина, М.В. Фронтасьева // Экология человека. - 2011. - №10. - С. 3-8.
- 28.Горбунова, Н.С. Влияние орошения на особенности поведения йода в черноземах выщелоченных / Н.С. Горбунова, Е.В. Куликова // Плодородие. - 2021. - №5(122). - С. 68-70.

29. Данилова, Т.А. Влияние йодистого калия на урожайность и качественные показатели свеклы столовой и картофеля / Т.А. Данилова, П.С. Филиппова, З.П. Котова // Агрохимический вестник. - 2022. - № 5. - С. 16-20.
30. Дибирова, А.П. Содержанием молибдена, цинка, бора, йода в почвах равнинной территории Дагестана / А.П. Дибирова, З.Н. Ахмедова, Н.И. Рамазанова, П.Р. Хизроева // Почвоведение. - 2005. - №8. - С. 968-973.
31. Диксон, М. Ферменты / М. Диксон, Э. Уэбб. - Москва, 1982. - Т. 1-3.
32. Добровольский, В.В. Основы биогеохимии / В.В. Добровольский. - Москва, 1998. - 413 с.
33. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований / Б.А. Доспехов. - Москва: Альянс, 2014. - 351 с.
34. Дубенок, Н.Н. Актуальные вопросы научного и кадрового обеспечения развития мелиорации в Нечерноземье / Н.Н. Дубенок, А.И. Иванов, Ю.В. Чесноков, Ю.Г. Янко // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. - 2020. - № 6. - С. 14-19.
35. Ермоленко, Н.Ф. Микроэлементы и коллоиды почв / Н.Ф. Ермоленко. - Минск, 1966.
36. Ефимов, В.Н. Система удобрения / В.Н. Ефимов, И.Н. Донских, В.П. Царенко. - Москва: Колос, 2002. - 320 с.
37. Ефимов, М.В. Действие йода на растения овса при предпосевной обработке семян раствором йодистого калия в условиях Бурятии / М.В. Ефимов // Краткие сообщения Бурят. компл. НИИ. - Улан-Удэ, 1960. - Вып. 2. - С. 46-52.
38. Ефимов, М.В. Опыт и перспективы применения микроэлементов в растениеводстве Бурятии / М.В. Ефимов // Применение микроэлементов в сельском хозяйстве Восточной Сибири и Д. Востока. - Улан-Удэ, 1962. - С. 16-32.

39.Ефимов, М.В. Физиологическое действие йода на растения в условиях Бурятии / М.В. Ефимов // Труды 1-й конф. физиологов и биохимиков Сибири и Д. Востока. - Иркутск, 1963. - С. 80-84.

40.Жукова, Л.А. Распределение йода в некоторых районах Курской области / Л.А. Жукова, Н.Н. Ходыревская // Наука и инновации в сельском хозяйстве: материалы конф. (Курск, 26-28 января 2011 г.). – Курск: Курск. гос. с.-х. ак., 2011. - С. 15-17.

41.Жукова, Л. А. Биогеохимическое районирование йода в почвах Курской области / Л.А. Жукова, Н.Н. Ходыревская // Научное обеспечение агропромышленного производства: материалы Междунар. научно-практической конф. (Курск, 25–27 января 2012 г.). – Курск, 2012. - Ч. 1. - С. 194-195.

42.Завалин, А.А. Рекомендации по проектированию интегрированного применения средств химизации в ресурсосберегающих технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / А.А. Завалин, А.И. Карпухин, В.А. Исаев [и др.]. - Москва: РАСХН, 2010. - 464 с.

43.Зимовец, Б.А. О содержании йода в почвах бассейна Амура / Б.А. Зимовец, А.И. Зеленова // Почвоведение. - 1963. - № 11. - С. 25–35.

44.Зинчук, Е.Г. Исследования почв Меньковского филиала ФГБНУ Агрофизического научно-исследовательского института / Е.Г. Зинчук, К.Г. Моисеев // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия: сборник докладов научно-практической конференции с междунар.участием Курского отделения МОО "Общество почвоведов имени В.В. Докучаева" (Курск, 22 апреля 2016 г.). - Курск: Всероссийский НИИ земледелия и защиты почв от эрозии Россельхозакадемии, 2016. - С. 114-115.

45.Иванов, А.И. Влияние окультуренности дерново-подзолистой почвы и её водного режима на эффективность калийных удобрений / А.И. Иванов // Агрохимия. – 1998. - № 11. – С. 45 – 48.

46.Иванов, А.И. Почвенно-агрохимическое обоснование системы удобрения на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах Северо-

Запада России: диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Алексей Иванович Иванов; СПбГАУ. – Санкт-Петербург, 2000. - 295 с.

47.Иванов, А.И. Калий имеет большое значение для овощных культур / А.И. Иванов // Картофель и овощи. - 2001. - № 6. - С. 21.

48.Иванов, А.И. Снижение зависимости земледелия Северо-Запада России от погодно-климатических аномалий: проблемы и решения / А.И. Иванов, А.А. Конашенков // Мелиорация и водное хозяйство. - 2018. - № 5. - С. 32-37.

49.Иванов, А.И. Агротехнические аспекты реализации биоклиматического потенциала Северо-Запада России / А.И. Иванов, А.А. Конашенков, Ж.А. Иванова [и др.] // Агрофизика. - 2016. - №2. - С. 35-44.

50.Иванов, А.И. Особенности методологии полевых исследований на современном этапе / А.И. Иванов, Ж.А. Иванова, А.А. Конашенков, П.А. Филиппов // Агрофизика. - 2017. - № 2. - С. 9-19.

51.Иванов, А.И. Отзывчивость картофеля на удобрение и потери урожая от фитофтороза в условиях Северо-Запада России / А.И. Иванов, Ж.А. Иванова, О.И. Якушева, П.А. Филиппов // Картофель и овощи. - 2019. - № 8. - С. 23-26.

52.Иванов, А.И. Трансформация подвергшейся скрытой деградации агродерново-подзолистой почвы при ускоренном воспроизводстве её плодородия / А.И. Иванов, Ж.А. Иванова, П.А. Филиппов // Российская сельскохозяйственная наука. - 2022. - № 5. - С. 24-29.

53.Иванов, А.И. Биологические особенности отклика кормовых трав на применение йода на агродерново-подзолистых почвах различной окультуренности / А.И. Иванов, М.В. Рак, Ж.А. Иванова [и др.] // Сельскохозяйственная биология. - 2022. - Т. 57, № 3. - С. 486-499.

54.Иванов, А.И. Некоторые возможности управления продуктивностью и качеством картофеля (*Solanum tuberosum* L.) с использованием йода / А.И. Иванов, П.С. Филиппова, П.А. Филиппов // Проблемы агрохимии и экологии. - 2019. - № 4. - С. 43-49

55.Иванов А.И. Эффективность систем удобрения с применением йода на

однолетних травах / А.И. Иванов, П.С. Филиппова, П.А. Филиппов // Агрохимия. - 2021. - №5. - С. 37-46.

56.Иванов, А.И. Мелиорация как необходимое средство развития земледелия Нечерноземной зоны России / А.И. Иванов, Ю.Г. Янко // Агрофизика. - 2019. - № 1. - С. 67-78.

57.Иванова, В.Ф. Калийный фонд пахотных почв Псковской области / В.Ф. Иванова, И.А. Иванов, А.И. Иванов // Агрохимический вестник. - 1997. - №4. - С. 38.

58.Иванов, И.А. Научно-практические основы системы земледелия Северо-Западного района России / И.А. Иванов, А.И. Иванов. - Великие Луки, 2006. - 249 с.

59.Иванов, И.А. Научно-производственные основы системы удобрения в Нечернозёмной зоне / И.А. Иванов, А.И. Иванов, В.Ф. Иванова. - Великие Луки, 2002. - 216 с.

60.Калашников, К.Г. Сокращать затраты энергии / К.Г. Калашников [и др.] // Земледелие. - 1985. - № 8. - С. 36-37.

61.Кашин, В.К. Физиологическое действие йода и никеля при предпосевной обработке семян кукурузы: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Владимир Капсимович Кашин; Иркутский гос. университет им. А.А. Жданова. – Иркутск, 1972. – 27 с.

62.Кашин, В.К. Итоги и задачи изучения действия йода на растения в Забайкалье / В.К. Кашин // Физиология и продуктивность растений в Забайкалье. - Улан-Удэ, 1977. - С. 142-162.

63.Кашин, В.К. Влияние йода при различных способах применения на вынос элементов питания урожаем кукурузы и овса / В.К. Кашин, Э.И. Осипова // Физиология и продуктивность растений в Забайкалье. - Улан-Удэ, 1978. - С. 58-68.

64.Кашин, В.К. Йод в растениях, особенности его накопления / В.К. Кашин // Агрохимия. - 1979. - №11. - С. 135-147.

- 65.Кашин, В.К. Биогеохимия, физиология и агрохимия йода / В.К. Кашин; отв. ред. Ф.А. Тихомиров. - Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1987. - 261 с.
- 66.Кашин, В.К. О необходимости йода для растений / В.К. Кашин // Агрохимия. - 1995. - №3. - С. 25-31.
- 67.Кашин, В.К. Йод в объектах окружающей среды Забайкалья и эффективность обогащения им растений / В.К. Кашин // Химия в интересах устойчивого развития. - 2008. - Т. 16, № 2. - С. 173-182.
- 68.Ковалевский, А.Л. Биогеохимия растений / А.Л. Ковалевский. - Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1991. - 288, [5] с.
- 69.Ковальский, В.В. Микроэлементы в почвах СССР / В.В. Ковальский, Г.А. Андрианова. - Москва: Наука, 1970. - 180 с.
- 70.Ковальский, В.В. Биологическая роль йода / В.В. Ковальский // Научные труды ВАСХНИЛ. - Москва: Колос, 1972. - С. 3-32.
- 71.Ковда, В.А. Микроэлементы в почвах Советского Союза / В.А. Ковда, И.В. Якушевская, А.Н. Тюрюканов. - Москва, 1959. - 66 с.
- 72.Колмыкова, Л.И. Особенности водной миграции йода и селена в геохимически контрастных ландшафтах Брянской области: диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Людмила Игоревна Колмыкова; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН). – Москва, 2017. – 179 с.
- 73.Конарбаева, Г.А. Йод в гумусовом веществе почв юга Западной Сибири / Г.А. Конарбаева, В.В. Демин // Агрохимия. - 2011. - № 8. - С. 73–80.
- 74.Конарбаева, Г.А. Содержание и распределение галогенов в почвенном профиле естественных и антропогенных экосистем юга Западной Сибири / Г.А. Конарбаева, В.Н. Якименко // Вестник Томского государственного университета. Биология. - 2012. - №4(20). - С. 21–35.

75.Конарбаева, Г.А. Влияние физико-химических свойств почв заполярной территории Западной Сибири на содержание в них йода / Г.А. Конарбаева, Б.А. Смоленцев // Агрохимия. - 2014. - № 2. - С. 50-59.

76.Конарбаева, Г.А. Фтор и йод в системе почва-растение: биогеохимические и экологические аспекты / Г. А. Конарбаева // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материалы Международной школы-семинара молодых исследователей (13–16 мая 2014 г.). - Тюмень: Тюменский государственный университет, 2014. - С. 112-123.

77.Конарбаева, Г.А. Влияние минеральных удобрений на содержание галогенов в объектах окружающей среды / Г.А. Конарбаева, В.Н. Якименко // Химия в интересах устойчивого развития. - 2015. - Т. 23, № 4. - С. 347-353.

78.Конарбаева, Г.А. Пространственно-генетические особенности распределения йода в почвах Западной Сибири / Г.А. Конарбаева, Б.А. Смоленцев // Агрохимия. - 2018. - № 7. - С. 85-96.

79.Конарбаева, Г.А. Поглотительная способность серой лесной почвы по отношению к йоду / Г.А. Конарбаева, В.Н. Якименко // Агрохимия. - 2019. - № 2. - С. 52-59.

80.Конарбаева, Г.А. Изменение почвенного фонда йода в агроценозах лесостепи Западной Сибири / Г.А. Конарбаева, В.С. Бойко, В.Н. Якименко // Агрохимия. - 2022. - №12. - С. 55-61.

81.Конашенков, А.А. Агроэкологические последствия неравномерного внесения навоза в овощном севообороте / А.А. Конашенков, А.И. Иванов // Агрохимия. - 2012. - № 6. - С. 66-72.

82.Конашенков, А.А. Научное обоснование систем удобрения для прецизионного применения в условиях Северо-Запада России: диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Александр Алексеевич Конашенков; АФИ. - Санкт-Петербург, 2013. - 391 с.

83.Конашенков, А.А. Оценка параметров пространственной неоднородности показателей почвенного плодородия / А.А. Конашенков, Ю.В. Хомяков, Т.Г. Фоменко, И.А. Федькин // Агрохимия. - 2014. - № 2. - С.

39 -49.

84.Коренев, В.Б. Действие системы удобрений и погодных условий на урожайность озимой ржи в севообороте в условиях юго-запада Нечерноземной зоны / В.Б. Коренев, И.Н. Белоус, Л.А. Воробьева, Г.Л. Яговенко // Земледелие. - 2015. - №7. - С. 34-36.

85.Корзанов, В. С. Методы превращения йодата калия в йодид / В.С. Корзанов, А.А. Кетов, А.В. Куковьякина // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. - 2011. - № 2(2). - С. 89-95.

86.Коробова, Е.М. Дефицит йода в агроландшафтах Брянской области / Е.М. Коробова, В.Ю. Березкин, Л.И. Колмыкова [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. - 2016. - № 3. - С. 57-65

87.Коробова, Е.М. Изучение распределения йода в почвах и луговой растительности геохимически контрастных ландшафтов в связи с оценкой йодного статуса Брянской области / Е.М. Коробова, В.Ю. Березкин, Л.И. Колмыкова, Н.В. Корсакова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. - 2013. - №4. - С. 60-67.

88.Коробова, Е.М. Комплексная оценка эколого-геохимического состояния техногенно трансформированных территорий / Е.М. Коробова // Геохимия. - 2017. - № 10. - С. 863-874.

89.Короткова, А.А. Повышение молочной продуктивности и качества молока для детского питания при использовании в рационах козوماتок органических форм йода и селена / А.А. Короткова, Н.И. Мосолова, Н.И. Ковзалов, З.Н. Козенко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. - 2011. - №4(24). - С. 1-6.

90.Костин, В.И. Влияние йода на содержание аминокислот и биологическую ценность кормов в чистых и смешанных посевах кормовых культур / В.И. Костин, С.И. Вандышев, И.А. Вандышев // Известия ОГАУ. - 2014. - №2. - С. 42-44.

91.Котляров, Д.В. Физиолого-биохимическое обоснование применения экзогенных аминокислот для защиты растений от неблагоприятных факторов среды: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Денис Владимирович Котляров; Кубанский государственный аграрный университет. Краснодар, 2018. – 45 с.

92.Котова, З.П. Влияние подкормки йодистым калием на продуктивность и качество клубней картофеля / З.П. Котова, Т.А. Данилова, А.И. Иванов // Плодородие. - 2021. - №1(118). - С. 23-26.

93.Кривоногова, А.Г. Влияние микроэлементов на урожай и рост земляники / А.Г. Кривоногова, А.А. Срослова // Труды Горьковского головного с.-х. ин-та. - Горький, 1974. - Т. 77. - С. 10-16.

94.Курдуманова, О.И. Содержание йода в различных почвах Омской области / О.И. Курдуманова, Л.А. Жарких // Познание и деятельность: от прошлого к настоящему: материалы I Всероссийской междисциплинарной научной конференции (Омск, 05 декабря 2019 г.). - Омск: Омский гос. пед. ун-т, 2019. - С. 351-355.

95.Ларионова, А.П. Влияние йода на интенсивность выделения CO_2 , активность некоторых оксидаз и рост растений сахарной свеклы / А.П. Ларионова, Н.С. Спиридонова // Сельскохозяйственная биология. - 1969. - Т. 4, № 3. - С. 463-465.

96.Лигомина, И.П. Йодная недостаточность у крупного рогатого скота в условиях техногенного загрязнения окружающей среды / И.П. Лигомина, С.В. Фурман, Д.В. Лисогурская // Ученые записки УО ВГАВМ. - 2018. - № 54 (1). - С. 126-129.

97.Лычева, Т.В. Влияние Гумитона на процессы пищеварения и роста телок при переходе с молочного кормления / Т.В. Лычева, Н.М. Белоусов, О.А. Кинсфатор // Достижения науки и техники АПК. - 2012. - №5. - С. 63-65.

98.Малышева, Е.В. Агрохимические свойства почвы в зависимости от содержания микроэлементов в почвенных грунтах ЦЧЗ / Е.В. Малышева //

Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2021. - № 5. - С. 46-53.

99. Мальгин, М.А. Дефицит йода в пищевых цепях Горного Алтая / М.А. Мальгин // Химия в интересах устойчивого развития. - 2001. - №9. - С. 555-566.

100. Мельниченко, Г.А. Йододефицитные заболевания щитовидной железы в Российской Федерации: современное состояние проблемы. Аналитический обзор публикаций и данных официальной государственной статистики (Росстат) / Г.А. Мельниченко, Е.А. Трошина, Н.М. Платонова [и др.] // Consilium Medicum. - 2019. - №21(4). - С. 14-20.

101. Методические рекомендации «МР 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Гигиена питания. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» / В.А. Тутельян, Д.Б. Никитюк, И.В. Аксенов [и др.]. 2021. – 77 с.

102. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / под ред. А.Л. Иванова, Л.М. Державина. - Москва: Минсельхоз РФ РАСХН, 2008. - 392 с.

103. Моисеев, К.Г. Крупномасштабная почвенная карта Меньковского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии / К.Г. Моисеев, Е.Г. Зинчук // Агрофизика. - 2014. - № 3. - С. 8-17.

104. Моисеев, К.Г. Группировка почв землепользования Меньково по гранулометрическому составу / К.Г. Моисеев, Е.Г. Зинчук // Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки: материалы Всероссийской научной конф. с междунар. участием (Санкт-Петербург, 1–2 октября 2020 г.). - Санкт-Петербург: Агрофизический НИИ, 2020. - С. 464-470.

105. Мохнач, В.О. Теоретические основы биологического действия галоидных соединений / В.О. Мохнач. - Ленинград, 1968. - 297 с.

106. Мохнач, В.О. Йод и проблемы жизни / В.О. Мохнач. - Ленинград, 1974. - 253 с.

107. Научные основы эффективного использования агресурсного потенциала Северо-Запада России / под ред. М.В. Архипова. – Санкт-Петербург-Пушкин: СЗЦППО, 2018. - 135с.

108. Нестеров, В.В. Действие некоторых микроэлементов на урожайность и качество сахарной свеклы и картофеля в условиях Бурятии / В.В. Нестеров // Микроэлементы в почвах, водах и организмах Восточной Сибири и Д. Востока и их роль в жизни растений, животных и человека. - Улан-Удэ, 1961. - С. 194-201.

109. Обухова, В.А. Содержание йода в почвах, природных водах и кормах Москворецко-Окской равнины / В.А. Обухова, Д.А. Гололобов // Агрохимия. - 1969. - №5. - С. 106-110.

110. Онучина, О.Л. Методы и результаты селекции клевера лугового на повышенную кислотоустойчивость / О.Л. Онучина, Тумасова М.И. // Кормопроизводство. - 2007. - № 4. - С. 27-28.

111. Онучина, О.Л. Результаты селекции клевера лугового на алюмотолерантность в условиях Северо-Востока европейской части России / О.Л. Онучина, М.Н. Грипась, И.А. Корнева [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. - 2016. - № 6. - С. 20-25.

112. Панасин, В.И. Содержание и распространение йода в экосистемах Калининградской области / В.И. Панасин, Д.А. Рымаренко, В.П. Дедков, Т.А. Саврасова. - Калининград, 2002. - 115 с.

113. Панасин, В.И. Агрохимические особенности распределения йода в почвах агроландшафтов Калининградской области / В.И. Панасин, М.И. Вихман, Д.С. Чечулин, Д.А. Рымаренко // Плодородие. - 2019. - №1. - С. 31-35.

114. Панасин, В.И. Действие йодных микроудобрений на урожай и качество озимого рапса / В.И. Панасин, Д.А. Рымаренко, М.И. Вихман, Д.С. Чечулин // Агрохимический вестник. - 2019. - № 2. - С. 39-41.

115. Пивоваров, В.Ф. Овощи – продукты и сырьё для функционального питания / В.Ф. Пивоваров, О.Н. Пышная, Л.К. Гуркина // Вопросы питания. - 2017. - № 86 (3). - С. 121-127.

116. Пилипенко, Т.В. Формирование качества и потребительских свойств молочных продуктов / Т.В. Пилипенко, Н.И. Пилипенко. Санкт-Петербург: СПбТЭИ, 2007. - 99 с.
117. Платонова, Н.М. Йодный дефицит: решение проблемы в мире и России (25-летний опыт) / Н.М. Платонова, Е.А. Трошина // *Consilium Medicum*. - 2015. - №17(4). - С. 44–50.
118. Плешакова, И.Н., Машкина Е.И. Влияние йодсодержащих препаратов на молочную продуктивность коров / И.Н. Плешакова, Е.И. Машкина // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. - 2019. - № 1 (171). - С. 138-142.
119. Покатилов, Ю.Г. Биогеохимия биосферы и медико-биологические проблемы / Ю.Г. Покатилов. - Новосибирск, 1993. - 165 с.
120. Портянко, В.Ф. Содержание йода в вегетативных и генеративных органах растений / В.Ф. Портянко, А.Е. Костина // *Физиология растений*. - 1968. - Т. 15, № 1. - С. 135-138.
121. Портянко, В.Ф. Влияние йода, брома и хлора на содержание аминокислот в растениях / В.Ф. Портянко, И.И. Лыженко, В.В. Портянко // *Физиология растений*. - 1969. - Т. 16. №5. - С. 885-889.
122. Портянко, В.Ф. Антагонизм галогенов и их поглощение растениями из окружающей среды / В.Ф. Портянко // *Микроэлементы в окружающей среде*. - Киев, 1980. - С. 96-99.
123. Потатуева, Ю.А. Поступление йода в растения при внесении различных доз на основных типах почвы / Ю.А. Потатуева, Р.И. Прокофьева // *Минеральные удобрения и серная кислота*. - Москва, 1970. - Вып. 217. - С. 108-123.
124. Потатуева, Ю.А. Новые комплексные удобрения с добавками микроэлементов / Ю.А. Потатуева, А.Д. Романова, Р.И. Прокофьева // *Биологическая роль микроэлементов и их применение в сельском хозяйстве и медицине*. - Москва, 1974. - С. 227-237.

125. Потатуева, Ю.А. Повышение содержания йода в растениях, имеющих пищевое значение / Ю.А. Потатуева, Р.И. Прокофьева // Микроэлементы в медицине. - 2005. - Т. 6, № 4. - С. 40-42.
126. Проберж, Э.С. Влияние погодных факторов на эффективность удобрений в почвозащитном севообороте / Э.С. Проберж // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2004. №4(4). - С. 20-21.
127. Производство, изучение и применение удобрений на основе птичьего помёта / под общей редакцией А.И. Иванова и В.В. Лапы. – Санкт-Петербург: ФГБНУ АФИ, 2018. - 317 с.
128. Прокошев, В.В. Калийные удобрения – фактор экологический / В.В. Прокошев // Химия в сельском хозяйстве. - 1993. - № 5-6. - С. 17-18.
129. Прокошев, В.В. Использование удобрений для обеспечения устойчивой продуктивности растений и повышения почвенного плодородия / В.В. Прокошев В.А. // Агрохимия. - 1998. - №3. - С. 87-89.
130. Прокошев, В.В. Калий и калийные удобрения / В.В. Прокошев, И.П. Дерюгин. - Москва: Ледум, 2000. - 185 с.
131. Прошкин, В.А. Энергетическая эффективность применения минеральных удобрений / В.А. Прошкин, В.А. Величко // Агрохимический вестник. - 2000. - № 1. - С. 23-26.
132. Пузанов, А.В. Приоритетные микроэлементы (I, Se, Mn, Co, Cu, Zn, Hg) в наземных экосистемах Тувинской горной области: автореферат диссертации на соискание доктора биологических наук / Александр Васильевич Пузанов; Новосибирский гос. аграрный университет. - Новосибирск, 2005. - 43 с.
133. Раващдех, Х. Влияние внекорневых обработок йодом и селеном на урожайность и качество ягод смородины и крыжовника: автореферат диссертации на соискание кандидата сельскохозяйственных наук / Хуссам Раващдех; Московская сельскохозяйственная академия имени К.А.Тимирязева (МСХА). - Москва, 2005. – 23 с.

134. Ранделин, А. В. Влияние видовой и сортовой принадлежности семян на процесс биоконверсии йода / А.В. Ранделин, Е.Ю. Злобина, Н.И. Мосолова, В.А. Парамонов // Аграрный вестник Урала. - 2013. - №9(15). - С. 12-14.
135. Растениеводство Ленинградской области в 2021 году. Статистический сборник. Петростат. - Санкт-Петербург, 2022. - 66 с.
136. Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечернозёмной зоны Российской Федерации до 2030 года. Версия 2.0. / под ред. Митина С.Г., Иванова А.Л. - Москва: ООО «Изд-во МБА», 2021. - 400 с.
137. Розен, Б.Я. Геохимия брома и йода / Б.Я. Розен // Москва: Недра, 1970. - 142 с.
138. Русина, Т.В. Изучение влияния качественного состава йодорганических соединений на доступность почвенного йода растениям / Т.В. Русина // Агрохимия. - 1987. - №5. - С. 81-87.
139. Сагатов, К. Влияние обработки семян кукурузы микроэлементами и янтарной кислотой на ее продуктивность / К. Сагатов // Ботанический журнал. - 1963. - Т. 48. - №8. - С. 1151-1160.
140. Самсонова Л.Н. Профилактика йоддефицитных заболеваний в России: современное состояние проблемы / Л.Н. Самсонова, Э.П. Касаткина // Доктор. Ру. - 2010. - № 7-2 (58). - С. 21-25.
141. Сергеева, Е.М. Метаболизм крахмала у картофеля *Solanum tuberosum* L. / Е.М. Сергеева, К.Т. Ларичев, Е.А. Салина, А.В. Кочетов // Вавиловский журнал генетики и селекции. - 2022. - №26(3). - С. 250-263.
142. Серегина, И.И. Оценка влияния йодида калия на урожайность и устойчивость к засухе яровой пшеницы / И.И. Серегина, Д.М. Ахметжанов // Плодородие. - 2024. - №3. - С. 52-56.
143. Симоненко, Н.К. Уровень минерального питания и качество клубней картофеля / Н.К. Симоненко // Вестник Брянской сельскохозяйственной академии. - 2009. - №4. - С. 7-13.

144. Синдирева, А.В. Влияние различных способов применения йода на рост и химический состав растений овса / А.В. Синдирева, О.И. Курдуманова, О.В. Степанова, И.Б. Гилязова // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. - 2016. - №4(7). С. 1-6.
145. Синдирева, А.В. Экологическая оценка влияния йодсодержащих удобрений на урожайность яровой мягкой пшеницы в условиях южной лесостепи Омской области / А.В. Синдирева, Е.Г. Кекина, О.В. Степанова // Агрономия. 2016. №1(42). С. 41-46.
146. Сиянова, Н.С. Методическое руководство для практикума по биохимии / Н.С. Сиянова, В.И. Хисамутдинова, С.Н. Неуструева. - Казань: Издательство Казанского ун-та, 1988. - С.90 - 94.
147. Скородок, Ю. Л. Дефицит йода в мегаполисе на берегу Финского залива. Миф или реальность? / Ю.Л. Скородок, З.И. Муллахметова, В.Л. Бондаренко [и др.] // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. - 2013. - Т. 9, №2. - С. 36-40.
148. Сою, А.В. Агроклиматические условия Ленинградской области при современных изменениях климата: магистерская диссертация / А.В. Сою. - Санкт-Петербург, СПбГУ. - 2016. - 64 с.
149. Степанова, О.В. Биоэнергетическая эффективность применения йода под яровую пшеницу на лугово-черноземной почве / О.В. Степанова, А.В. Синдирева, О.Д. Шойкин // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. - 2017. - №4 (11).
150. Степанова О.В. Экологическая оценка содержания и действия йода в системе почва-растение в условиях южной лесостепи Западной Сибири: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Ольга Владимировна Степанова; Гос. аграр. университет Северного Зауралья. - Омск, 2018. - 231 с.
151. Стефанишин, С.Е. Микроэлементы как удобрение для картофеля / С.Е. Стефанишин // Реферат докладов межвузов. конф. (Барнаул, 1963 г.). - Москва, 1963. - С. 54-55.

152. Сулейманов, А.С. Влияние различных предпосевных обработок семян сорго на их прорастание и активность ферментов при пониженной температуре / А.С. Сулейманов // Физиология растений. - 1967. - Т. 14, № 1. - С. 151-152.
153. Сысо, А.И. Эколого-агрохимическая оценка содержания микроэлементов в почвах и растительной продукции на Юге Западной Сибири / А.И. Сысо, В.Б. Ильин // Проблемы агрохимии и экологии. - 2008. - № 2. - С. 33-36.
154. Тихомиров, Ф.А. Роль органического вещества в закреплении йода в почвах / Ф.А. Тихомиров, С.В. Каспаров, Б.С. Пристер, В.Г. Сальников // Почвоведение. - 1980. - №2. - С. 54-63.
155. Трошина, Е.А. Зоб / Е.А. Трошина. - Москва: Медицинское информационное агентство, 2012. - 336 с.
156. Трошина, Е.А. Йододефицитные заболевания в Российской Федерации: время принятия решений / Е.А. Трошина, Н.М. Платонова, Ф.М. Абдулхабирова, Г.А. Герасимов; под ред. И.И. Дедова, Г.А. Мельниченко. - Москва: Контин-Принт, 2012. - 232 с.
157. Трошина, Е.А. Аналитический обзор результатов мониторинга основных эпидемиологических характеристик йододефицитных заболеваний у населения Российской Федерации за период 2009-2018 гг. / Е.А. Трошина, Н.М. Платонова, Е.А. Панфилова // Проблемы эндокринологии. - 2021. - Т. 67, №2. - С. 10-19.
158. Трошина, Е.А. Устранение дефицита йода – забота о здоровье нации, экскурс в историю, научные аспекты и современное состояние правового регулирования проблемы в России / Е.А. Трошина // Проблемы эндокринологии. - 2022. - №68(4). - С. 4-12.
159. Фесенко, М.А. О значимости агрометеорологических и техногенных факторов при возделывании культур севооборота на Северо-Западе России / М.А. Фесенко, А.М. Шпанев, В.В. Смур // Научные труды по агрономии. - 2020. - №1(3). - С. 28-32.

160. Фесенко, М.А. Результаты исследований в многолетнем стационарном полевом опыте в семипольном севообороте / М.А. Фесенко, А.И. Иванов, В.Е. Веретebный, В.И. Дубовицкая // Агрофизика. - 2012. - № 3. - С. 50-57.
161. Филиппов, П.А. Комплексная оценка воспроизводства плодородия деградированной супесчаной дерново-подзолистой почвы в современных условиях Северо-Запада РФ: диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Петр Александрович Филиппов; Агрофизический НИИ. - Санкт-Петербург, 2022. - 247 с.
162. Хашимов, Ф.Х. Влияние йода на виноградное растение и почву виноградника / Ф.Х. Хашимов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. – Самарканд, 1971. - 25 с.
163. Хинताल, Т.В. Дефицит йода и йоддефицитные заболевания: актуальность проблемы профилактики и лечение в Российской Федерации / Т.В. Хинताल // Terra medica nova. - 2010. - № 1. - С. 25-28.
164. Ходыревская, Н.Н. Экологический мониторинг йода в биогеоценозах сенокосов Центрального Черноземья: диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Наталья Николаевна Ходыревская; Брянская государственная сельскохозяйственная академия. – Брянск, 2009. - 129 с.
165. Чмелев, Н.П. Эффективность применения микроэлементов в зависимости от содержания подвижных форм их в почве / Н.П. Чмелев // Микроэлементы. - Саратов, 1967. - С. 58-65.
166. Чумаченко, И.Н. Оценка энергетической эффективности минеральных удобрений / И.Н. Чумаченко, В.А. Прошкин // Агрохимический вестник. - 1997. - № 4. - С. 11-17.
167. Шалак, М.В. Применение йодсодержащих препаратов в рационах сухостойных коров / М.В. Шалак, С.Н. Почкина, А.Г. Марусич // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. - 2014. - №17(1). - С. 177-185.

168. Шеуджен, А.Х. Агробиогеохимия / А.Х. Шеуджен. - Краснодар: КубГАУ, 2010. - 877 с.
169. Шеуджен, А.Х. Агрохимия микроэлементов в рисоводстве / А.Х. Шеуджен, Е.М. Харитонов, Х.Д. Хурум, Т.Н. Бондарева. - Майкоп: Афиша, 2006. - 248 с.
170. Шеуджен, А.Х. Агрохимия микроэлементов в рисоводстве / А.Х. Шеуджен // Плодородие. - 2016. - № 5 (92). - С. 22-27.
171. Шеуджен, А.Х. Биогеохимия / А.Х. Шеуджен. - Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2003. - 1028 с.
172. Шеуджен, А.Х. Микроэлементы и формы их соединений в почвах Кубани / А.Х. Шеуджен, З.Д. Хурум, И.А. Лебедевский. - Майкоп: Полиграфиздат «Адыгея», 2008. - 55 с.
173. Школьник, М.Я. Микроэлементы в жизни растений / М.Я. Школьник. - Ленинград: Наука, 1974. - 330 с.
174. Эпштейн, Э. Минеральный обмен / Э. Эпштейн // Биохимия растений. - Москва, 1968. - С. 254-271.
175. Ягодин, Б.А. Влияние меди, цинка, кобальта и йода на азотно-фосфорный обмен и продуктивность хлопчатника в условиях засоления / Б.А. Ягодин, К. Халилов // Агрохимия. - 1979. - №6. - С. 91-95.
176. Яковлева, Е.А. Влияние бора и йода на рост, развитие и урожай риса в условиях Кубани / Е.А. Яковлева, А.Х. Шеуджен // Труды Кубанского государственного аграрного университета. - 2016. - № 63. - С.112-117.
177. Яковлева, Е.А. Об использовании йодных и борных удобрений на посевах риса / Е.А. Яковлева, Т.Н. Бондарева, А.Х. Шеуджен // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: материалы IX Всероссийской конф. молодых ученых (Краснодар, 24-26 ноября 2015 г.). - Краснодар: Кубанский гос. аграрный ун-т им. И.Т. Трубилина, 2016. - С. 62-64.
178. Яковлева, Е.А. Влияние бора и йода на рост и развитие риса, выращиваемого в Красноармейском районе Краснодарского края / Е.А. Яковлева, А.Х. Шеуджен, В.В. Гузик // Научное обеспечение

агропромышленного комплекса: материалы X Всерос. конф. молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко (Краснодар, 26–30 ноября 2016 г.). - Краснодар: Кубанский гос. аграрный ун-т им. И.Т. Трубилина, 2017. - С. 60-61.

179. Яковлева, Е.А. Влияние борных и йодных удобрений на урожайность и качество риса в условиях Кубани: диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Елена Александровна Яковлева; Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. – Краснодар, 2018. - 152 с.

180. Allard, S. Formation of methyl iodide on a natural manganese oxide / S. Allard, Y. Gallard, C. Fontaine, J.-P. Croué // *Water Research*. - 2010. - P. 4623–4629.

181. Altinok, S. Effect of Iodine Treatments on Forage Yields of Alfalfa / S. Altinok, S. Sozudogru-Ok, H. Halilova // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. - 2003. – N 34:1-2. – P. 55-64.

182. Amachi, S. Microbial participation in iodine volatilization from soils / S. Amachi, M. Kasahara, S. Hanada [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2003. – N 37. – P. 3885–3890.

183. Amachi, S. Microbial contribution to global iodine cycling: volatilization, accumulation, reduction, oxidation, and sorption of iodine / S. Amachi // *Microbes and Environments*. - 2008. - N 23. - P. 269–276.

184. Bagwell, C.E. Microbial methylation of iodide in unconfined aquifer sediments at the Hanford Site, USA / C.E. Bagwell, L. Zhong, J.R. Wells [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. - 2019. – N 10, 2460.

185. Blasco, B. Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: potential benefits for cultivation and human health / B. Blasco, J.J. Rios, L.M. Cervilla [et al.] // *Annals of Applied Biology*. - 2008. N 152. – P. 289–299.

186. Bowley, H. Iodine Dynamics In The Terrestrial Environment: Dissertation. Ph.D. thesis / H. Bowley; University of Nottingham. – Nottingham, 2013.

187. Caffagni, A. Iodine fortification plant screening process and accumulation in tomato fruits and potato tubers / A. Caffagni, L. Arru, P. Meriggi [et al.] // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. - 2011. – N 42. - P. 706–718.
188. Cakmak, I. Iodine biofortification of wheat, rice and maize through fertilizer strategy / I. Cakmak, C. Prom-u-thai, L.R.G. Guilherme, A. Rashid // *Plant and Soil*. - 2017. – N 418(Suppl. 2). - P. 1-17.
189. Cakmak, I. Fate and Bioaccessibility of Iodine in Food Prepared from Agronomically Biofortified Wheat and Rice and Impact of Cofertilization with Zinc and Selenium / I. Cakmak, M. Marzorati, P. Van Den Abbeele [et al.] // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. - 2020. – N 68. - P. 1525–1535.
190. Carpenter, L.J. Short-lived alkyl iodides and bromides at Mace Head, Ireland: links to biogenic sources and halogen oxide production / L.J. Carpenter, W.T. Sturgen, S.A. Penkett, P.S. Liss // *Journal of Geophysical Research*. - 1999. - N 104. - P. 1679–89.
191. Dai, J.L. Selecting iodine-enriched vegetables and the residual effect of iodate application to soil / J.L. Dai, Y.G. Zhu, M. Zhang, Y.Z. Huang // *Biological Trace Element Research*. - 2004. – N 101(3). – P. 265-276.
192. Dávila-Rangel, I.E. Iodine Biofortification of Crops / I.E. Dávila-Rangel, P. Leija-Martínez, J. Medrano-Macías [et al.] // In: *Nutritional Quality Improvement in Plants. Concepts and Strategies in Plant Sciences*. P. Jaiwal, A. Chhillar, D. Chaudhary, R. Jaiwal (eds). – Cham: Springer, 2019.
193. Dedov I.I. Assessment of iodine deficiency in certain regions of Russia / I.I. Dedov, N.Yu. Sviridenko, G.A. Gerasimov [et al.] // *Problems of Endocrinology*. - 2000. - N 46(6). - P. 3-7
194. Di Ferdinando, M. Flavonoids as Antioxidants in Plants Under Abiotic Stresses / M. Di Ferdinando, C. Brunetti, A. Fini, M. Tattini // *Abiotic Stress Responses in Plants*. - 2011. - P. 159–179.

195. Dobosy, P. Biofortification of Potato and Carrot With Iodine by Applying Different Soils and Irrigation With Iodine-Containing Water / P. Dobosy, A. Endrédi, S. Sandil [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. - 2020. - N 11, 593047.
196. Duborská, E. Iodine biofortification of vegetables could improve Iodine Supplementation status / E. Duborská, M. Urík, M. Šeda // *Agronomy*. - 2020. – N 10, 1574.
197. Fedak, I.R., Troshina E.A. The problem of iodine deficiency in the Russian Federation and ways of its solution in a number of countries of the world / I.R. Fedak, E.A. Troshina // *Problems of Endocrinology*. - 2007. - N 53(5). - P. 40-48.
198. Franke, K. Influence of various iodine supplementation levels and two different iodine species on the iodine content of the milk of cows fed rapeseed meal or distillers dried grains with solubles as the protein source / K. Franke, U. Meyer, H. Wagner, G. Flachowsky // *J. Dairy Sci.* - 2009. – N 92. - P. 4514-4523.
199. Francois, R. The influence of humic substances on the geochemistry of iodine in nearshore and hemipelagic marine sediments / R. Francois // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. - 1987. – N 51:2417–27.
200. Fuentes, J.E.G. Outcomes of foliar iodine application on growth, minerals and antioxidants in tomato plants under salt stress / J.E.G. Fuentes, B.F.H. Castellanos, E.N.R. Martínez [et al.] // *Folia Horticulturae*. - 2022. – N 34(1). - P. 1-11.
201. Fuge, R. The geochemistry of iodine – a review / R. Fuge, C.C. Johnson // *Environmental Geochemistry and Health*. - 1986. – N 8. - P. 31–54.
202. Fuge, R. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review / R. Fuge, C.C. Johnson // *Applied Geochemistry*. - 2015. – N 63. – P. 282–302.
203. Golubkina, N. Yield, Quality and Antioxidant Properties of Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) in Response to Foliar Biofortification with Selenium and Iodine / N. Golubkina, H. Kekina, G. Caruso // *Plants*. - 2018. – N 7(4), 80.

204. Gonzali, S. Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability / S. Gonzali, C. Kiferle, P. Perata // *Current Opinion in Biotechnology*. - 2017. - N 44. – P. 16–26.
205. Gupta, N. Response of iodine on antioxidant levels of *Glycine max* L. grown under Cd²⁺ stress / N. Gupta, M. Bajpai, R. Majumdar, P. Mishra // *Advances in Biological Research (Rennes)*. - 2015. – N 9. - P. 40–48.
206. Hageman, R.H. Effect of potassium iodide on the ascorbic acid content and growth of tomato plants / R.H. Hageman, E.S. Hodge, J.S. McHargue // *Plant Physiology*. - 1942. - N 17. – P. 465–472.
207. Humphrey, O.S. Iodine uptake, storage and translocation mechanisms in spinach (*Spinacia oleracea* L.) / O.S. Humphrey, S.D. Young, E.H. Bailey [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. - 2019. - N 41(5). – P. 2145-2156.
208. Humphrey, O.S. Short-term iodine dynamics in soil solution / O.S. Humphrey, S.D. Young, E.H. Bailey [et al.] // *Environmental Science & Technology*. - 2020. – N 54. – P. 1443-1450.
209. Hurtevent, P. Translocation of ¹²⁵I, ⁷⁵Se and ³⁶Cl to wheat edible parts following wet foliar contamination under field conditions / P. Hurtevent, Y. Thiry, S. Levchuk [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2013. - N 121. – P. 43–54.
210. Ivanov, A.I. Methodology of the Agrophysical Institute's Modern System of Field Experiments / A.I. Ivanov, Zh.A. Ivanova // *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*. - Springer Nature Switzerland AG, 2021. - Chapter 26. - P. 529-546.
211. Itoh, N. Involvement of S-adenosylmethionine-dependent halide/thiol methyltransferase (HTMT) in methyl halide emissions from agricultural plants: isolation and characterization of an HTMT-coding gene from *Raphanus sativus* (daikon radish) / N. Itoh, H. Toda, M. Matsuda [et al.] // *BMC Plant Biology*. - 2009. – N 9:116.
212. Izydorczyk, G. Biofortification of edible plants with selenium and iodine – A systematic literature review / G. Izydorczyk, B. Ligas, K. Mikula [et al.]

// The Science of the Total Environment. - 2020. - N 754:141983.

213. Jerše, A. Is foliar enrichment of pea plants with iodine and selenium appropriate for production of functional food? / A. Jerše, N.K. Maršić, A. Kroflič [et al.] // Food Chem. - 2018. – N 267. - P. 368-375.

214. Jones, D.L. Organic acids in the rhizosphere—a critical review / D.L. Jones // Plant Soil. - 1998. – N 205. – P. 25–44.

215. Kabata-Pendias, A. Trace elements from soil to human / A. Kabata-Pendias, A.B. Mukherjee. Springer. 2007. 550 p.

216. Kaplan, D.I. Influence of surface charge of a Fe-oxide and an organic matter dominated soil on iodide and pertechnetate sorption / D.I. Kaplan // Radiochimica Acta. – 2003. – N 91. P. 173–178.

217. Kato, S. Rice (*Oryza sativa* L.) roots have iodate reduction activity in response to iodine / S. Kato, T. Wachi, K. Yoshihira [et al.] // Frontiers in Plant Science. - 2013. - N 4. – P. 227.

218. Keppler, F. Organoiodine formation during humification in peatlands / F. Keppler, H. Biester, A. Putschew [et al.] // Environmental Chemistry Letters. - 2004. - N 1. – P. 219–223.

219. Khan, M.K. Wheat biofortification—A potential key to human malnutrition / M.K. Khan, A. Pandey, M.S. Akkaya [et al.] // Journal of Elementology. - 2017. – N 22. – P. 937–944.

220. Kiferle, C. Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants / C. Kiferle, M. Martinelli, A.M. Salzano [et al.] // Frontiers in Plant Science. - 2021. - N 12:616868.

221. Kodama, S. Speciation of iodine in solid environmental samples by iodine K-edge XANES: Application to soils and ferromanganese oxides / S. Kodama, Y. Takahashi, K. Okumura, T. Uruga // Science of The Total Environment. - 2006. – N 363(1-3). – P. 275–284.

222. Landini, M. Iodine biofortification in tomato / M. Landini, S. Gonzali, P. Perata // Journal of Plant Nutrition Soil Science. - 2011. – N 174. – P. 480–486.

223. Landini, M. Metabolic engineering of the iodine content in arabidopsis / M. Landini, S. Gonzali, C. Kiferle [et al.] // Scientific Reports. - 2012. – N 2:338.
224. Lawson, P.G. Soil versus foliar iodine fertilization as a biofortification strategy for field-grown vegetables / P.G. Lawson, D. Daum, R. Czauderna [et al.] // Frontiers in Plant Science. - 2015. - 6:450.
225. Ledwożyw-Smoleń, I. Iodine Biofortification of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Grown in Field / I. Ledwożyw-Smoleń, S. Smoleń, S. Rożek [et al.] // Agronomy. - 2020. – N 10, 1916.
226. Leyva, R. Beneficial effects of exogenous iodine in lettuce plants subjected to salinity stress / R. Leyva, E. Sánchez-Rodríguez, J.J. Ríos [et al.] // Plant Science. - 2011. – N 181. – P. 195–202.
227. Li, R. Iodide and iodate effects on the growth and fruit quality of strawberry / R. Li, H.-P. Liu, C.-L. Hong [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. - 2017. – N 97(1). - P. 230-235.
228. Lima, J.d.S. Soybean Plants Exposed to Low Concentrations of Potassium Iodide Have Better Tolerance to Water Deficit through the Antioxidant Enzymatic System and Photosynthesis Modulation / J.d.S. Lima, O.V.S. Andrade, L.C.d. Santos [et al.] // Plants. - 2023. – N 12(13), 2555.
229. Mackowiak, C.L. Iodine toxicity in a plant-solution system with and without humic acid / C.L. Mackowiak, P.R. Grossl, K.L. Cook // Plant and Soil. - 2005. – N 269. – P. 141–150.
230. Medrano-Macías, J. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops / J. Medrano-Macías, P. Leija-Martínez, S. González-Morales [et al.] // Frontiers in Plant Science. - 2016. – N 7, 1146.
231. Naeem, A. Biofortification of Diverse Basmati Rice Cultivars with Iodine, Selenium, and Zinc by Individual and Cocktail Spray of Micronutrients / A. Naeem, M. Aslam, M. Ahmad [et al.] // Agronomy. - 2022. – N 12(1), 49.
232. Nestel, P. Symposium: Food Fortification in Developing Countries Biofortification of Staple Food Crops / P. Nestel, H.E. Bouis, J.V. Meenakshi, W. Pfeiffer // Journal of Nutrition. - 2006. - N 136. – P. 1064–1067.

233. Ojok, J. Iodine Agronomic Biofortification of Cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) and Cowpea (*Vigna unguiculata* L.) Is Effective under Farmer Field Conditions / J. Ojok, P. Omara, E. Opolot [et al.] // *Agronomy*. - 2019. – N 9(12), 797.
234. Osuna, H.T.G. Iodine Application Increased Ascorbic Acid Content and Modified the Vascular Tissue in *Opuntia ficus-indica* L. Pak / H.T.G. Osuna, A.B. Mendoza, C.R. Morales [et al.] // *Journal of Botany*. - 2014. – N 46. – P. 127–134.
235. Pauwels, G.B. Iodine as a micronutrient for plants / G.B. Pauwels // *Plant and Soil*. - 1961. – N 14. – P. 377-392.
236. Piątkowska, E. The Impact of Carrot Enriched in Iodine through Soil Fertilization on Iodine Concentration and Selected Biochemical Parameters in Wistar Rats / E. Piątkowska, A. Kopec, R. Biezanowska-Kopec [et al.] // *PLoS ONE*. - 2016. – N 11(4):e0152680.
237. Schwehr, K.A. Organo-Iodine Formation in Soils and Aquifer Sediments at Ambient Concentrations / K.A. Schwehr, P.H. Santschi, D.I. Kaplan [et al.] // *Environmental Science and Technology*. - 2009. – N 43. – P. 7258–7264.
238. Sheppard, M.I. Factors affecting the soil sorption of iodine / M.I. Sheppard, D.H. Thibault, J. Mcmurry, P.A. Smith // *Water Air and Soil Pollution*. - 1995. - Vol. 83, N 1–2. - P. 51–67.
239. Smoleń, S. Preliminary evaluation of the influence of soil fertilization and foliar nutrition with iodine on the efficiency of iodine biofortification and chemical composition of lettuce / S. Smoleń, S. Rożek, I. Ledwożyw, P. Strzetelski // *Journal of Elementology*. - 2011. – N 16(4). – P. 613-622.
240. Smoleń, S. Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system / S. Smoleń, I. Kowalska, W. Sady // *Scientia Horticulturae*. - 2014. – N 166. – P. 9–16.
241. Smoleń, S. Quality of fresh and stored carrots depending on iodine and nitrogen fertilization / S. Smoleń, W. Sady, I. Ledwożyw-Smoleń [et al.] // *Food Chemistry*. - 2014. – N 159. – P. 316–322.

242. Smoleń, S. Iodine biofortification with additional application of salicylic acid affects yield and selected parameters of chemical composition of tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.) / S. Smoleń, J. Wierzbińska, W. Sady [et al.] // *Scientia Horticulturae*. - 2015. – N 188. – P. 89–96.
243. Smoleń, S. Effectiveness of enriching lettuce with iodine using 5-iodosalicylic and 3,5-diiodosalicylic acids and the chemical composition of plants depending on the type of soil in a pot experiment / S. Smoleń, I. Kowalska, Ł. Skoczylas [et al.] // *Food Chemistry*. - 2022. - Vol. 382, 132347.
244. Stojšavljević, A. Alteration of Trace Elements in Multinodular Goiter, Thyroid Adenoma, and Thyroid Cancer / A. Stojšavljević, B. Rovčanin, J. Jagodić [et al.] // *Biological Trace Element Research*. - 2021. – N 199(11). – P. 4055-4065.
245. Strzetelski, P. The effect of diverse iodine fertilization on nitrate accumulation and content of selected compounds in radish plants (*Raphanus sativus* L.) / P. Strzetelski, S. Smoleń, S. Rożek, W. Sady // *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*. - 2010. – N 9. - P. 65–73.
246. Taylor, P.N. Global epidemiology of hyperthyroidism and hypothyroidism / P.N. Taylor, D. Albrecht, A. Scholz [et al.] // *Nature Reviews Endocrinology*. - 2018. – N 14(5). – P. 301-316.
247. Wang, L. Naturally occurring organoiodines / L. Wang, X. Zhou, M. Fredimoses [et al.] // *RSC Adv*. - 2014. – N 4. - P. 57350–57376.
248. Warner, J.A. Interaction kinetics of $I_2(aq)$ with substituted phenols and humic substances / J.A. Warner, W.H. Casey, R.A. Dahlgren // *Environmental Science and Technology*. - 2000. – N 34. – P. 3180–3185.
249. White, P.J. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—Iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine / P.J. White, M.R. Broadley // *New Phytologist*. - 2009. – N 182. – P. 49–84.
250. WHO, UNISEF, ICCIDD. Indicator for assessing Iodine Deficiency Disorders and monitoring their elimination / WHO, UNISEF, ICCIDD. Geneva: WHO, WHO/Euro/NUT, 2001. - P. 1–107.

251. Wójcik, P. Preharvest iodine sprays at high rates are more effective in biofortification of apples than soil application / P. Wójcik, M. Wójcik // *Plant and Soil*. - 2021. – P. 1-18.
252. Xu, C. Is soil natural organic matter a sink or source for mobile radioiodine (^{129}I) at the Savannah River Site? / C. Xu, S. Zhang, Yi-F. Ho [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. - 2011. – N 75. - P. 5717-5735.
253. Yamada, H. Speciation of iodine in soils / H. Yamada, T. Kiriya, Y. Onagawa [et al.] // *Soil Science and Plant Nutrition*. - 1999. – N 45. – P. 563–568.
254. Yamada, H. Identification of organically bound iodine in soil humic substances by size exclusion chromatography/inductively coupled plasma mass spectrometry (SEC/ICP-MS) / H. Yamada, I. Hisamori, K. Yonebayashi // *Soil Science and Plant Nutrition*. - 2002. – N 48. – P. 379–385.
255. Yamagami, M. Effect of rice plant root ttc-reducing activity on the chemical form of iodine in cultivated soil solutions / M. Yamagami, M. Yanai // *Radiation Protection Dosimetry*. - 2022. - N 198 (13-15). - P. 1189-1195.
256. Yamaguchi, N. Redox reaction of iodine in paddy soil investigated by field observation and I K-edge XANES spectroscopy / N. Yamaguchi, M. Nakano, H. Tanida, H. Fujiwara // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2006. – N 86. – P. 212–226.
257. Yamaguchi, N. Inorganic iodine incorporation into soil organic matter: evidence from iodine K-edge X-ray absorption near-edge structure / N. Yamaguchi, M. Nakano, R. Takamatsu, H. Tanida // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2010. – N 101(6). – P. 451-457.
258. Yanai, M. Iodine absorption by apple leaf surfaces / M. Yanai, H. Kawabata, Y. Takaku // *Radiation Protection Dosimetry*. - 2022. - Vol. 198, Issue 13-15. - P. 1200-1204.
259. Yuita, K. Dynamics of iodine, bromine, and chlorine in soil .2. Chemical forms of iodine in soil solutions / K. Yuita // *Soil Science and Plant Nutrition*. - 1992. – N 38. – P. 281–287.

260. Zimmermann, M.B. Prevalence of iodine deficiency in Europe in 2010 / M.B. Zimmermann, M. Andersson // *Ann. Endocrinol.* - 2011. - N 72(2). - P. 164-6.
261. Бюллетень «Посевные площади Российской Федерации в 2024 году (весеннего учета)». Федеральная служба государственной статистики. 1999-2024. – URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 21.09.2024)

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Перечень йодированных пептидов и белков

Таблица А1 - Перечень йодированных пептидов и соответствующих белков в листьях *A. thaliana* по данным базы The Arabidopsis Information Resource (TAIR) (по Kiferle et al., 2021)

Protein accession	Description	Iodinated sequence	Iodinated site	Dataset
ATCG00120.1	ATP synthase subunit alpha	EAYPGDVFYLSR	[Y3]	ChlorBN
		SVYEPLQTGLIAIDSMPIGR	[Y3]	ChlorBN
ATCG00480.1	ATP synthase subunit beta	GIYPAVDPLDSTSTMLQPR	[Y3]	ChlorBN
		GSITSIQAVYVPADDLTDPAPATTFAH	[Y10]	
		LDATTVLSR	]	ChlorBN
				ChlorBN,
		IVGEEHYETAQQVK	[Y7]	Ch
		VALVYGQMNEPPGAR	[Y5]	ChlorBN
			[Y11]	
		VGLTALTMMAEYFR	]	ChlorBN
AT4G04640.1	ATPase, F1 complex, gamma subunit protein	GLGLEYSVISVGK	[Y6]	ChlorBN
	Chlorophyll A/B binding protein 3	YLGPFSGESPSYLTGEFPGDYGWDTA		
AT1G29910.1	Cupredoxin superfamily protein	GLSADPETFAR	[Y1]	ChlorBN
AT1G20340.1	Ferredoxin-NADP(+)-oxidoreductase 1	NNAGYPHNVVFEDEIPSGVDVAK	[H7]	CAU, Ros
AT5G66190.1	Fructose-bisphosphate aldolase 2	LVYTNDGGEIVK	[Y3]	ChlorBN
AT4G38970.1	FtsH extracellular protease family	ATPEQVAAYTLK	[Y9]	ChlorBN
AT5G42270.1	Glycosyl hydrolase superfamily protein	DYSMATADVVDAAEVR	[Y2]	ChlorBN
AT3G09260.1	Light harvesting complex of photosystem II 5	CSSYVNAK	[Y4]	ChlorBN
			[Y15]	
AT4G10340.1	Light-harvesting chlorophyll B-binding protein 3	SEIPEYLNAGEVAGDYGYPFGLGK	]	ChlorBN
		YLGPFVQTPSYLTGEFPGDYGWDTA	[Y21]	
AT5G54270.1	Light-harvesting chlorophyll-protein complex	GLSADPEAFK	]	ChlorBN
		YLGPFSGEPPSYLTGEFPGDYGWDTA	[Y12]	ChlorBN,
AT2G34430.1	II subunit B1	GLSADPETFAR	]	PXD0107
				30, LFD

AT2G24940.1	Membrane-associated progesterone binding protein 2	SFYGSGGDYSMFAGK	[Y3] [Y20]	Ros
AT4G22890.1	PGR5-LIKE A	FLEASMAYVSGNPILNDEEYDKLK	]	ChlorBN
ATCG00540.1	Photosynthetic electron transfer A	GGYEITIVDASNGR	[Y3]	ChlorBN
AT4G03280.1	Photosynthetic electron transfer C	GDPTYLVVENDK	[Y5]	ChlorBN
AT4G28750.1	Photosystem I reaction centre subunit IV/PsaE protein	VNYANISTNNYALDEVVEEVAA	[Y3]	ChlorBN
AT2G20260.1	Photosystem I subunit E-2	VNYANISTNNYALDEVVEVK	[Y3]	ChlorBN
AT1G31330.1	Photosystem I subunit F	LYAPESAPALALNAQIEK	[Y2]	ChlorBN, Ros
AT1G52230.1	Photosystem I subunit H2	SVYFDLEDLGNTTGQWDVYGS DAPS	[Y19]	
ATCG00340.1	Photosystem I, PsaA/PsaB protein	PYNPLQSK	]	ChlorBN
AT1G03600.1	Photosystem II family protein	TSYGFDVLLSSTSGPAFNAGR	[Y3]	ChlorBN
AT1G06680.1	Photosystem II subunit P-1	DIYSALNAVSGHYVSFGPTAPIPAK	[Y3]	ChlorBN, ChlorBN, PXD0107
AT1G79040.1	Photosystem II subunit R	SITDYGSPEEFLSQVNYLLGK	[Y5] [Y12]	30
AT2G05100.1	Photosystem II light harvesting complex gene 2.1	YGANVDGYSPIYNENEWSASGDVYK	]	ChlorBN
AT2G20890.1	Photosystem II reaction centre PSB29 protein	STPQSIWYGPDPRK	[Y8]	ChlorBN
AT2G30790.1	Photosystem II subunit P-2	YLGPFSENTPSYLTGEYPGDYGWDT	[Y12]	
AT3G50820.1	Photosystem II subunit O-2	AGLSADPETFAK	]	ChlorBN
AT4G05180.1	Photosystem II subunit Q-2	AYIEALNEDPK	[Y2]	ChlorBN
AT4G21280.1	Photosystem II subunit QA	SITDYGSPEQFLSQVNYLLGK	[Y5]	ChlorBN, ChlorBN, Chlo3516
		GGSTGYDNAVALPAGGR	[Y6]	
		YYSETVSSLNNVLAK	[Y2]	ChlorBN
			[Y10]	
		LFDTIDNLDYAAK	]	ChlorBN
		YYAETVSALNEVLAK	[Y2]	ChlorBN

ATCG00020.1	Photosystem II reaction centre protein A	ETTENESANEGYR FGQEEETYNIVAAHGYFGR	[Y12] [Y8]	ChlorBN, TMAR ChlorBN
ATCG00270.1	Photosystem II reaction centre protein D	AAEDPEFETFYTK	[Y11]	ChlorBN
ATCG00280.1	Photosystem II reaction centre protein C	DIQPWQERRSAEYMTHAPLGSLNSV GGVATEINAVNYVSPR RSAEYMTHAPLGSLNSVGGVATEINA VNYVSPR SAEYMTHAPLGSLNSVGGVATEINA VNYVSPR	[H16] [H8] [H7]	LFD CAU, Ros ChlorBN, LFP ChlorBN, TMAR,
ATCG00680.1	Photosystem II reaction centre protein B	LAFYDYIGNNPAK YQWDQGYFQQEYR	[Y4] [Y7] [Y12]	CAU, Ros ChlorBN ChlorBN
AT5G07020.1	Proline-rich family protein	AVDYSGPSLSYYINK	[Y12]	ChlorBN
AT1G74470.1	Pyridine nucleotide- disulphide oxidoreductase	SIDAGDYDYAIAFQER	[Y7]	ChlorBN CLLF, LFD, LFP,
ATMG00280.1	Ribulose biphosphate carboxylase large chain, catalytic domain	GGLYFTKDDENVNSQPFMR	[Y4]	LFPT ChlorBN,
AT1G67090.1	Ribulose biphosphate carboxylase small chain 1A	EYPNAFIR	[Y2]	CAU, Ros ChlorBN, Chlo1054
ATCG00490.1	Ribulose biphosphate carboxylase	GHYLNATAGTCEEMIKR LTYYTPEYETKDTDILAAFR	[Y3] [Y8]	5, CAU CAU, Ros
AT1G71500.1	Rieske (2Fe-2S)domain- containing protein	SPAEGAYSEGLLNAR	[Y7]	ChlorBN
AT2G39730.1	Rubisco activase	GLAYDTSDDQQDITR	[Y4]	ChlorBN
AT1G54780.1	Thylakoid lumen 18.3kDa protein	ADAFEYADQVLEK ETYVVDDAGVLSR	[Y6] [Y3]	ChlorBN ChlorBN

Таблица А2 – Перечень йодированных пептидов и соответствующих белков в корнях *A. thaliana* по данным базы The Arabidopsis Information Resource (TAIR) (по Kiferle et al., 2021)

Protein accession	Description	Iodinated sequence	Iodinated site	Dataset
AT5G09810.1	Actin 7	NYELPDGQVITIGAER	[Y2]	Root
AT1G28290.1	Arabinogalactan protein 31	NGYFLLLAPK	[Y3]	RT
AT5G08680.1	ATP synthase alpha/beta family protein	VGLTGLTVAEYFR	[Y11]	Root RT, RTTP,
AT1G45130.1	Beta-galactosidase 5	YDEDIATYGNR	[Y1]	RTUZ
AT2G43610.1	Chitinase family protein	YCSPSTTYPCQPGK	[Y1]	Root
AT3G43670.1	Copper amine oxidase family protein	GTAYENVEDLGEK	[Y4]	RT, RTUZ Root, RT,
AT1G78850.1	D-mannose binding lectin protein	TGDSSLVAYVK	[Y9]	RTTP
AT5G20080.1	FAD/NAD(P)-binding oxidoreductase	IFYTVDNPTK	[Y3]	Root
AT4G20830.1	FAD-binding Berberine family protein	DVDIGVNDHGANSYK	[Y14]	RTTP
AT5G44380.1	FAD-binding Berberine family protein	YGLAGDNVLDVK	[Y1]	RTUZ
AT5G50950.1	FUMARASE 2	IGYDNAAAVAK	[Y3]	Root
AT3G04120.1	Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase C sub 1	LKGILGYTEDDVVSTDFVGDNR	[Y7]	RT, RTTP, RTUZ
AT4G16260.1	Glycosyl hydrolase superfamily protein	AFYTNLASR	[Y3]	Root
AT3G13790.1	Glycosyl hydrolase superfamily 32 protein	HDYYTIGTYDR	[Y4]	RT, RTUZ
AT3G19390.1	Granulin repeat cysteine protease family protein	VVTIDGYEDVPQNDEK	[Y7]	Root
AT3G12580.1	Heat shock protein 70	NALENYAYNMR	[Y6]	Root
AT5G42020.1	Heat shock protein 70 (Hsp 70) family protein	NALETYVYNMK	[Y8]	Root
AT3G16430.1	Jacalin-related lectin 31	VYVGQAQDGISAVK	[Y2]	Root
AT2G22170.1	Lipase/lipoxygenase, PLAT/LH2 family protein	VYDKYGDYIGIR	[Y8]	Root

AT3G16460.1	Mannose-binding lectin superfamily protein	IYASYGGEGIQYVK	[Y5]	Root
AT3G48890.1	Membrane-associated progesterone binding protein 3	MFYGPGGPYALFAGK	[Y3]	Root
AT4G19410.1	Pectinacetylerase family protein	DITGGSYIQSYYSK	[Y7]	RT
AT4G30170.1	Peroxidase family protein	EVVVLTTGGPSYPVELGR	[Y11]	Root, RT, RTUZ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Метеоусловия в вегетационные периоды 2018 - 2022 гг.

Месяц	Апрель				Май				Июнь				Июль				Август			
	I	II	III	За месяц	I	II	III	За месяц	I	II	III	За месяц	I	II	III	За месяц	I	II	III	За месяц
Декада																				
2018	t, °C	3,7	7,3	6	5,7	10,5	15,7	15,7	14	12,4	17	15,8	15,1	14,5	21,6	21,2	19,1	20,6	16,6	15,3
	Осад	16,6	12,2	18,5	47,3	4,7	12,4	0	17,1	0,8	11,1	10,5	22,4	54,3	1,5	61,8	117,6	3	32,8	64,5
	ГТК	-	-	-	-	0,4	0,8	-	0,4	-	0,7	0,7	0,5	3,7	0,1	2,7	2	0,1	2	3,8
2019	t, °C	4,3	4,8	10,7	6,6	7,1	13,6	13,4	11,4	19,4	17,8	16,3	17,8	14,1	13,9	17	15	14,2	16,9	16,9
	Осад	13,5	7,4	0	20,9	49,4	16,1	17,4	82,9	2,2	0,4	6,8	9,4	99,3	68,5	4,8	172,6	5,3	22,5	33,1
	ГТК	-	-	-	-	6,9	1,2	1,2	2,3	0,1	0	0,4	0,2	7	4,9	0,3	3,7	0,4	1,3	1,8
2020	t, °C	3,7	2,5	3,3	3,1	9,3	5,7	11,5	8,8	15,3	19,4	19,6	18,1	16,6	17	15,9	16,5	18,2	15,8	15,4
	Осад	31,5	60,2	19,7	111,4	14,3	44,6	21,1	80	28,5	7,2	3,2	38,9	49,2	28,3	90,2	167,7	21,5	0	163,9
	ГТК	-	-	-	-	1,5	-	1,7	2,9	1,9	0,4	0,2	0,7	2,9	1,7	5,1	3,3	1,2	-	9,6
	t, °C	2,3	7,6	3,8	4,5	5,3	16,5	10,5	10,7	17,3	18,9	22,9	19,7	22,1	22,8	18,4	21,1	16,4	16,8	13
	Осад	9	0	51,6	60,6	105	71,8	68,7	245,5	0	1,4	27,6	29	3,7	3	29,5	36,2	135	19,4	36,1
	ГТК	-	-	-	-	-	4,3	6	5	-	0,1	1,2	0,5	0,2	0,1	1,5	0,6	6,1	1,1	2,5
2022	t, °C	0,3	4,2	5,1	3,2	7,1	9,4	11,3	9,2	15,6	14,5	20,3	16,8	19,7	16,2	18,2	18	17,1	20,2	18
	Осад	23,1	2,9	21,5	47,5	2,4	7,2	19,9	29,5	15	73,1	-	88,1	10,8	82,9	16	109,7	87	-	29
	ГТК	-	-	-	-	0,3	0,8	1,6	1	1	5	-	1,7	0,5	5,1	0,8	2	5,1	-	1,5
																				2

**ПРИЛОЖЕНИЕ В – Технологические карты применения йодной подкормки и
уборки дополнительного урожая**

**Таблица В1 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,04
% KI в варианте NPK1 при возделывании картофеля в 2018 году (1-й опыт)**

Наименование работ	Объём работ,	Состав агрегата		Персонал		Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда			Затраты ГСМ		Электроэнергия		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие	механизаторы, чел.	рабочие, чел.			механизаторы, чел.ч	рабочие, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	КВт-ч	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м3	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	0	2,40	0,13	0,13	0,00	5,38	0,69	34,38	0,00	0,00	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	0	4,00	0,25	0,25	0,00	10,75	1,38	68,75	0,00	0,00	126	31,50
Уборка картофеля	1,6	МТЗ-82	КПК-2А	1	5	6,20	0,26	0,26	1,29	53,68	2,40	126,48	0,00	0,00	705	181,94
Транспортировка картофеля	1,6	МТЗ-80	2ПТС-4	1	0	8,00	0,20	0,20	0,00	8,60	1,60	84,32	0,00	0,00	136	27,20
Сортировка, закладка на хранение картофеля	1,6	RH-24-60	0	1	3	4,50	0,36	0,36	1,07	50,49	0,00	0,00	5,33	58,61	410	145,78
Всего:							1,19	1,19	2,36	128,89	6,06	313,93	5,33	58,61		402,04

**Таблица В2 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,02
% KI в варианте NPK1 при возделывании картофеля в 2018 году (1-й опыт)**

Наименование работ	Объём работ,	Состав агрегата		Персонал		Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда			Затраты ГСМ		Электроэнергия		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие	механизаторы, чел.	рабочие, чел.			механизаторы, чел.ч	рабочие, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	КВт-ч	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м3	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	0	2,40	0,13	0,13	0,00	5,38	0,69	34,38	0,00	0,00	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	0	4,00	0,25	0,25	0,00	10,75	1,38	68,75	0,00	0,00	126	31,50
Уборка картофеля	9,28	МТЗ-82	КПК-2А	1	5	6,20	1,50	1,50	7,48	311,33	13,92	733,58	0,00	0,00	705	1055,23
Транспортировка картофеля	9,28	МТЗ-80	2ПТС-4	1	0	8,00	1,16	1,16	0,00	49,88	9,28	489,06	0,00	0,00	136	157,76
Сортировка, закладка на хранение картофеля	9,28	RH-24-60	0	1	3	4,50	2,06	2,06	6,19	292,84	0,00	0,00	30,90	339,93	410	845,51
Всего:							5,09	5,09	13,67	670,17	25,26	1325,77	30,90	339,93		2105,62

Таблица В3 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,02 % KI в варианте NPK2 при возделывании картофеля в 2018 году (1-й опыт)

Наименование работ	Объём работ, т	Состав агрегата		Персонал		Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда			Затраты ГСМ		Электроэнергия		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие	механизаторы, чел.	рабочие, чел.			механизаторы, чел.ч	рабочие, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	кВт-ч	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м3	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	0	2,40	0,13	0,13	0,00	5,38	0,69	34,38	0,00	0,00	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	0	4,00	0,25	0,25	0,00	10,75	1,38	68,75	0,00	0,00	126	31,50
Уборка картофеля	4,93	МТЗ-82	КПК-2А	1	5	6,20	0,80	0,80	3,98	165,39	7,40	389,72	0,00	0,00	705	560,59
Транспортировка картофеля	4,93	МТЗ-80	2ПТС-4	1	0	8,00	0,62	0,62	0,00	26,50	4,93	259,81	0,00	0,00	136	83,81
Сортировка, закладка на хранение картофеля	4,93	RH-24-60	0	1	3	4,50	1,10	1,10	3,29	155,57	0,00	0,00	16,42	180,59	410	449,18
Всего:							2,88	2,88	7,26	363,59	14,39	752,65	16,42	180,59		1140,70

Таблица В4 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,16 % KI в варианте NPK0 при возделывании однолетних трав в 2019 году (1-й опыт)

Наименование работ	Объём работ, т	Состав агрегата		Персонал	Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда		Затраты ГСМ		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие				механизаторы, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м3	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	2,40	0,13	0,13	5,38	0,69	34,38	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	4,00	0,25	0,25	10,75	1,38	68,75	126	31,50
Скашивание трав (т, сена)	3,69	МТЗ-80	КРН-2,1	1	2,80	1,32	1,32	56,67	9,75	513,94	120	158,14
Сгребание трав	3,69	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,50	0,43	0,43	18,67	3,21	169,30	262	113,74
Ворошение	3,69	МТЗ-82	ГВР-6,0	1	8,50	0,43	0,43	18,67	3,21	169,30	324	140,65
Сгребание трав	3,69	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,50	0,43	0,43	18,67	3,21	169,30	262	113,74
Прессование сена	1,70	МТЗ-82	Claas R66	1	5,70	0,30	0,30	12,80	2,47	130,23	136	40,49
Погрузка сена	1,70	МТЗ-82	ПВ	1	25,00	0,07	0,07	2,92	0,58	30,55	109	7,40
Перевозка рулонов	1,70	МТЗ-80	2ПТС-4	1	7,20	0,24	0,24	10,13	1,74	91,92	136	32,05
Закладка на хранение и реализация	1,70	МТЗ-82	ПВ	2	25,00	0,07	0,14	5,84	1,16	61,10	136	18,46
Всего:						3,66	3,73	160,49	27,41	1438,75		671,81

Таблица В5 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,16 % КІ в варианте NPK1 при возделывании однолетних трав в 2019 году (1-й опыт)

Наименование работ	Объём работ, т	Состав агрегата		Персонал механизаторы, чел.	Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда		Затраты ГСМ		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие				механизаторы, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м ³	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	2,40	0,13	0,13	5,38	0,69	34,38	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	4,00	0,25	0,25	10,75	1,38	68,75	126	31,50
Скашивание трав (т, сена)	3,34	МТЗ-80	КРН-2,1	1	2,80	1,19	1,19	51,29	8,83	465,19	120	143,14
Сгребание трав	3,34	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,50	0,39	0,39	16,90	2,91	153,24	262	102,95
Ворошение	3,34	МТЗ-82	ГВР-6,0	1	8,50	0,39	0,39	16,90	2,91	153,24	324	127,31
Сгребание трав	3,34	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,50	0,39	0,39	16,90	2,91	153,24	262	102,95
Прессование сена	1,54	МТЗ-82	Claas R66	1	5,70	0,27	0,27	11,62	2,24	118,18	136	36,74
Погрузка сена	1,54	МТЗ-82	ПВ	1	25,00	0,06	0,06	2,65	0,53	27,72	109	6,71
Перевозка рулонов	1,54	МТЗ-80	2ПТС-4	1	7,20	0,21	0,21	9,20	1,58	83,41	136	29,09
Закладка на хранение и реализация	1,54	МТЗ-82	ПВ	2	25,00	0,06	0,12	5,30	1,05	55,45	136	16,76
Всего:						3,35	3,42	146,87	25,02	1312,79		612,78

Таблица В6 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,08 % КІ в варианте NPK2 при возделывании однолетних трав в 2019 году (1-й опыт)

Наименование работ	Объём работ, т	Состав агрегата		Персонал механизаторы, чел.	Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда		Затраты ГСМ		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие				механизаторы, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м ³	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	2,40	0,13	0,13	5,38	0,69	34,38	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	4,00	0,25	0,25	10,75	1,38	68,75	126	31,50
Скашивание трав (т, сена)	1,3	МТЗ-80	КРН-2,1	1	2,80	0,46	0,46	19,96	3,44	181,06	120	55,71
Сгребание трав	1,3	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,50	0,15	0,15	6,58	1,13	59,64	262	40,07
Ворошение	1,3	МТЗ-82	ГВР-6,0	1	8,50	0,15	0,15	6,58	1,13	59,64	324	49,55
Сгребание трав	1,3	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,50	0,15	0,15	6,58	1,13	59,64	262	40,07
Прессование сена	0,60	МТЗ-82	Claas R66	1	5,70	0,11	0,11	4,53	0,87	46,04	136	14,32
Погрузка сена	0,60	МТЗ-82	ПВ	1	25,00	0,02	0,02	1,03	0,20	10,80	109	2,62
Перевозка рулонов	0,60	МТЗ-80	2ПТС-4	1	7,20	0,08	0,08	3,58	0,62	32,50	136	11,33
Закладка на хранение и реализация	0,60	МТЗ-82	ПВ	2	25,00	0,02	0,05	2,06	0,41	21,60	136	6,53
Всего:						1,53	1,56	67,02	11,00	574,06		267,33

Таблица В7 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,08 % КИ на среднеоккультуренной почве на многолетних травах (в среднем за 2 года)

Наименование работ	Объём работ, т	Состав агрегата		Персонал механизаторы, чел.	Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда		Затраты ГСМ		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие				механизаторы, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м ³	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	2,4	0,13	0,13	5,38	0,69	34,38	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	4,0	0,25	0,25	10,75	1,38	68,75	126	31,50
Скашивание трав (т, сена)	4,09	МТЗ-80	КРН-2,1	1	2,8	1,46	1,46	62,81	10,81	569,65	120	175,29
Сгребание трав	4,09	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,5	0,48	0,48	20,69	3,56	187,65	262	126,07
Ворошение	4,09	МТЗ-82	ГВР-6,0	1	8,5	0,48	0,48	20,69	3,56	187,65	324	155,90
Сгребание трав	4,09	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,5	0,48	0,48	20,69	3,56	187,65	262	126,07
Прессование сена	0,94	МТЗ-82	Claas R66	1	5,7	0,16	0,16	7,09	1,37	72,13	136	22,43
Погрузка сена	0,94	МТЗ-82	ПВ	1	25,0	0,04	0,04	1,62	0,32	16,92	109	4,10
Перевозка рулонов	0,94	МТЗ-80	2ПТС-4	1	7,2	0,13	0,13	5,61	0,97	50,91	136	17,76
Закладка на хранение и реализация	0,94	МТЗ-82	ПВ	2	25,0	0,04	0,08	3,23	0,64	33,84	136	10,23
Всего:						3,65	3,69	158,56	26,85	1409,54		684,96

Таблица В8 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,08 % КИ на хорошо окультуренной почве на многолетних травах (в среднем за 2 года)

Наименование работ	Объём работ, т	Состав агрегата		Персонал механизаторы, чел.	Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда		Затраты ГСМ		Амортизация техники	
		энерг. средств	орудие				механизаторы, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м ³	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	2,4	0,13	0,13	5,38	0,69	34,38	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	4,0	0,25	0,25	10,75	1,38	68,75	126	31,50
Скашивание трав (т, сена)	5,97	МТЗ-80	КРН-2,1	1	2,8	2,13	2,13	91,68	15,78	831,49	120	255,86
Сгребание трав	5,97	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,5	0,70	0,70	30,20	5,20	273,90	262	184,02
Ворошение	5,97	МТЗ-82	ГВР-6,0	1	8,5	0,70	0,70	30,20	5,20	273,90	324	227,56
Сгребание трав	5,97	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,5	0,70	0,70	30,20	5,20	273,90	262	184,02
Прессование сена	1,38	МТЗ-82	Claas R66	1	5,7	0,24	0,24	10,41	2,01	105,90	136	32,93
Погрузка сена	1,38	МТЗ-82	ПВ	1	25,0	0,06	0,06	2,37	0,47	24,84	109	6,02
Перевозка рулонов	1,38	МТЗ-80	2ПТС-4	1	7,2	0,19	0,19	8,24	1,42	74,75	136	26,07
Закладка на хранение и реализация	1,38	МТЗ-82	ПВ	2	25,0	0,06	0,11	4,75	0,94	49,69	136	15,01
Всего:						5,16	5,21	224,18	38,27	2011,50		978,60

Таблица В9 – Энергетические затраты на технологические процессы при применении 0,16 % КІ на высококультуренной почве на многолетних травах (в среднем за 2 года)

Наименование работ	Объём работ, о	Состав агрегата		Персонал механизаторы, чел.	Норма выработки за 1 час, га, т	Часов в объёме работ	Затраты труда		Затраты ГСМ		Амортизация техники	
		энерг. средств, о	орудие				механизаторы, чел.ч	Всего, МДж	Всего, кг	МДж	МДж/ч	Итого, МДж
Транспортировка и заправка водой, м3	0,3	МТЗ-80	ЖТ-Ф-6	1	2,4	0,13	0,13	5,38	0,69	34,38	125	15,63
Опрыскивание посева (га)	1	МТЗ-80	ОПШ-15	1	4,0	0,25	0,25	10,75	1,38	68,75	126	31,50
Скашивание трав (т, сена)	6,05	МТЗ-80	КРН-2,1	1	2,8	2,16	2,16	92,91	15,99	842,64	120	259,29
Сгребание трав	6,05	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,5	0,71	0,71	30,61	5,27	277,57	262	186,48
Ворошение	6,05	МТЗ-82	ГВР-6,0	1	8,5	0,71	0,71	30,61	5,27	277,57	324	230,61
Сгребание трав	6,05	МТЗ-80	ГВР-6,0	1	8,5	0,71	0,71	30,61	5,27	277,57	262	186,48
Прессование сена	1,39	МТЗ-82	Claas R66	1	5,7	0,24	0,24	10,49	2,02	106,67	136	33,16
Погрузка сена	1,39	МТЗ-82	ПВ	1	25,0	0,06	0,06	2,39	0,47	25,02	109	6,06
Перевозка рулонов	1,39	МТЗ-80	2ПТС-4	1	7,2	0,19	0,19	8,30	1,43	75,29	136	26,26
Закладка на хранение и реализация	1,39	МТЗ-82	ПВ	2	25,0	0,06	0,11	4,78	0,95	50,05	136	15,12
Всего:						5,22	5,27	226,81	38,73	2035,51		990,59