

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Красноярский государственный аграрный университет»

На правах рукописи

Абакумова Наталья Викторовна

**АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ
МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ
СИСТЕМЫ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ**

1.5.15. - Экология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук,
профессор
Кураченко Наталья Леонидовна

Красноярск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ.....	11
1.1 Состояние, проблемы и перспективы биологизации земледелия.....	11
1.2 Экологическая роль микроводорослей рода <i>Chlorella</i> и <i>Arthrospira</i> в экосистемах.....	18
ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ, МЕТОДЫ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	34
2.1 Объекты и методика проведения исследований.....	34
2.2 Методы аналитических исследований.....	44
2.3 Погодные условия в годы проведения исследований.....	45
ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИНОКУЛЯТА МИКРОВОДОРΟΣЛИ <i>CLORELLA VULGARIS</i> И ЦИАНОБАКТЕРИИ <i>ARTROSPIRA PLATENSIS</i>	51
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ ФОРМ БИОПРЕПАРАТОВ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР.....	66
4.1 Действие культуры микроводоросли на ростовые процессы в начальной стадии развития сельскохозяйственных культур.....	66
4.2 Влияние биопрепаратов на основе микроводоросли <i>Chlorella vulgaris</i> на физиологические и биометрические показатели растений кабачка и огурца	69
4.3 Влияние биопрепаратов на основе микроводорослей <i>Chlorella vulgaris</i> и <i>Arthrospira platensis</i> на физиологические и биометрические показатели растений огурца.....	75
4.4 Действие биопрепаратов на основе культуры микроводоросли <i>Chlorella vulgaris</i> на продуктивность томата	80
ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ СРОКОВ ПРИМЕНЕНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОВОДОРΟΣЛИ <i>CHLORELLA VULGARIS</i> НА СВОЙСТВА АГРОЧЕРНОЗЕМА И УРОЖАЙНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ.....	89
5.1 Агрофизические свойства	89
5.2 Гумусное состояние агрочернозема	98
5.3 Агрохимическое состояние агрочернозема.....	104

5.4 Биологическая активность почвы.....	114
5.5 Продуктивность яровой пшеницы.....	122
ГЛАВА 6 АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ФОРМ БИОПРЕПАРАТОВ НА СИСТЕМУ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ.....	127
6.1 Агрофизические свойства	127
6.2 Гумусное состояние агрочернозема	141
6.3 Агрохимическое состояние агрочернозема.....	161
6.4 Биологическая активность почвы.....	195
6.5 Продуктивность яровой пшеницы.....	207
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	213
ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ.....	216
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	217
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	258
Приложение 1 – Содержание агрономически ценных фракций и плотность агрочернозема в агроценозе пшеницы.....	258
Приложение 2 – Влажность и запасы продуктивной влаги в агрочерноземе агроценоза пшеницы.....	259
Приложение 3 – Содержание гумусовых веществ в агрочерноземе агроценоза пшеницы.....	260
Приложение 4 – Реакция среды и содержание Nобщ в агрочернозёме.....	261
Приложение 5 – Содержание гидролизующих форм азота в агрочернозёме.....	262
Приложение 6 – Содержание минеральных форм азота в агрочернозёме.....	263
Приложение 7 – Содержание подвижного фосфора и обменного калия в агрочерноземе агроценоза пшеницы.....	264
Приложение 8 – Потенциальная интенсивность дыхания и протеазная активность агрочернозема в агроценозе пшеницы.....	265
Приложение 9 – Уреазная и каталазная активность агрочернозема в агроценозе пшеницы.....	266
Приложение 10 – Статистические параметры содержания Cгк в агрочерноземе.....	267
Приложение 11 – Статистические параметры содержания Cфк в агрочерноземе.....	268

Приложение 12 – Урожайность яровой пшеницы.....	269
Приложение 13 – Акт внедрения результатов научных исследований.....	270

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Продовольственная и экологическая проблемы в списке глобальных угроз человечеству имеют наибольшее влияние на стратегические планы развития большинства государств. Недостаток продовольствия на планете усугубляется глобальными изменениями в биосфере. Внедрение методов биологизации, направленных на восстановление плодородия почв - решения проблемы. Альгологические препараты позволяют осуществить комплексный подход к проблеме восстановления почвы и эффективности сельскохозяйственного производства.

Микроводоросли *Chlorella* и *Arthrospira* считаются наиболее перспективными благодаря высокой пищевой ценности, широкой толерантности к изменениям внешней среды и продуцентной роли в экосистеме (Шалыго, Мельников, 2009; Abreu et al., 2023). Агроэкологическая оценка препаратов на основе микроводорослей и изучение возможностей их применения при возделывании сельскохозяйственных культур с целью повышения продукционного потенциала системы почва-растение является актуальным исследованием. Необходимо выявление эффективных видов; развитие технологий для масштабного культивирования; оценка форм препаратов и сроков внесения, эффекта от альголизации почв в различных климатических зонах.

Степень разработанности темы исследования. Установлено, что водоросли способны улучшать физико-химический режим почв и повышать содержание органического вещества в них и водоудерживающую способность (Голлербах, 1969). Развиваясь на поверхности почв в массовых количествах, микроводоросли могут поглощать большое количество минеральных солей, что предохраняет их от вымывания из почвы, так как после отмирания клеток эти вещества становятся доступными для корней высших растений (Лукьянов, Стифеев, 2014). Позитивное влияние *Chlorella* и *Arthrospira* на рост, развитие, урожайность и качество сельскохозяйственной продукции показано многими

исследователями (Abreu et al., 2023; Доброжан и др., 2014; Тренкеншу, 1999; Лукьянов, 2008). Рынок биомассы микроводорослей в мире ежегодно увеличивается. При этом менее 5 % от общего объема произведенных микроводорослей используется в сельском хозяйстве (Abreu et al., 2023). Необходимо решение ряда проблем в этом направлении: выявление наиболее эффективных видов, штаммов и их сочетания; развитие технологий для масштабного экономически эффективного культивирования; выбор дешевых и безопасных носителей, а также оценка форм препаратов и сроков внесения; оценка пролонгированного эффекта от альголизации почв в различных климатических зонах и экологической безопасности.

Цель исследований – оценка влияния биопрепаратов на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* на плодородие почв и повышение продуктивности сельскохозяйственных культур.

Основные задачи исследования:

1. Разработать технологию получения биопрепаратов на основе инокулята микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*.
2. Оценить действие форм биопрепаратов на продуктивность овощных культур в лабораторных и полевых условиях.
3. Исследовать влияние сроков применения биопрепаратов на основе *Chlorella vulgaris* на свойства агрочернозема и урожайность яровой пшеницы.
4. Оценить эффективность применения форм биопрепаратов на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* на систему почва-растение при возделывании яровой пшеницы.
5. Определить влияние абиотических факторов на продуктивность яровой пшеницы при применении биопрепаратов на основе микроводорослей.

Научная новизна. Разработаны экспериментальные формы биопрепаратов с микроводорослями в виде суспензии *Chlorella vulgaris* сухой формы (гранула) *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*. Получены новые материалы, подтверждающие ростостимулирующую роль микроводорослей и возможности их

применения при возделывании сельскохозяйственных культур. Впервые в условиях Красноярской лесостепи оценено действие сроков и форм применения биопрепаратов на основе микроводорослей на изменение основных показателей плодородия агрочернозема и повышение урожайности яровой пшеницы.

Теоретическая значимость работы. Полученные результаты расширяют представление о возможности управления плодородием агрочерноземов земледельческой зоны Красноярского края за счет альголизации. Они являются научной основой для обоснования агротехнологий, замещающих функции природных экосистем и управления их устойчивым функционированием.

Практическая значимость работы. Материалы диссертации служат основой рационального землепользования и позволяют определить агроэкологическую роль микроводорослей в повышении продуктивности системы «почва-растение». Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Агропочвоведение», «Агрохимия» (для направлений 35.03.03 «Агрохимия и агропочвоведение», 35.03.04 «Агрономия») и «Управление плодородием почв», «Устойчивость почв» (для направления 35.04.03 «Агрохимия и агропочвоведение», прил. 13).

Методология и методы исследований. Методология базировалась на поиске отечественных и зарубежных литературных источников по теме исследований. Исследования проведены в соответствии с классическими методами в почвоведении и агроэкологии. Результаты аналитических исследований получены с использованием ГОСТов и общепринятых методик. Полученные данные не противоречат известным положениям агрономических и биологических наук и базируются на доказанных выводах многолетних исследований. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проведена в специализированной программе Microsoft Excel и показали высокую степень достоверности.

Защищаемые положения:

1. Формы биопрепаратов в виде суспензии *Chlorella vulgaris* и гранулы *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* обладают близкой биологической и агроэкологической эффективностью и являются существенным регулятором системы «почва-растение».

2. Биопрепараты на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* при применении их на сельскохозяйственных культурах обладают ростостимулирующим действием, определяют регулирование агрофизического состояния почв, трансформацию углерода и азота, обеспеченность подвижными элементами питания за счёт усиления минерализационных процессов и повышение продуктивности агроэкосистемы.

Степень достоверности результатов проведенных исследований:

Полученные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации имеют теоретическое и экспериментальное обоснование, согласуются с устоявшимися принципами сельскохозяйственных наук и подтверждаются значительным массивом опытных данных. Полевые исследования выполнены на базе учебно-опытного хозяйства «Миндерлинское» Красноярского ГАУ. Анализ почв по основным агрохимическим и агрофизическим показателям проведен общепринятыми методами. Обработка данных методами математической статистики (описательная статистика, дисперсионный и корреляционный анализ) в среде Microsoft Excel подтвердила высокую достоверность результатов.

Апробация работы: Материалы диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе в изданиях «Перечня...» ВАК РФ – 2. Результаты исследований представлялись и обсуждались на конференциях: XII, XIII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные тенденции развития Российской науки» (Красноярск, 2022, 2023); IV Всероссийской конференции молодых ученых АПК (п. Рассвет, 2022); Всероссийской научной конференции VII Докучаевские молодежные чтения «Устойчивость почвенного покрова и продуктивность экосистем» (Красноярск,

2022); Межрегиональной научной конференции VIII Докучаевские молодежные чтения «Устойчивость почвенного покрова и продуктивность экосистем» (Красноярск, 2023); Международной научно-практической конференции «Перовские чтения» (Чита, 2025); XIX Всероссийской студенческой научной конференции «Студенческая наука – взгляд в будущее» (Красноярск, 2024); XX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы почвоведения, экологии, земледелия» (Курск, 2025). Ежегодно результаты исследований заслушивались и обсуждались на заседаниях кафедры почвоведения и агрохимии ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ (2021-2025 гг.).

Структура диссертационной работы. Диссертация изложена на 270 страницах, включая 32 таблиц, 83 рисунков, 13 приложений. Состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы, который представлен 350 источниками, в том числе 78 на иностранном языке.

Личный вклад. Работа выполнена в 2021-2025 гг. за время обучения автора в очной аспирантуре. Автором лично получена большая часть научных результатов. Выполнен анализ отечественной и зарубежной литературы, проведены лабораторные, микрополевые и полевые исследования, статистическая обработка данных и публикации научных материалов. В соавторстве с Т.А. Назаренко, А.М. Ковалем, Д.А. Варгановой, Е.И. Дымченко, Д.Д. Бураком получены результаты по влиянию микроводорослей на содержание гумусовых веществ, гидролизуемых форм азота, реакцию среды, биологическую активность почвы, структурное состояние и режим нитратного азота в агрочерноземе. Материалы по определению действия биопрепаратов на основе культуры микроводоросли *Chlorella vulgaris* на ростовые процессы сельскохозяйственных культур в начальной стадии развития, продуктивность томата и яровой пшеницы интерпретированы совместно с Н.Л. Кураченко; по уреазной активности агрочернозема – совместно с Н.В. Фоминой и Н.Л. Кураченко.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доктору биологических наук, профессору Н.Л. Кураченко за ценные советы,

профессиональные консультации и научную строгость, коллективу кафедры почвоведения и агрохимии ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» за практическую помощь и поддержку на всех этапах выполнения работы.

ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

1.1 Состояние, проблемы и перспективы биологизации земледелия

Актуальное направление развития растениеводства в связи с возросшей химизацией и индустриализацией отрасли – использование ресурсосберегающих технологий, оказывающих минимальное негативное воздействие на окружающую среду (Харченко, 2011). Применение биотехнологий на основе использования биологических средств защиты, биостимуляторов и биологических удобрений является одним из способов эколого-биосферного ведения сельского хозяйства (Кураченко и др., 2020; Кураченко, Абакумова, 2024; Мухина и др., 2022; Черемисин и др., 2023). Внедрение инновационных технологий возделывания сельскохозяйственных культур с применением микроводорослей позволит осуществить комплексный подход к проблеме сохранения плодородия почвы и повышения продуктивности сельскохозяйственных культур.

Негативное воздействие сельскохозяйственного производства на окружающую среду, в том числе и почвы, обусловлено рядом причин. Так, длительное применение минеральных удобрений в агроценозах приводит к изменению кислотности почв, и, как следствие повышению плотности, снижению содержания гумуса (Кузин и др., 2013). Изменяются и другие факторы, определяющие плодородие (Бабаджанов, 2009; Балезина, 1967; Бжеумыхов, 2005; Голов, 2019). Накопление остатков минеральных удобрений в силу их неполной усваиваемости растениями и накопление остаточных количеств пестицидов деформирует экосистемы. Снижается численность, разнообразие и соотношение почвенных микроорганизмов (Аристовская, 1988; Паринкина, Ключева, 1995; Франк, 2008). Из-за преобладания патогенов, проявляется фитотоксичность почвенной микрофлоры (Данилова, 2010; Heimbach, 2010). Как следствие, снижается биологическая активность почв и естественные темпы восстановления плодородия (Турусов и др., 2010). Применение минеральных удобрений нарушает

баланс органических веществ, повышает плотность и уменьшает содержание гумуса в почве. В результате её биологическая активность снижается, а естественные процессы восстановления плодородия замедляются. Со временем это ведёт к эрозии и утрате плодородного слоя, что делает почвы менее способными поддерживать рост растений без постоянного внесения дополнительных удобрений.

Интенсивное применение пестицидов также оказывает значительное воздействие на экосистемы. Математические модели, используемые для оценки их экологической опасности, часто ориентируются только на воздействие активного вещества, и не учитывают разнообразные добавки, которые также могут представлять опасность для экосистемы. Остатки пестицидов, попадая в почву, нарушают микробиом, подавляя полезные микроорганизмы и способствуя развитию патогенных микроорганизмов. Снижается биологическое разнообразие и, как следствие, устойчивость экосистемы (Рынок химических средств защиты растений в России 2023: показатели и прогнозы, 2023).

Согласно докладу Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), «Состояние почвенных ресурсов мира», 33 % почвенных ресурсов мира уже пострадали от таких процессов, как эрозия, засоление и химическое загрязнение (Краткий обзор. FAO, 2020). Становится очевидной не только экологическая и экономическая неэффективность таких мер, но и усугубление кризисной экономической ситуации. Как отмечал Генеральный секретарь ООН Пан Ги Мун, обеспечение устойчивого и неистощительного землепользования – это необходимое условие для сохранения плодородия почв, а также для предотвращения ухудшения продовольственной ситуации в мире (ООН. 2015. Генеральный секретарь. Послание по случаю Всемирного дня почв <https://www.un.org/ru/sg/messages/2015/soilday.shtml>). Экологизация сельского хозяйства и внедрение методов биологизации, направленных на восстановление органического вещества в почвах, становятся неотъемлемыми элементами решения этой проблемы.

Устойчивое земледелие представляет собой альтернативный подход к решению продовольственной проблемы, сочетая заботу о повышении урожайности с сохранением и восстановлением экосистем (Мудрых, 2017). Его методы включают в себя органическое сельское хозяйство, агролесоводство, использование биопрепаратов и других экологических практик, которые помогают сохранить почвенные ресурсы и биоразнообразие, минимизировать химическое загрязнение и поддерживать здоровье почвы на долгосрочной основе.

Устойчивое земледелие, с акцентом на принципы биологизации, представляет собой комплексный подход, который укрепляет экологическую стабильность агроэкосистем и способствует сохранению природных ресурсов (Богуславская, 2006). Комплексное применение методов биологизации в агроэкосистемах снизит уровень загрязнения почвенных и водных ресурсов. А использование биофильтров и природных микробиологических препаратов будет способствовать их очищению. Внедрение сидератов, почвенных микроорганизмов и микроводорослей стимулирует развитие полезных микробных сообществ, которые поддерживают здоровье почвы и растения. Устойчивые методы, такие как агролесоводство и поддержка местных культур, также способствуют сохранению разнообразия видов, защищая их от вымирания и улучшая устойчивость агроэкосистем к изменению климата и вредителям. Эти методы восстанавливают биологическую активность почв, что способствует их регенерации, повышению плодородия и защите от эрозии и деградации.

Устойчивое земледелие в отличие от интенсивного способствует снижению выбросов парниковых газов. Биопрепараты на основе фототрофов фиксируют углерод и способствуют его длительному сохранению в почве, снижая углеродный след сельскохозяйственной деятельности. Благодаря этому сельское хозяйство становится менее зависимым от ископаемых источников энергии и более устойчивым к климатическим изменениям (Голов, 2019; Шегорец, 2019).

Использование растений-накопителей влаги и почвенных улучшителей на основе водорослей, позволяют сохранить воду в почве, предотвращая её быстрое

испарение. Это особенно важно в засушливых регионах, где устойчивое земледелие может стать одним из ключевых факторов выживания экосистем и повышения устойчивости сельскохозяйственного производства (Почвы находятся под угрозой..., Цифровая платформа знаний Агроэкокомиссия, 2021).

Биологизация, как направление, и биологическое земледелие, как способ использования земли, направлены на снижение последствий от использования факторов интенсификации и основаны на рациональном использовании биогенной интенсификации и биологических факторов продукционного потенциала растений. В простом приближении сущность биологизации земледелия можно выразить как усиление роли живых организмов и биопотенциала растений в продукционном процессе и воспроизводстве плодородия почвы (Почвы находятся под угрозой..., Цифровая платформа знаний Агроэкокомиссия, 2021).

С экологической точки зрения, биологизация направлена на восстановление и поддержание природных процессов, которые способствуют долгосрочной стабильности экосистем. Еще в конце XIX века А. С. Ермолов отмечал значимость замкнутого хозяйственного оборота, стремясь усилить автономность аграрных систем. Он также обосновал направления, которые легли в основу современных принципов биологического земледелия.

Основу теории биологизации заложил в своих трудах труды В. Р. Вильямс. Он предлагал внедрять экологически сбалансированные системы, которые восстанавливают почвенное плодородие естественным путем, например, через травополье. Вильямс предсказывал негативные последствия злоупотребления минеральными удобрениями. Академик А. А. Жученко разработал концепцию адаптивной интенсификации, ориентированную на экологизацию интенсивных процессов в сельском хозяйстве, предложив дифференцированное использование природных, биологических и техногенных ресурсов для повышения урожайности при сохранении экологии. Теоретические основы биологизации сельского хозяйства получили развитие в отечественной науке. А. В. Советов придавал большое значение гармонизации земледелия и животноводства, подчеркивая

важность естественных процессов и взаимосвязей в агроэкосистемах для поддержания почвенного плодородия. В своих исследованиях по полевому травосеянию он выделил ключевые подходы к биологизации, основанные на органических связях между элементами агросистем (Скорочкин, Воронцов, 2021).

В настоящий момент выделены следующие принципы биологизации: севооборот, биологический азот, органоминеральная система удобрения, биологическая защита растений, почвозащитные системы обработки почвы.

Важнейший из них – севооборот. Он определяет необходимое для экосистемы биоразнообразие за счет смены основных и промежуточных культур. Формирует систему защиты растений за счет частого изменения экологических условий для патогенов. Способствует повышению численности насекомоядных организмов. Делает более разветвленными пищевые цепи агроценоза, повышая его устойчивость. И тем самым снижая необходимость в применении пестицидов. Расширяется спектр многолетних растений, которые одновременно обогащают почву и могут быть использованы в качестве кормов.

Второй по важности принцип – это снижение интенсивности использования азотных минеральных удобрений и переход к «биологическому азоту». Кроме не полного усвоения минеральных удобрений и дальнейшей миграции нитратов в грунтовые воды и накопления в продуктах, они экономически не выгодны. Производство нитратов энергозатратное. Рост цен в 2021-2022 г. на все азотсодержащее сырье поставил под вопрос возможность их приобретения хозяйствами. При этом атмосфера, как источник азота неисчерпаема. И многие организмы способны эффективно превращать молекулярный азот в доступные для высших растений формы. Обычно говорят о расширении видового разнообразия бобовых в севообороте. При этом отличные результаты получены при альголизации почв цианобактериями, также способными к азотофиксации (Коваль, 2014; Лукьянов, 2016; Панкратова, 1981; Шалыго, 2019).

Органическое земледелие, предполагающее полный отказ от химических средств интенсификации, является высшей формой экологизации сельского

хозяйства (Бабаджанов, 2009). Однако на текущем этапе, учитывая его относительно низкую продуктивность и высокие затраты, оно не способно полностью обеспечить продовольственную безопасность страны. Осознание масштабных экологических рисков, связанных с глубокой химической интенсификацией, подчеркивает необходимость ориентировать современное земледелие на процессы биологизации, создавая более устойчивую и экологически сбалансированную агросистему.

Сельскохозяйственное производство многих стран биологизировано в значительной мере (до 10 %) (Heimbach, 2010). Например, в странах Европейского Союза, таких как Польша, Чехия и Словакия, реализуются проекты, направленные на разработку и внедрение лучших практик биологического сельского хозяйства. Эти страны фокусируются на сокращении использования химических удобрений и пестицидов, развитии систем севооборота и интеграции органических методик для улучшения плодородия почвы и устойчивости экосистемы в целом. Это является частью более широких усилий ЕС по продвижению устойчивого сельского хозяйства, учитывающего экологические и социальные аспекты наряду с экономическими выгодами.

В США биологизация включает методы интегрированной борьбы с вредителями, использование органических удобрений и генетически модифицированных культур, устойчивых к болезням и вредителям, что позволяет сократить потребность в химических пестицидах (Бабаджанов, 2009). Это помогает уменьшить негативное воздействие на экосистемы и поддерживает биологическое разнообразие.

В России биоагенты в сельском хозяйстве начинают обретать популярность. Современное состояние почв в России связано со снижением содержания гумуса в почвах, отрицательным балансом элементов минерального питания, увеличением доли кислых почв и эрозия. При этом снижение гумуса по сравнению с целинными землями произошло до 40 %, а негумифицированного органического вещества в 2-4,5 раза. Причинами такого положения дел является недостаточное внесение

минеральных удобрений в настоящий момент и низкое поступление органического вещества, отсутствие достаточных мер по предотвращению эрозии почвы. Урожаи большей частью формируются за счет «природно-ресурсного кредита» почв. Восполнения же не происходит. Без принятия срочных мер, деградация почв может стать необратимой (Масютенко, 2003).

Накопленный опыт позволяет современным ученым более детально решать вопрос восстановления плодородия пахотных земель и повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Урожайность растений – это итог сложного продукционного процесса высших растений. Его эффективность определяется не только фотосинтезом. С XIX века ученые предполагали о способности высших растений поглощать сложные органические вещества. Сейчас этот факт доказан, а растения в пищевой цепи экосистемы определяются скорее как миксотрофы, чем как облигатные автотрофы. Почвенное органическое вещество приобретает ведущую роль среди факторов плодородия. А.И. Попов (2012) в своих исследованиях на основании математической модели функционирования трофосистемы почва-растение показал, что фитомасса высших растений в экосистеме пропорциональна почвенному органическому веществу. Он подчеркивает важность для стабильного функционирования экосистемы двойной трофической связи почвы и растений. Растения не только фиксируют углерод из атмосферного CO_2 и через опад обогащают почву органическим веществом. Они также потребляют часть органического вещества гумуса в виде структурных блоков макромолекул. В агроценозах трофические связи значительно нарушены (Ефремов, 2011). Повышение продуктивности агроэкосистемы возможно благодаря «биологической коррекции» в том числе. Она подразумевает восстановление утраченных или поврежденных звеньев системы почва-растение, способных увеличить эффективную гумификацию органических остатков, увеличить численность азотофиксирующих и литолитических микроорганизмов.

Микроводоросли успешно могут выполнять перечисленные функции в трофосистеме почва-растение (Сафиулина, 2014; Штина и др., 1964). Им

характерен быстрый прирост биомассы, синтез и выделение в окружающую среду широкого спектра метаболитов, стимулирующих развитие бактерий и грибов (Goncalves, 2021). И в тоже время, многие микроводоросли способны регулировать почвенную микробиоту за счет собственных антибиотиков. Выращивание биомассы микроводорослей технически просто в исполнении и энергетически низкзатратно. Альголизация почв, таким образом, может стать эргономичным и высокоэффективным методом биологического земледелия.

1.2 Экологическая роль микроводорослей рода *Chlorella* и *Arthrospira* в экосистемах

Микроорганизмы играют ключевую роль в органическом земледелии, являясь самым обширным звеном биоты любой экосистемы. Фототрофные микроорганизмы – микроводоросли, особенно важны, как неистощимый источник органического вещества (Артамонова, 1994; Асеева и др., 1966; Большев, 1968). Они способствуют накоплению гумуса, что особенно важно для восстановления деградированных земель и повышения их плодородия (Мишустин, 1984). Они являются поставщиком и биологически активных вещества, включая аминокислоты, фитогормоны, витамины и ферменты, которые повышают производительность и устойчивость растений микробиологическую активность почвы (Лукьянов, 2013; Goncalves, 2021). Немаловажно, что микроводоросли относительно устойчивы к применяемым в агроценозах пестицидам (Лукьянов, 2016; Трухницкая и др., 2015; Caceres, 2018; Riobbo, 2002).

Самыми многочисленными представителями природных микробиомов являются зеленые водоросли и цианобактерии. Их отличает уникальная устойчивость в широком диапазоне экологических и климатических условий, быстрое восстановление жизнеспособности после неблагоприятных условий и высокая продуктивность (Антипина, Тищенко, 1991; Доценко, Федулов, 2017; Перминова и др., 1992). Огромную популярность в биотехнологиях приобрели

представители родов *Chlorella* и *Arthrospira* (Шалыго, Мельников, 2009; Abreu et al., 2023).

Одноклеточная зеленая микроводоросль *Chlorella vulgaris* Beijer. относится к отделу *Chlorophyta*, классу *Trebouxiophyceae*, порядку *Chlorellales*, семейству *Chlorellaceae*, роду *Chlorella*, виду *Chlorella vulgaris* M. Beijerinck. Клетки одноклеточной водоросли шаровидные или эллипсоидные, размером 2-12 мкм в диаметре. Размножаются бесполом путем. При делении материнской клетки один раз в сутки образуется 2-4-8 автоспор. В интенсивной культуре число делений может увеличиваться за счет комбинирования условий культивирования (Лукьянов и др., 2013). У *Chlorella vulgaris* сложное строение клеточной стенки. Она состоит из трех слоев, которые защищают клеточное ядро от влияния патогенов. Самая крупная часть оболочки, состоит из целлюлозы и расположена посередине. Наружная оболочка представляет собой полимерный каротиноид, способный собирать и удалять токсические элементы из организма (Андреева, 1998; Зайцев и др., 2022). Эта структура обеспечивает виду высокую устойчивость и жизнеспособность. Клеточная стенка у разных подвидов может иметь разную толщину, что влияет на их чувствительность к химическим веществам, температурному стрессу и экологические адаптации (Gao et al., 2011).

Chlorella vulgaris демонстрирует высокую скорость роста и биомассы по сравнению со многими высшими растениями (Лукьянов и др., 2015). Производительность *Chlorella* может достигать до 30 г/м² в сутки, в то время как у высших растений этот показатель редко превышает 20 г/м² в сутки (Mata et al., 2010). Исследования показывают, что *Chlorella vulgaris* использует солнечную энергию более эффективно, чем многие высшие растения, благодаря высокой плотности хлорофилла и быстро реагирующему фотосинтетическому аппарату (Ogbonna, Tanaka, 2001). Один из факторов, который способствует этому – более короткий цикл роста *Chlorella* по сравнению с высшими растениями, позволяющий ей стремительно адаптироваться к изменениям в условиях среды. Исследования

показывают, что *Chlorella* может фиксировать углекислый газ более эффективно в сравнении с высшими растениями (Murray et al., 2021).

Chlorella встречается повсеместно в экосистемах: в пресных водоемах, в почвах и как симбионт в низших организмах (Андреева, 1998; Стрижников и др., 2021). Согласно исследованиям, среди почвенных микроводорослей широколиственных лесов представители отдела *Chlorophyta* составляют 44 % от всех найденных видов, среди которых 81 % приходится на *Chlorella vulgaris*. Зеленые водоросли встречаются в почвах повсеместно. Живые клетки встречали даже на глубине 5 м. Н.Г. Смирнова (2013) отмечает, что в почвах широколиственных лесов с глубины 25 см их видовое разнообразие снижается. На глубину 50 см проникали единично *Tetracystis aggregata*, *Stichococcus chodatii*, *Chlorosarcinopsis minor* и более часто - *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. globosa*, *Ch. elliptica*, *Chlorococcum infusionum*. Зеленые водоросли встречаются в почвах чаще цианобактерий.

Во всем мире микроводоросли являются крупнейшими производителями биомассы и накопителями нейтральных липидов, соперничая с любыми другими наземными масличными культурами (Mallick et al., 2016). *Chlorella* содержит в своем составе комплекс биологически ценных веществ в высокой концентрации: 40–60 % белка, 35 % углеводов, 5–10 % липидов и до 10 % минеральных веществ (среди прочих в значительных количествах железо, цинк, кальций, фосфор). Белки водоросли имеют высокий процент незаменимых аминокислот.

Chlorella, в отличие от высших растений, содержит также и витамины А, D и В12 в чистом виде (Helliwell, 2017). Она богата хлорофиллом (до 2 %) и каротиноидами (до 0,5 %), флавоноидами (до 1,5 %) (Митишев и др., 2022). Благодаря этому, биомасса хлореллы активно используется в пищевых добавках и функциональных продуктах питания (Мельников, Мананкина, 1991).

Около 80 % всех жирных кислот хлореллы приходится на ненасыщенные. Среди них – линолевая 27-30 % и линоленовая до 7 %. Они относятся к омега-6 и омега-3-полиненасыщенным кислотам, обладают высокой биологической

активностью и важны для обменных процессов, как в животных, так и растительных организмах (Абросимова, Колесникова, 2019; Митишев и др., 2022).

Выдающиеся антиоксидантные свойства суспензии хлореллы обусловлены, в том числе активностью каталазы и супероксиддисмутазы, а также β -1,3-глюканом (Богданова и др., 2019; Llieva et al., 2024).

Антибактериальная активность хлореллы было открыта в первой половине XX в. Исследователи отмечали, что сброс канализационных стоков в водоемы, населенные *Chlorella vulgaris* не увеличивал рост патогенных бактерий, в частности, кишечной палочки. Антибактериальные свойства *Chlorella vulgaris* по эффективности превосходили хлорирование воды (Pratt et al., 1951). Роберт Пратт с соавт. (Pratt et al., 1945) обнаружили определенную динамику изменения концентрации антибактериального агента, угнетающего также рост и самой водоросли. В интенсивной культуре его содержание повышалось на 3-4 день культивирования, затем снижалось и поднималось на стабильно высокий уровень, начиная с 14 дней. Вместе с Германом Августом Споером (Spoehr et al., 1949) они сделали вывод, что по природе это вещество, названное хлореллином, вероятно является жирной кислотой с короткой цепью. Хлореллин не содержится в живых клетках, а является продуктом окисления экзометаболитов микроводоросли.

По современным данным, микроводоросли рода *Chlorella* подавляют развитие грибковых инфекций, вызываемых *Fusarium monofiliform*, *Aspergillus fumigatus*, *Rhizoctonia solan* и др., ряда вирусов, синегнойной палочки, золотистого стафилококка, сальмонеллы и других грамм-положительных и грамм-отрицательных бактерий (Франц, 1984; Шемякин, 1949; Abedin et al., 2008; Al-Nazwani et al., 2021; Ghasemi et al., 2007; Falaise, 2016; Imane et al., 2018). Имеются результаты по успешной борьбе с паразитическими простейшими и их цистами (Khadija, 2020).

Антимикробную активность хлореллы связывают с различными веществами, такими как жирные кислоты, фенольные соединения, флаваноиды, хлорофилл, полисахариды (Митишев и др., 2022; Falaise et al., 2016; Imane et al., 2018).

Механизм антибактериального действия пигментов, фенольных соединений и свободных жирных кислот связан с их способностью разрушать клеточную стенку бактерий, а полисахаридов – увеличивать проницаемость цитоплазматической мембраны. Максимальное содержание свободных жирных кислот в культуре хлореллы наблюдают в стационарной фазе. Это, вероятно, является результатом отмирания клеток и окисления их содержимого при автолизе. Таким образом, массовое отмирание клеток хлореллы в водоеме можно использовать как механизм очищения от патогенной микрофлоры и регуляции баланса звеньев пищевой цепи в экосистеме (Maksimova, 1986; Selivanova, 2014).

Помимо питательной ценности, *Chlorella vulgaris* обладает и экологическими преимуществами, такими как способность к биоремедиации, в частности, к поглощению тяжёлых металлов и очистке сточных вод, а также насыщению воды кислородом в процессе фотосинтеза (Горбунова С.Ю., Жондарева, 2012; Mallick, 1994). Высокая концентрация липидов в клетке *C. vulgaris* создает перспективы для использования ее биомассы в производстве биотоплива. Исследователи также отмечают среди выделяемых в окружающую среду метаболитов широкий спектр фитогормонов (Gitau et al., 2021; Jiraskova, 2009). Ввиду высокой продуктивности *Chlorella vulgaris* перспективна для промышленного получения ряда ценных биологически активных веществ (Роик и др., 2021). Способность хлореллы расти в автотрофных, миксотрофных и гетеротрофных условиях делает её универсальным объектом во многих биотехнологических отраслях. Уникальная эврибионтность микроводоросли позволяет, изменяя питательную среду и манипулируя различными физическими факторами, значительно влиять на качественный и количественный состав ее метаболитов (Богданова и др., 2019; Зайцев и др., 2022; Митишев и др., 2021; Тренкеншу и др., 2017; Ogbonna, 1997).

Мировой рынок хлореллы в настоящее время переживает подъем в связи с высоким спросом на БАДы, распространением веганства и развитием новых технологий, позволяющих выделять и эффективно использовать метаболиты микроводоросли. Прирост производства до 2029 прогнозируется на 6,3 % в год, что

составляет значительную часть от общего роста рынка биомассы микроводорослей на 10,3 % в год. Основные производители – страны Азиатско-Тихоокеанского региона – Китай и Тайвань (около 40 %), и Япония (8 %). Наибольший рост объёмов производства наблюдается в Северной Америке и Европе (Global Chlorella Market, 2022).

Основная часть биомассы используется в фармацевтической и пищевой промышленности. На долю препаратов для растениеводства приходится менее 5 %. Одной из причин малого распространения альгопрепаратов сельскохозяйственного назначения специалисты называют низкий уровень доверия, недостаток информированности и необходимость решения ряда вопросов для повышения эргономичности этой отрасли. В том числе подбор штаммов микроводорослей и их возможных сочетаний; выбор способов внесения и носителей для культур; исследование долгосрочного эффекта в почвенных экосистемах от альголизации почв; разработка экономически эффективных технологий по масштабному культивированию микроводорослей и др. (Abreu et al., 2023).

Arthrospira platensis относится к царству *Procaryota*, отделу *Cyanophyta*, классу *Cyanophyceae*, порядку *Oscillatoriales*, роду *Arthrospira*, виду *A. platensis* (Брянцева, 2005). Отсутствие оформленного ядра и мембранных органоидов, как у бактерий и в тоже время особенности метаболизма и клеточных структур позволили сохранить за этими организмами двойное название «сине-зелёные водоросли-цианобактерии» (Брянцева и др., 2005; Thoré, 2023; Venkataraman, 1997). *Arthrospira platensis* часто упоминается в литературе как *Spirulina platensis*, при этом различия по морфологическим признакам, химическому составу и генетическим особенностям дает основания выделять *Arthrospira* в отдельный род.

Нити цианобактерии (трихомы) состоят из отдельных клеток, и имеют размер от 6 до 12 мкм у разных форм. В зависимости от факторов внешней среды спиральная форма трихом может сменяться прямой. Обладает скользящей и вращательной подвижностью нитей (Брянцева и др., 2005; Venkataraman, 1997). Клеточная стенка многослойная, включая слой пептидогликана. А вся трихома

окружена оболочкой (чехлом) из выделяемых клеткой веществ. Размножение происходит только бесполое. Клетки делятся бинарно, а трихомы фрагментируются на короткие участки (гормогонии) через разрушение интеркалярной клетки (Брянцева и др., 2005; Jung et al., 2021 Venkataraman, 1997).

Arthrospira platensis предпочитает водоемы с высоким содержанием карбонатов и гидрокарбонатов и pH от 8 до 12. Отличается высокой толерантностью к содержанию солей от 20 до 270 г/л. Устойчива к понижению температур, при оптимальной для роста 35-37 °С. *Arthrospira* в основном планктонный организм. Однако широко распространена и в почвах, где образует биопленки. В природных экосистемах представители рода *Arthrospira* встречается широко в Азии, Африке, Южной Америке (Venkataraman, 1997). Вид *A. platensis* тропический, происходит из Африки, а в настоящий момент активно культивируется в разных целях.

По некоторым данным русская интерпретация названия – *Spirulina* (*Arthrospira*) пищевая – было присвоено из-за многовекового употребления ее в пищу в некоторых регионах планеты (Косенко и др., 2021). Благодаря высокой питательной ценности *Arthrospira* в XX-XI вв. приобрела популярность как суперфуд, компонент БАД, кормовая добавка и удобрение (Зарипов, 1982). *Arthrospira* активно исследуется, как потенциальный источник сырья для инновационных продуктов питания, покрывающих потребность человека, животных и культурных растений в питательные вещества (Markou et al., 2021).

Биомасса цианобактерии содержит по разным данным до 60-70 % белка, липидов 30 %, углеводов 25 %. Белковый состав отличается сбалансированностью и содержит 8 из 9 незаменимых аминокислот. Сочетание белков в организме микроводоросли и аминокислотный состав меняются с возрастом культуры и зависят от внешних условий. При этом можно регулировать его частично изменением питания культуры (Первушкин и др., 2004).

Пигменты – каротиноиды (30–180 мг %) и фикоцианины (до 10 %) придают биомассе выдающиеся антиоксидантные свойства. Внимание ученых сейчас

приковано к уникальному позитивному влиянию фикобилинов цианобактерии на организм млекопитающих (Мазо и др., 2022).

По содержанию в биомассе витаминов В1, В2, В6, В9, В12, С, А и Е *Arthrospira* может конкурировать с большинством известных витаминных продуктов. В ней представлен полный спектр жиро- и водорастворимых витаминов (Babadzhanov et al., 2004). По мнению некоторых исследователей, наиболее полный состав витаминов и их высокое содержание характерно культуре возрастом 10-14 дней (Дидович и др., 2017; Первушкин и др., 2004).

Содержание жирных кислот также примечательно и составляет до 11%. Среди них более половины приходится на долю наиболее ценных α - и γ -линоленовых кислот. Это незаменимые омега-3-ненасыщенные кислоты.

Как фототрофный организм, *Arthrospira* очень экономична в культивировании и имеет значительный прирост биомассы в сравнении с высшими растениями. Высокощелочной состав среды позволяет не опасаться загрязнения культуры другими организмами. Это делает ее перспективным объектом для биотехнологического производства. В частности, она рассматривается, как потенциальный источник разнообразных углеводов. Полисахариды в составе биомассы достигают 15 %. Исследования показали, что модификация состава питательных сред при культивировании позволяет влиять на содержание (повышая от 10 до 70 %) и качественный состав важных углеводов в биомассе (Перт, 1978; Рахимов, Якубов, 1971). В частности, β -глюкан, обладающий выраженными антиоксидантными, иммуномодулирующими и противоопухолевыми свойствами (Markou et al., 2021).

Минеральные вещества в составе цианобактерии представлены в виде органических легко усваиваемых соединений. Среди микроэлементов железо обнаружено в наиболее значимой концентрации, а также медь, цинк, селен и марганец (Первушкин и др., 2004; Косенко, 2021). Так содержание кальция в биомассе *Arthrospira* сравнимо с цельным молоком; содержание магния, калия и

фосфора в разы превышает таковые в красной икре и черной смородине (Первушкин и др., 2004; Yatan, 2021).

Первое массовое производство *Arthrospira* было открыто в 70-е годы XX в. В США. С тех пор темпы производства биомассы неуклонно растут, а в постковидный период прирост составил более 9 % в год. Это связано в первую очередь с поиском альтернативных источников полноценного пищевого белка. В странах с дефицитом пресной воды выращивание *Arthrospira*, как пищевого ресурса становится перспективным решением продовольственной проблемы (Леушкина и др., 2024; Venkataraman, 1997).

В наземных экосистемах место водорослей традиционно определяют, как продуцентов и составной части биотического фактора почвы. Эволюционно роль водорослей в экосистеме, прежде всего можно определить как пионерную. Они были и являются единственными поставщиками биомассы в первичных экосистемах (Веретенников, 1963). Органическое вещество водорослей – главный ресурс питания низших гетеротрофов – бактерий, грибов, беспозвоночных (Новичкова-Иванова, 1977). Разрушая горные породы наряду с бактериями, микроводоросли делают доступными для биоценоза минеральные соли (Голлербах, Штина, 1969). Эта стратегия в эру техногенеза по-новому раскрыла значение микроводорослей. На территориях, подвергшихся деградации в результате антропогенного воздействия, способность микроводорослей к быстрому наращиванию биомассы, утилизации широкого спектра минеральных веществ, толерантность к изменению физико-химических условий среды, сделала эти организмы главными ремедиаторами (Дорогостайская, Новичкова-Иванова, 1967; Сафиулина, 2014; Щур, Виноградов, 2016). Р.Р. Кабиров (2004) назвал микроводоросли «важным механизмом упругой устойчивости наземных биоценозов к дестабилизирующим факторам». В агроценозах высшие растения испытывают значительный стресс в связи с истощением почв, пестицидным воздействием и нарушением трофических связей. Микроводоросли эффективно восполняют недостаток в питании и создают биологически активный

стимулирующий фон, тем самым поддерживая стабильность экосистемы (Домрачева, 2005).

Высокая толерантность микроводорослей к изменению абиотических и биотических факторов объясняется целым рядом уникальных свойств (Доценко, 2022). И *Chlorella* и *Arthrospira* характерна возможность изменять способ питания в зависимости от внешних условий с фототрофного на миксотрофный и гетеротрофный (Горбунова, 2013; Горбунова, Жондарева, 2017; Попкова, 2021). Исследователи отмечают более высокую энергетическую эффективность гетеротрофного питания, далее по убывающей – миксотрофного и автотрофного. Самый высокий выход АТФ из поглощенной энергии регистрировали при гетеротрофном выращивании микроводорослей, а фототрофный путь давал более чем в 5 раз меньше АТФ (Yang et al., 2000). Выявлено независимое функционирование у *C. vulgaris* гликолитического пути и окислительного фосфорилирования от фотосинтеза (Ogawa, Aiba, 1981; Yang et al., 2000).

Гетеротрофное и миксотрофное культивирование *C. vulgaris* на среде с глюкозой, ацетатом, глицерином и на сточных водах дает увеличение биомассы по сравнению с автотрофией до 10 раз (Лукьянов, Горбунова, 2013; Bhatnagar et al., 2011; Lowrey et al., 2015). Схожие результаты демонстрируют исследования *A. platensis*. Показаны отличные результаты культивирования цианобактерии на сточных водах и водных вытяжках из отходов животноводства (Горбунова, Жондарева, 2012, 2015; Ogbonna et al., 1997). В почве гетеротрофное питание микроводорослей позволяет им осуществлять жизнедеятельность в отсутствии света, поставлять органическое вещество для биоценоза и снижать эмиссию CO₂ (Попов, 1997; 2012).

Экзометаболиты микроводорослей и органическое вещество отмирающих клеток восполняют трофосистему почвы (Кабиров, Гайсина, 2009). *Chlorella* и *Arthrospira* имеют гораздо более высокую продуктивность биомассы на единицу площади по сравнению с высшими растениями (Горбунова, Лукьянов, 2015). До 20–30 тонн сухой биомассы с гектара в год при оптимальных условиях

культивирования. Для сравнения, кукуруза или пшеница дают около 4–8 тонн сухой биомассы с гектара в год. Генномодифицированные и самые высокопродуктивные культуры, такие как мискантус, могут достичь 15–20 тонн сухой биомассы в год, но при этом нужны значительные затраты на мелиорацию и сохранение от вредителей. Эффективность фотосинтеза микроводорослей достигает 6–8 % в сравнении 1–3 % у высших растений. Биомасса хлореллы и *Arthrospira* содержит до 60–70 % белка. Соя как основной источник растительного белка для пищевой промышленности только 40 % (Chisti, 2007; Groom et al., 2008). Соответственно биомасса отмерших клеток становится богатым источником органического азота в почве (Ozdemir, 2016).

Органическое вещество водорослей в пищевой цепи связано с развитием почвенного микробиома. Прижизненными выделениями водорослей, а также и их отмирающими или ослабленными клетками питаются многие бактерии и грибы (Джуманиязов, 1990; Зенова и др., 1995; Коломиец, 2017). При обработке хлопчатника суспензией зеленых водорослей число микроорганизмов выросло с 3–4 млн. клеток на 1 г. до 10 млн. (Джуманиязов, 1990). Слизистые чехлы и клеточные оболочки являются местом обитания бактерий и грибов. Исследования Koichi Watanabe с соавторами (2005) показали, что бактерии главным образом взаимодействуют с оболочками клетки хлореллы, а грибы располагаются непосредственно на стенке клетки. При автотрофном питании взаимоотношения хлореллы с гетеротрофными спутниками носят симбиотический характер, при переходе к гетеротрофному культивированию они становятся конкурентами. Есть данные об использовании микроводорослями факторов роста, синтезируемых симбиотическими бактериями, которые развиваются на органических экскретах хлореллы (Chrost, 1981). В присутствии часто встречающихся в культуре микроводоросли бактерий рост хлореллы усиливался. В последствии *Chlorella* снижала численность бактерий (Qu et al., 2014). В природных сообществах отмечены сложные трофические отношения хлореллы с миксомицетами (Попкова, 2021). Генетическая экспертиза позволила определить, что витамин B12

микроводоросли получают от сопутствующих бактерий (Helliwell, 2017). Для *Arthrospira* также характерны симбиотические отношения с бактериями (Гадова, Пихтелева, 2020; Никитина и др., 2006; Volk, 2005). Отдельные виды облигатных симбионтов *Arthrospira* способны к азотификации, повышая ее фертилизационный потенциал (Безлер и др., 2016). Развитие бактериального сообщества повышает активность почвенных ферментов, высвобождающих питательные вещества, необходимые растениям (Mahmoud et al., 2007). *Chlorella vulgaris* так же повышает на каталазную и уреазную активность почвы (Соловьева, Сакаева, 2020).

Полисахариды, выделяемые микроводорослями, способствуют формированию биологических почвенных корок. Эти конгломераты микроорганизмов и почвенных частиц, образованные за счет высокой адгезивной способности экзополисахаридов и клеточных оболочек водорослей, снижают эрозию почвы, потери азота, увеличивают влагоемкость почвы (Lababpour, 2016; 2020).

Исследование механизмов взаимной регуляции водорослей и бактерий в альгобактериальных ассоциациях позволяет рассматривать их как ценозы со сложными экологическими связями, вектор которых зависит от внешних условий, численности популяций и других факторов. Водоросли, способные менять стратегию питания, играют в них ключевую созидательную роль (Заварзин, 2003; Зенова, Штина, 1990; Щур, 2016).

Фитогормоны продуцируются большинством микроводорослей и цианобактерий. Они отвечают за регуляцию клеточных процессов у растений. Ауксины, абсцизовая кислота, цитокинины, этилен и гиббереллины идентифицированы во многих линиях водорослей. Так ауксины (например, индол-3-уксусная кислота) стимулируют рост и развитие растений. Абсцизовая кислота регулирует адаптивные реакции на стрессовые факторы окружающей среды – засоленность, засуха и нехватка питательных веществ. Цитокинины отвечают за деление клеток, рост, биогенез, дифференцировку хлоропластов, регуляцию стадий

активности и покоя семян и вегетативных органов. Регуляторная активность фитогормонов, извлеченных из микроводорослей и цианобактерий, подчеркивает дополнительные преимущества использования этих организмов для стимуляции роста и защиты сельскохозяйственных культур от биотических и абиотических факторов (Шалыго, 2019; Crouzet, 2021; Gitau et al., 2021; Goncalves, 2021; Jiraskova, 2009; Mutum et al., 2022).

Антибиотические вещества, продуцируемые *Chlorella* и *Arthrospira*, играют роль регуляторов в экосистеме. Согласно исследованиям Роберта Пратта (1945), эффект от антибактериального агента «хлореллина» зависит от возраста культуры и может сказываться на численности самой зеленой микроводоросли, в определенные моменты снижая ее. Ингибирующее влияние, как в водной, так и в почвенной среде антибиотиков хлореллы и спирулины отмечено на прокариотические организмы включая цианобактерии, грибы и другие микроводоросли (Abedin et al., 2008 Ghasemi et al., 2007; Imane et al., 2018).

Многие исследователи публикуют факты, подтверждающие позитивное влияние альголизации на состояние почв (Лукьянов, 2016; Музафаров, Таубаев, 1977; Панкратова, 1981). Прежде всего, это проявляется в накоплении органического вещества благодаря выделяемым метаболитам и отмирающей биомассе клеток. Микроводоросли как источник органического вещества конкурируют с высшими растениями, поскольку скорость их фотосинтеза примерно в 10–50 раз выше (Uysal et al., 2015). Сложное строение клеточной стенки хлореллы делает органическое вещество погибших клеток медленно разлагающимся, тем самым консервируя углерод в почве (Nichols, 2020). Клетки *Chlorella* и *Arthrospira* состоят из органических соединений с высоким содержанием белка и витаминов на 86 % и 64,5 % соответственно (Мельников, 1991; Первушкин и др., 2004; Kumar et al., 2019; Uysal et al., 2017). Органические вещества в почвах – ресурс для развития гетеротрофных микроорганизмов, деятельность которых приводит к постепенной минерализации и высвобождению доступных высшим растениям форм азота и фосфора (Chatterjee et al., 2017).

Исследования Onder Uysal с соавт. (2017) показали, что биомасса хлореллы привносит в почву 5,5 % азота. В то время как цианобактерии могут вносить от 1,5 до 50 кг/га в год азота, обеспечивая до 15 % потребностей высших растений в этом элементе питания (Доброжан, 2014; Лукьянов, Стифеев, 2014; Мезенцева, 1987; Панкратова, 1985;). Исследования И.Д. Джуманиязова (1990) показали, что при внесении в агропочвы совместной суспензии хлореллы и сценедесмуса растет число и нитрифицирующих и азотофиксирующих бактерий. Замачивание семян и внесение суспензии в почву дало прирост аммонификаторов до 125 %. При этом повышается коэффициент использования растениями минерального азота до 18 %, закрепление азота в виде органических соединений до 20 % и снижаются его потери до 16 %. Использование в агроэкосистемах цианобактерий также способствует рециркуляции азота, позволяя избежать непрерывного производства азотных удобрений на химической основе. Почвенные корки, образуемые микроводорослями, предотвращают вымывание азота и, следовательно, риски загрязнения воды азотом (Goncalves, 2021). Таким образом, микроводоросли можно рассматривать как перспективный и, что важно, возобновляемый источник азота в агроценозах.

Использование микроводорослей и цианобактерий также может увеличить доступность других необходимых питательных веществ в почве для растений. Установлено, что *Chlorella* доставляет в почву до 1,1 % калия, а также Fe, Cu, Mo, Zn, Co и Mn (Илялетдинов, 1966; Uysal et al., 2015). Доступность фосфора для растений увеличивается за счет хелатирования ионов кальция веществами клеточных оболочек, экскреции клетками органических кислот, снижающих pH почв и изменения ферментативного фона (Uysal et al., 2015). Именно хелатирование экзометаболитами микроэлементов играют ключевую роль в повышении концентрации их обменных форм, а также сульфатов и нитратов (Chatterjee et al., 2017). Также известно, что эта оболочка уменьшает эрозию частиц и может адсорбировать заряженные катионы. Эти полисахариды также играют важную роль в аэрации почв (Mutum, 2022). Увеличение агрегации почвы является элементом

расширения пористости, что влияет на эффективность использования воды – водопроницаемость или инфильтрацию и удержание воды. Слизистые оболочки и экзополисахариды (ЭПС) также позволяют микроводорослям выживать при высыхании даже до 70 лет хранения и восстанавливать свою деятельность после влияния негативных экологических факторов (Nichols, 2020). Накопление частиц почвы в агрегатах создает богатые питательными веществами микроучастки, где оболочки покрыты отрицательно заряженными частицами глины, которые затем связывают положительно заряженные питательные вещества. Р.Р. Сафиулина (2014) в своих исследованиях отмечает, что устойчивость рыхлого песка к ветровой эрозии повышается в присутствии пустынных почвенных водорослей.

Arthrospira и *Chlorella*, согласно многочисленным исследованиям эффективны для ремедиации загрязненных почв и техногенных ландшафтов (Алексахина, 2009; Бачура, 2009, 2013; Богданова, 2010; Домрачева и др., 2009; Панова, Стифеев 2022; 2009; Федоренчик и др., 2014; Юдаков, 2021; Gao et al., 2011; Spain et al., 2021). Эксплерентность и высокая скорость воспроизведения микроводорослей позволяет использовать их в процессе очистки сточных вод и утилизации отходов животноводства (Лукьянов, Горбунова, 2013; Стифеев и др., 2013; Mallick, 1994).

Препараты на основе микроводорослей в качестве удобрений для сельскохозяйственных культур исследуются с начала XX в. Исследователи отмечают повышение устойчивости растений к основным заболеваниям (Джуманиязов, 1990; Крылов и др., 2016; Мельникова и др., 2018; Юсупова и др., 2021). При замачивании семян в чистой суспензии микроводорослей или ее растворе повышается до 100 % всхожесть, энергия прорастания и число зародышевых корешков (Джуманиязов, 1990; Лукьянов, 2016; Бачура, Матвиенкова, 2018; Бачура, 2020). Вегетативные органы демонстрируют хорошее развитие, а урожайность сельскохозяйственных культур увеличивается от 15 % и более (Джуманиязов, 1990; Гасанов, 2013; Мельников и др., 2014; Стифеев и др., 2015; Лукьянов, 2016; Аллагуватова, Гайсина, 2020). Качество продукции

растениеводства изменяется при применении микроводорослей в лучшую сторону (содержание белков, углеводов, жиров, микроэлементов и др.), и его, возможно, регулировать, используя разные сочетания микроводорослей и способы их внесения (Shukla, Gupta, 1967; Лукьянов, 2012; Лукьянов и др., 2018; Лукьянов, Стифеев, 2014, 2019; Gitau, 2021).

В России и других странах мира большая часть препаратов на основе микроводорослей относится к продукции для красоты и здоровья. На рынке как БАДы и косметические средства, так и биопрепараты для сельского хозяйства (в том числе корма для животных) представлены всего в трех формах: живая культура в виде суспензии, замороженная биомасса и сухая биомасса в виде порошка или таблеток. Это связано с ограниченным сроком хранения живой культуры и дороговизной изготовления сухой биомассы. В России производство биомассы только развивается и представлено несколькими десятками компаний. ООО Гера, ООО Альготек, Биологические системы, Биокомплекс, Органик+ и др. Недостаток информации о качестве и размере производств не позволяет оценить размер и динамику российского рынка биомассы микроводорослей на данный момент. Готовая продукция, представленная на маркетплейсах и в торговых сетях, в основном принадлежит нескольким компаниям. Это биопрепараты для садоводов и мелких фермерских хозяйств. Развитие промышленного производства биомассы с контролируемыми показателями продукции и создание научной базы по применению микроводорослей в регионах России позволит создать информационную и экономическую доступность альголизации, как дешевого, эффективного и экологичного метода биологизации земледелия (Мелихов и др., 2020).

ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ, МЕТОДЫ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Объекты и методика проведения исследований

Диссертационная работа по оценке биопрепаратов на основе микроводорослей для повышения продуктивности системы почва-растение выполнена в 2021-2025 гг. на базе кафедры почвоведения и агрохимии и учебно-опытного хозяйства «Миндерлинское» Красноярского государственного аграрного университета. В рамках исследования проведены лабораторные, микрополевые и полевые опыты.

Объектами исследования явились агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный, агросерая лесная типичная почва, яровая пшеница сорта Новосибирская 31 (*Triticum aestivum* L.), огурец сорта Изящный (*Cucumis sativus* L.), кабачек сорта Ролик (*Cucurbita pepo*), томат сорта Петруша огородник (*Lycopersicon esculentum* Mill. = syn. *Solanum lycopersicum* L.), редис Жара (*Raphanus sativus*), кресс-салата Дукат (*Lepidium sativum*), суспензия и биопрепараты на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* Beyerinck и цианобактерии *Arthrospira platensis* Nordstedt.

Исследования по оценке действия культуры микроводоросли на ростовые процессы в начальной стадии развития сельскохозяйственных культур проведены в лабораторном опыте № 1. Объектами исследования явились семена яровой пшеницы сорта Новосибирская 31, редиса Жара, кресс-салата Дукат и биопрепарат на основе 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris* Beyerinck. В эксперименте использовали культуру *Chlorella vulgaris*, полученную после 7 суток выращивания в люминостате при круглосуточном освещении на питательной среде Тамия. Лабораторный опыт провели по схеме: 1. Вода (контроль); 2. Культура *Chlorella vulgaris* (1 % раствор). Замачивание семян водой и культурой *Chlorella vulgaris* осуществляли перед их проращиванием в течение 6 часов. Энергия прорастания и всхожесть семян сельскохозяйственных культур определялась по ГОСТ 12038-84.

Семена сельскохозяйственных культур. После определения всхожести проводили учет биометрических показателей проростков.

Оценка влияния биопрепаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* на физиологические и биометрические показатели растений кабачка и огурца проведена в лабораторном опыте № 2. Объектами исследования являлись огурец сорта Изящный, кабачек сорта Ролик и биопрепарат на основе 1 % раствора культуры *Chlorella vulgaris*. Схема лабораторного опыта включала следующие варианты: 1. Вода (контроль); 2. Культура *Chlorella vulgaris* (1 % раствор). Замачивание семян водой и культурой *Chlorella vulgaris* перед посевом осуществлялось в течение 6 часов. Семена после замачивания были посеяны в почву (агрочернозем). В эксперименте использовались сосуды ёмкостью 1л в 3-х кратной повторности. Эксперимент проводился при круглосуточном искусственном освещении лампами светодиодными 2000 Лм с цветовой температурой 6500 К, постоянной температуре 23-25 °С. Полив проводился ежедневно по 50 мл на сосуд. Учет надземной фитомассы и корней культур осуществлен на 21 день вегетации. По окончании эксперимента измерялась длина растений, длина главного корня, фитомасса растений. В фитомассе огурца и кабачка определяли содержание хлорофиллов а и b по изменению оптической плотности вытяжки (экстракта) пигментов на спектрофотометре при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения хлорофиллов (а - 663 нм и b - 645 нм) и максимуму поглощения каротиноидов (440,5 нм) с последующим расчетом концентрации пигментов по уравнениям Ветштейна и Хольма для 100 %-го ацетона.

Исследования по оценке влияния биопрепаратов на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* на физиологические и биометрические показатели растений огурца проведены в лабораторном опыте № 3. Объектами исследования явились огурец сорта Изящный, биопрепараты на основе суспензии микроводоросли *Chlorella vulgaris* и цианобактерии *Arthrospira platensis* в жидкой форме и в виде гранул. Исследования проведены по следующей схеме: 1. Контроль

(вода); 2. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris*; 3. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* и 2-х кратное опрыскивание надземной части 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris*; 4. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* и гранулы *Chlorella vulgaris* (при посеве); 5. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* + гранулы *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* (при посеве); 6. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* + гранулы *Arthrospira platensis* (при посеве); 7. Замачивание семян водой и 2-х кратное опрыскивание надземной части 1 % раствором *Chlorella vulgaris*; 8. Замачивание семян водой и гранулы *Chlorella vulgaris* (при посеве). 9. Замачивание семян водой и гранулы *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* (при посеве); 10. Замачивание семян водой и гранулы *Arthrospira. platensis* (при посеве).

Семена после замачивания были посеяны в почву (агрозернозем). Гранулы вносились в почву при посеве вместе с семенами. Масса гранул рассчитывалась таким образом, чтобы содержание в нем суспензии соответствовало эквивалентной дозе жидкого препарата. Концентрация суспензии в гранулах и вносимая при опрыскивании раствором соответствовали. Опыскивание растений проводили в фазу 2-3 настоящих листьев. В эксперименте использовались сосуды ёмкостью 1л в 6-кратной повторности. Эксперимент проводился при круглосуточном искусственном освещении светодиодными лампами 2000 Лм с цветовой температурой 6500 К, постоянной температуре 23-25 °С. Полив проводился ежедневно по 50 мл на сосуд. По окончании 28 суток вегетации растений огурца в 3-х повторностях измерялась длина растений, длина главного корня, фитомасса растений. В фитомассе огурца определяли общее содержание хлорофилла и чистую продуктивность фотосинтеза. После 42 суток вегетации в 3-х повторностях были проведены учеты фитомасса растений, длины растений, массы и объема корней (Рожков, 2008).

*Микрополевым опытом по изучению влияния способов применения биопрепаратов на основе культуры микроводоросли *Chlorella vulgaris* на*

продуктивность томата проведен в 2022-2023 гг. в Красноярской лесостепи (56°25'N и 92°53'E). Объектом исследования является агросерая лесная типичная почва, биопрепараты на основе культуры *Chlorella vulgaris* и томат сорта Петруша огородник. Агросерая типичная почва тяжелосуглинистого гранулометрического состава характеризовалась высоким содержанием гумуса (6,3-6,9 %), высокой суммой обменных оснований (24,4-26,0 ммоль/100г), слабокислой реакцией среды (pH_{KCl} 5,1-5,2).

Микрополевой опыт проводили по следующей схеме: 1. Контроль (замачивание семян водой); 2. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris*; 3. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* + опрыскивание 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* в фазу 5-ти настоящих листьев; 4. Замачивание семян 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* + внесение гранул с *Chlorella vulgaris* при пикировке растений. Вид растений томатов в условиях микрополевого опыта представлен на рисунок 1.



Рисунок 1 – Внешний вид растений томата в начале цветения и плодоношения, 2023г.

Замачивание семян водой и раствором суспензии *Chlorella vulgaris* осуществлялось в течение 6-х часов. Для замачивания семян и опрыскивания растений в фазу 5-ти настоящих листьев использовался 1 % раствор суспензии *Chlorella vulgaris*. Гранулы, используемые в опыте при пикировке рассады,

представляли собой культуру, иммобилизованную в биологический полимер. Количество гранул при пикировке растений вносилось из расчета 5 шт. на 500 г почвы. В этом количестве гранул концентрация суспензии микроводоросли соответствовала вносимой в виде 1 % раствора.

Посев томатов для получения рассады проведен 21-25 марта, пикировка в фазу двух настоящих листьев – 1-4 апреля, высадка в открытый грунт – 10-14 июня. Схема посадки – 4 растения на 1 м². Площадь опытных делянок – 1 м², повторность – 4-х кратная, размещение – систематическое. В опыте возделывали томаты сорта Петруша огородник, хорошо приспособленные к нестабильной погоде в Сибири, в т.ч. в открытом грунте.

Учет урожая томатов проведен в три срока - первой, второй и третьей декаде августа. Структура урожая томатов определена в последний срок учета урожая (22-28 августа). В структуре урожая учитывали высоту растений, число ветвей, надземную массу растений, количество листьев, массу листьев, площадь листьев, удельную плотность листьев, массу плодов с 1 м², количество плодов шт./м², количество плодов на 1 растение, среднюю массу плодов с 1 растения. Качественная биохимическая характеристика плодов томатов включала определение нитратного азота, сухого вещества, сахара и витамина С.

Полевой опыт № 1 по изучению влияния сроков применения 1 % суспензии и термически обработанной суспензии Chlorella vulgaris на свойства агрочернозема и урожайность яровой пшеницы проведен в 2021 году в учебно-опытном хозяйстве Красноярского государственного аграрного университета «Миндерлинское» в Красноярской лесостепи.

Объект исследования – агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный, яровая пшеница сорта Новосибирская 31, биопрепараты на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris*. Агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный опытного поля характеризуется тяжелосуглинистым гранулометрическим составом с высоким содержанием гумуса (6,9-7,8 %), очень высокой суммой обменных оснований (52,0-57,5 ммоль/100г), нейтральной реакцией почвенного раствора

(pH_{H_2O} – 6,8-7,0), повышенным содержанием подвижного фосфора (225,4-214,0 мг/кг) и очень высоким обменного калия (231,0-180,9 мг/кг). Профиль агрочернозема глинисто-иллювиального типичного представлен на рисунок 2.



Рисунок 2 – Профиль агрочернозема глинисто-иллювиального типичного опытного участка

Строение профиля и морфологическое описание почвы приведено ниже.

Агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный среднесиловой глинистый на желто-бурой карбонатной глине.

PU – 0-16 см. Свежий, черный, глинистый, комковато-зернистый, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещинчатый, не вскипает, гумусовые вещества, обильно встречаются корни, переход по «плужной подошве».

AU – 16-36 см. Свежий, черный, глинистый, комковато-зернистый, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещинчатый, гумусовые вещества, корней умеренно, не вскипает, переход постепенный по цвету.

AUB – 36-53 см. Свежий, желто-бурый с серыми гумусовыми затеками, глинистый, комковато-зернистый, несколько уплотнен, тонкопористый,

тонкотрещиноватый, гумусовые вещества, не вскипает, единично корни, переход постепенный языковатый.

VI – 53-79 см. Влажный, на желто-буром фоне черные гумусовые затеки, глинистый, уплотнен, ореховатый, ходы корней, пористый, тонкотрещиноватый, не вскипает, переход по границе вскипания от карбонатов.

Вмс – 79-110 см. Влажный, желто-бурый с белесоватым оттенком, глинистый, уплотнен, ореховатый, плитчатой текстуры, пористый, тонкотрещиноватый, карбонаты в форме псевдомицелия, вскипает бурное, ржаво-охристые пятна, кротовины.

Сса – 110 см и ниже. Желто-бурая влажная карбонатная глина.

Яровая пшеница Новосибирская 31 возделывалась по чистому пару. *Новосибирская 31* – среднеранний сорт яровой мягкой пшеницы. Основные характеристики сорта: вегетационный период 72-95 дней; устойчив к полеганию; средnezасухоустойчив. Хлебопекарные качества хорошие. Сильная пшеница. Включен в Госреестр по Западно-Сибирскому и Восточно-Сибирскому регионам. Рекомендован для возделывания в Новосибирской области для зон подтайги низменности, подтайги предгорий, северной лесостепи низменности и Северной лесостепи предгорий (URL: <https://glavagronom.ru/base/seeds/zernovie-pshenica-miyagkaya-yarovaya-novosibirskaya-31-institut-citologii-i-genetiki-so-ran-925336>).

Схема полевого опыта включала в себя следующие варианты: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. Фон + 1 % раствор суспензии *Chlorella vulgaris* (1-кратная); 3. Фон + 1 % раствор суспензии *Chlorella vulgaris* (2-х-кратная); 4. Фон + 1 % раствор суспензии *Chlorella vulgaris* (3-х-кратная); 5. Фон + 1 % раствор суспензии *Chlorella vulgaris* термически обработанной (1-кратная); 6. Фон + 1 % раствор суспензии *Chlorella vulgaris* термически обработанной (2-х-кратная); 7. Фон + 1 % раствор суспензии *Chlorella vulgaris* термически обработанной (3-х-кратная). Вид полевого опыта представлен на рисунок 3. Яровая пшеница возделывалась по чистому пару. Химическая защита яровой пшеницы включала протравливание семян препаратом Алькасар, КС (Дифеноконазол +

Ципроконазол) (0,75 л/т); обработку посевов гербицидами Элант-Премиум (2,4-Д кислота + Дикамба кислоты (2-этилгексиловый эфир)) (0,5 л/га), Сталкер (Трибенурон-метил) (12 г/га) и Тайпан (Феноксапроп-П-этил + Клодинафоп-пропаргил + Мефенпир-диэтил) (0,35 л/га); фунгицидом Зенон Аэро (Тебуконазол + триадимефон) (1,2 л/га) и инсектицидом Цунами (Альфа-циперметрин) (0,2 л/га).



Рисунок 3 – Вид полевого опыта в фазу колошения яровой пшеницы

Термическая обработка суспензии *Chlorella vulgaris* осуществлялась медленным нагреванием до температуры 50 С°. После достижения температуры, нагревание моментально прекращали. Обработка посевов препаратами на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* проводилась согласно схеме опыта в период всходов, кущения и колошения пшеницы. В опыте использовался 1 % водный раствор суспензии микроводоросли *Chlorella vulgaris*. Однократная обработка осуществлялась по всходам, двухкратная по всходам и кущению в баковых смесях с гербицидами, трехкратная – по всходам, кущению и колошению яровой пшеницы в баковых смесях с фунгицидами и инсектицидами. Норма расхода рабочей жидкости рассчитывалась исходя из гектарной нормы в 300 л/га. Общая площадь делянки – 1000 м², учетная – 100 м², расположение систематическое. Отбор

почвенных образцов проводили в слое 0-20 см в фазу кущения (июнь) и молочной спелости (август) пшеницы.

В образцах почвы определяли: влажность, плотность сложения, структурный состав, реакцию среды, гумус и его водорастворимые соединения, общий азот, трудно- и легкогидролизуемый азот, аммонийный и нитратный азот, подвижный фосфор, обменный калий, интенсивность потенциального дыхания почвы, протеазу, уреазу и каталазу. Густоту стояния растений перед уборкой и отбор снопов для определения структуры урожая проведен на площади 1 м² в 4-кратной повторности. Учет урожая осуществлен в 4-кратной повторности пробными площадями по 20 м². Урожайность приведена к стандартной 14 %-й влажности и 100 %-й чистоте.

*В полевом опыте № 2 выполнены исследования, по агроэкологической оценке, влияния форм биопрепаратов на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* на систему почва-растение. Исследования проведены в 2022-2023 гг. в учебно-опытном хозяйстве Красноярского государственного аграрного университета «Миндерлинское».*

Объект исследования – агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный, яровая пшеница сорта Новосибирская 31, биопрепараты на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* и цианобактерии *Arthrospira platensis* в виде суспензии и гранул.

Схема опыта включала в себя следующие варианты: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *Chlorella vulgaris* (2-х-кратная обработка посевов 1 % раствором); 3. *Chlorella vulgaris* (гранулы при посеве); 4. *Chlorella vulgaris* + *Arthrospira platensis* (гранулы при посеве); 5. *Arthrospira platensis* (гранулы при посеве). Вид полевого опыта представлен на рисунок 4.

Гранулы вносились в почву на глубину 5-6 см одновременно при посеве яровой пшеницы. Обработка вегетирующих посевов 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* проводилась в баковых смесях с гербицидами, фунгицидами и инсектицидами. Норма расхода рабочей жидкости рассчитывалась исходя из гектарной нормы в 300 л/га.



Рисунок 4 – Вид полевого опыта в фазу кущения яровой пшеницы, 2023г.

Яровая пшеница возделывалась по чистому пару. Химическая защита культуры включала протравливание семян препаратом Алькасар, КС (Дифеноконазол + Ципроконазол) (0,75 л/т); обработку посевов гербицидами Элант-Премиум (2,4-Д кислота + Дикамба кислоты (2-этилгексиловый эфир)) (0,5 л/га), Сталкер (Трибенурон-метил) (12 г/га) и Тайпан (Феноксапроп-П-этил + Клодинафоп-пропаргил + Мефенпир-диэтил) (0,35 л/га); фунгицидом Зенон Аэро (Тебуконазол + триадимефон) (1,2 л/га) и инсектицидом Цунами (Альфа-циперметрин) (0,2 л/га).

Общая площадь опытных делянок - 200 м², учетная – 100 м². Повторность опыта 4-х кратная, расположение делянок – систематическое. Отбор почвенных образцов проводился в слоях 0-20 см и 20-40 см в фазы всходов (июнь), колошения (июль), молочной спелости (август) и полной спелости (сентябрь) пшеницы.

В образцах почвы определяли: влажность, плотность сложения, структурный состав, реакцию среды, гумус и его подвижные соединения, общий азот, трудно- и легкогидролизуемый азот, аммонийный и нитратный азот, подвижный фосфор, обменный калий, интенсивность потенциального дыхания почвы, уреазу и

каталазу. Густоту стояния растений перед уборкой и отбор снопов для определения структуры урожая проведен на площади 1 м² в 4-кратной повторности. Учет урожая осуществлен в 4-кратной повторности пробными площадями по 20 м². Урожайность приведена к стандартной 14%-й влажности и 100%-й чистоте.

2.2 Методы аналитических исследований

Основные показатели по характеристике почв получены при помощи общепринятых методов:

- общая влага термовесовым методом (Практикум..., 1986);
- структурный состав по Н.И. Саввинову (Методическое..., 1986);
- плотность сложения по методу Н.А. Качинского (Александрова, 1967);
- реакция почвенного раствора ионометрическим методом (ГОСТ 26423-85);
- сумма обменных оснований по методу Каппена (ГОСТ 27821-88);
- общий углерод гумуса по Тюрину (Аринушкина, 1970);
- водорастворимые соединения гумуса методом бихроматной окисляемости по Тюрину (Аринушкина, 1970) (экстракцию водорастворимого углерода осуществляли водой при комнатной температуре соотношением почвы и воды 1:5);
- щелочегидролизующие соединения гумуса (C_{NaOH} и в его составе $C_{гк}$ и $C_{фк}$) по И.В. Тюрину в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой (1980) (экстракцию щелочнорастворимого углерода и в его составе $C_{ГК}$ и $C_{ФК}$ осуществляли 0,1 н раствором NaOH).
- валовой азот (ГОСТ 26107-84);
- нитратный азот (ГОСТ 26488-85);
- аммонийный азот (ГОСТ 26489-85);
- легкогидролизующий и трудногидролизующий азот по методу Корнфильда (Аринушкина, 1970);

- подвижный фосфор (ГОСТ 26204-91);
- обменный калий (ГОСТ 26204-91).
- потенциальное почвенное дыхание в лабораторных условиях при экспозиции 24 часа (Биодиагностика почв..., 2002);
- уреазы по методу Щербаковой и ЦИНАО (Хазиев, 2005; Наими, 2019);
- каталазы по методу Джонсона и Темпле (Хазиев, 2005);
- протеазы по методу Гоффманна и Тейхера (Гоффман, Тейхер, 1957).

Показатели по химическому составу растительных образцов получены при помощи следующих методов:

- нитраты нитратометром «Соэкс»;
- сухого вещества (ГОСТ 28561-90);
- сахара по М 04-69-2011;
- витамин С по М 04-86-2016 на системе капиллярного электрофореза Капель-105М;
- хлорофилл А и Б (Воробьев и др., 2013);
- чистая продуктивность фотосинтеза (Воробьев и др., 2013).

Статистический анализ результатов проводили с использованием стандартного программного пакета Microsoft Excel для Windows 10.

2.3 Погодные условия в годы проведения исследований

Красноярская лесостепь расположена в глубине материка, в большом удалении от действия морских и океанических факторов, чем и определяется основная особенность ее климата – относительная резкая его континентальность. Она проявляется в первую очередь в больших амплитудах температур между месяцами – самым холодным январем и самым теплым июлем. По агроклиматическому районированию эта территория относится к умеренному поясу прохладной зоны. Здесь выпадает 350-450 мм осадков в год. Среднегодовая температура воздуха изменяется от 0,5 до 1,3° С, иногда понижаясь до минус 2° С.

Продолжительность периода биологической активности варьирует от 90 до 115 сут. Сумма активных температур составляет 1550-1800° С, почва промерзает на глубину 1,5-3 м.

Полевые опыты с биопрепаратами на основе микроводорослей проводились на территории землепользования учебно-опытного хозяйства «Миндерлинское» в вегетационные сезоны 2021-2023 гг., отличающиеся по погодным условиям. Вегетационный сезон 2021 года характеризовался как теплый и влагообеспеченный (рисунок 5). Начало вегетационного периода сопровождалась высокой среднесуточной температурой воздуха и небольшим количеством осадков. Июньский период сопровождался большим количеством осадков, что превысило среднемноголетние значения на 75 %. В этот период температура воздуха ниже среднемноголетнего показателя на 0,7 °С. В июле температура воздуха превышала среднемноголетний уровень на 0,3 °С, количество осадков составляло 78 % к норме. Август отличался повышенной температурой воздуха, среднемноголетний уровень в этом месяце выше на 3 °С. Количество осадков составляло 66 % к норме.

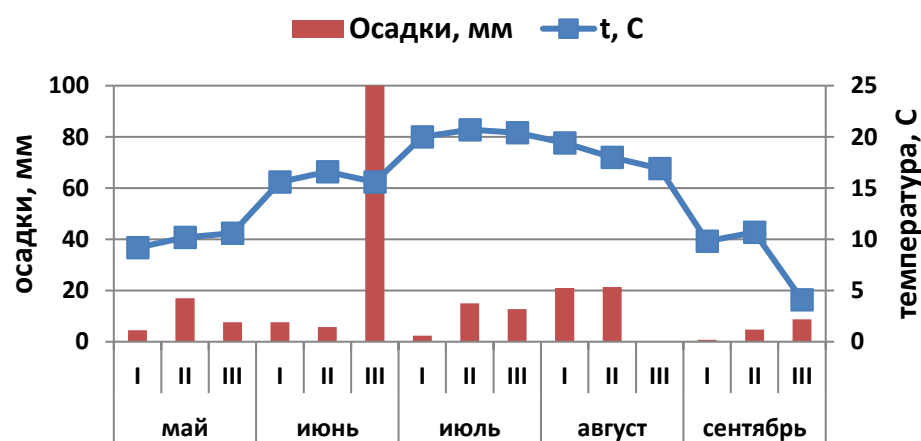


Рисунок 5 – Динамика температуры и осадков за вегетационный сезон 2021 года по данным метеостанции «Сухобузимское»

Погодные условия 2022 года также характеризовались как теплые и влагообеспеченные (рисунок 6). При этом сложившиеся в мае-июне погодные условия можно охарактеризовать как аномальные с точки зрения режимов теплообеспеченности и количества выпавших осадков (Абакумова, 2023).

Среднесуточная температура в мае ($13,4^{\circ}\text{C}$) была выше многолетнего значения на 5°C . Высокие температуры сопровождались меньшим, по сравнению со средним многолетним, количеством осадков, сумма которых составила 26,9 мм или 84 %. В первой декаде июня зафиксировано существенное похолодание в ночное время, сопровождавшееся заморозками до минус 5°C . Во второй декаде было теплее среднемесячной нормы. Количество выпавших осадков за две декады июня превысило месячную норму.

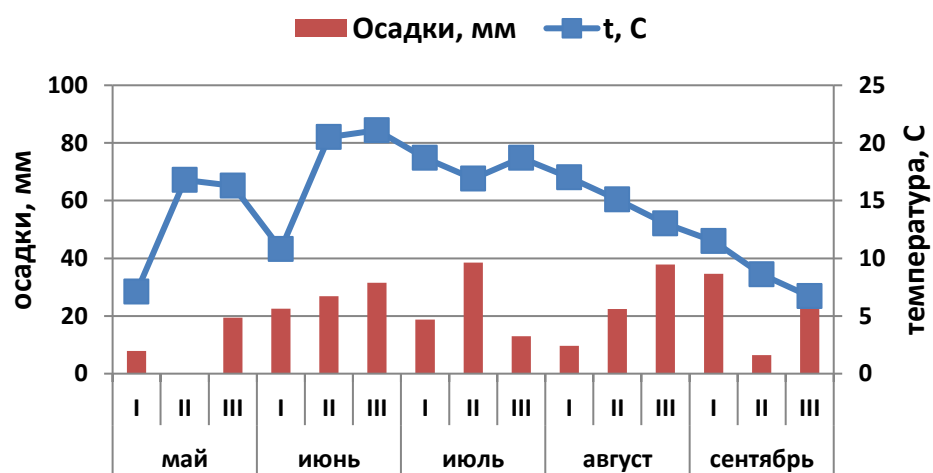


Рисунок 6 – Динамика температуры и осадков за вегетационный сезон 2022 года по данным метеостанции «Сухобузимское»

Температурный режим июля, августа и сентября соответствовал среднемноголетним показателям. При неравномерном выпадении осадков их количество в июле и августе соответствовало среднемноголетнему уровню. При этом во второй декаде июля и третьей декаде августа выпало половина месячной нормы осадков. В сентябре выпало осадков на 65 % больше среднемноголетнего уровня. Избыточной влажностью отличалась первая декада сентября (35 мм).

Вегетационный сезон 2023 года характеризовался как теплый и засушливый. Весна характеризовалась как холодная и затяжная. Только в третьей декаде мая температура в среднем достигала $12,2^{\circ}\text{C}$. Начало вегетационного периода сопровождалось достаточным количеством осадков (рисунок 7). Летние месяцы вегетационного сезона 2023 года характеризовались как теплые и превышали

среднемноголетнюю температуру воздуха на 2-3° С. При этом количество осадков в июньский, июльский и августовские периоды составило 65-69 % от среднемноголетнего уровня.

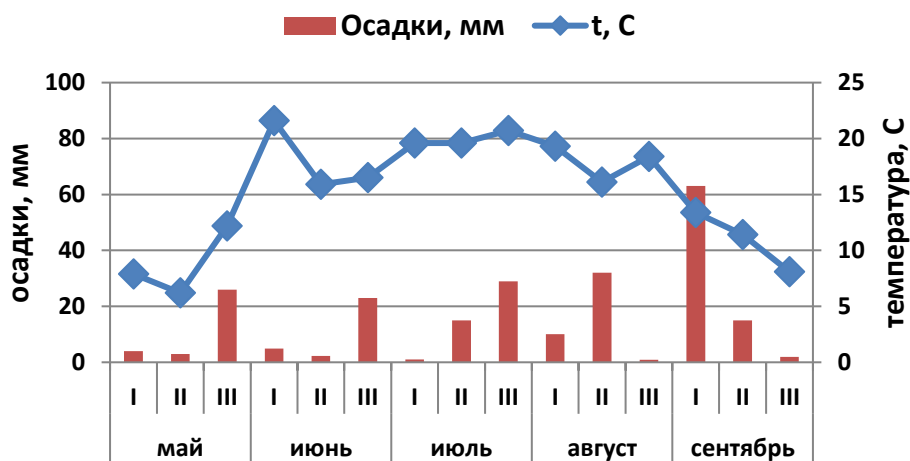


Рисунок 7 – Динамика температуры и осадков за вегетационный сезон 2023 года по данным метеостанции «Сухобузимское»

ГТК оценивалось величиной 0,59-0,85, что свидетельствует о засушливых условиях. Самым острозасушливым оказался июнь месяц. В первой и второй декаде июня по данным метеостанции «Сухобузимо» выпало всего от 2 до 5 мм осадков.

В годы проведения микрополевого опыта с томатами (2022-2023гг.) учитывались погодные условия по данным метеостанции «Минино».

Вегетационный сезон 2022 года характеризовался как теплый и неравномерно влагообеспеченный. Начало вегетационного периода сопровождалось высокой среднесуточной температурой воздуха и небольшим количеством осадков (рисунок 8). Гидротермический коэффициент в мае не превышал 0,5, что соответствует сухим условиям. Засушливые условия отмечались и в июльский период (ГТК = 0,9). При температуре воздуха, приближающейся к среднемноголетним показателям, сумма осадков составила 49 мм, что ниже среднемноголетнего уровня на 29 %. Июнь и август отличались избыточным увлажнением. Сумма осадков в эти периоды превышала среднемноголетний уровень на 71-15 %.

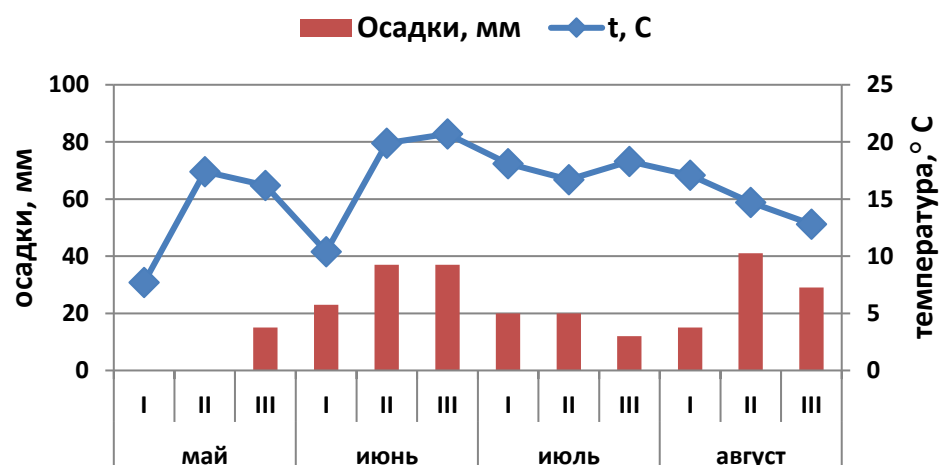


Рисунок 8 – Динамика температуры и осадков за вегетационный сезон 2023 года по данным метеостанции «Минино»

Погодные условия вегетационного сезона 2023 года отличались засушливостью и температурами атмосферного воздуха, превышающими среднемноголетние значения для этой территории (рисунок 9). Начало вегетационного сезона отличалось избыточным увлажнением и превышением температуры воздуха на 1°C по сравнению со среднемноголетними значениями.

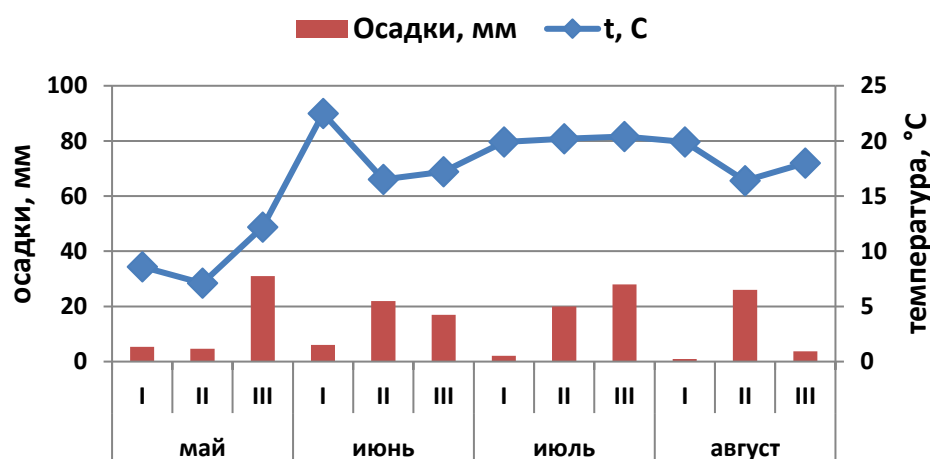


Рисунок 9 – Динамика температуры и осадков за вегетационный сезон 2023 года по данным метеостанции «Минино»

При неравномерном выпадении осадков в мае, когда большая их часть приходилась на третью декаду, ГТК составил 1,4. Июнь характеризовался как

жаркий и острозасушливый. Осадков в этот период выпало 80 % от средне многолетних значений. В июле и августе температура воздуха превышала средне многолетние значения на 2-3°C. При этом количество выпавших осадков, соответствовало засушливым и острозасушливым условиям. При ГТК 0,8 большая часть осадков приходилась на вторую и третью декаду июля. Созревание томатов в августе проходило на фоне очень засушливых условий (ГТК 0,6) и жаркой погоды. Средняя температура августа составила 18,1°C.

Таким образом, наряду с типичными показателями для зоны Красноярской лесостепи наблюдались отклонения от средне многолетних значений по количеству выпавших осадков, температуре воздуха и ГТК в отдельные декады месяцев, что оказало влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур.

ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИНОКУЛЯТА МИКРОВОДОРОСЛИ *CLORELLA VULGARIS* И ЦИАНОБАКТЕРИИ *ARTROSPIRA PLATENSIS*

Штаммы микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer и *Arthrospira platensis* Nordstedt для проведения лабораторных и полевых опытов были приобретены у ФИЦ Института биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН. Подбор штаммов происходил по критериям их продуктивности, биохимическому составу, физиологическим особенностям и эффективности в растениеводстве (Владимирова, 1962; Gao, 2011).

Chlorella vulgaris Beijer – высокопродуктивный и простой в культивировании штамм. Он эффективно используется в животноводстве в качестве кормовой добавки, как удобрение в растениеводстве, для очистки сточных вод, получения биодизельного топлива и как многофункциональный компонент системах жизнеобеспечения (Bold, 1942; Грибовская и др., 2011; Стифеев и др., 2013; Шалыго, 2019). Культивирование хлореллы подробно исследовано рядом учёных (Гайсина и др., 2008; Лукьянов и др., 2013; Тренкеншу, 1999; Тренкеншу, Лелеков, 2005; Цоглин, Пронина, 2012). Существует не один десяток модификаций культиваторов разного типа и питательных сред (Перт, 1978; Упитис, 1983; Chaumont, 1993; Богданова и др., 2019).

Arthrospira platensis (Nordstedt) - штамм цианобактерии, широко используемый для производства пищевых продуктов, кормов и высококачественного белка (Грибовская и др., 2011; Лелеков, Геворгиз, 2017; Jung, Ch. G, 2021). Технология его культивирования хорошо изучена и постоянно развивается ввиду большого потенциала для биотехнологий (Никитина и др., 2006; Горбунова, Жондарева, 2017).

Выращивание микроводорослей и цианобактерий с целью использования их как биопрепаратов в растениеводстве производилось в накопительном режиме в культиваторе кассетного типа, сконструированном автором диссертационной

работы на основе результатов исследований по интенсификации культивирования (Владимирова, Семененко, 1962; Лисовский, 1964).

Культиватор представляет собой стеллаж с закрепленными осветительными приборами, компрессором, баллоном с углекислым газом, воздуховодами и обогревателями (рисунок 10). Внутренние поверхности стеллажа покрыты светоотражающим теплоизоляционным материалом. На полках размещаются емкости для культивирования (кассеты).

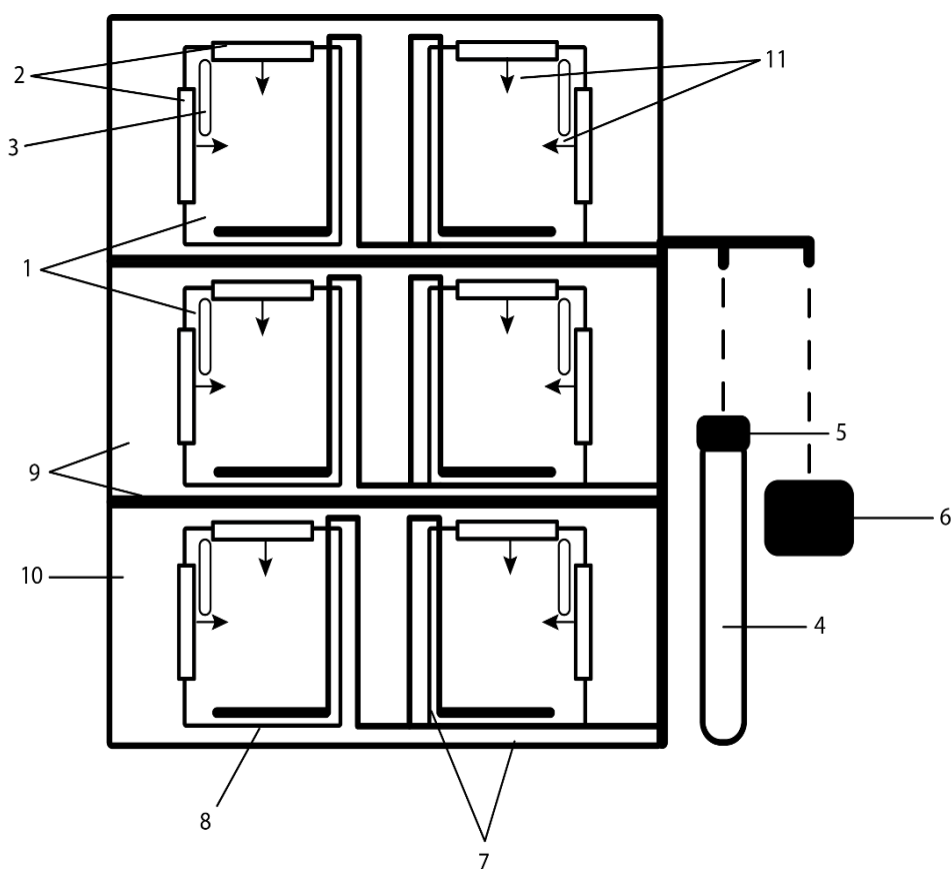


Рисунок 10 - Конструкция культиватора кассетного: 1-кассета, 2-светодиодные источники света, 3 - нагреватель, 4 - баллон с углекислым газом, 5 - клапан-редуктор, 6 - компрессор воздушный, 7 - воздуховод, 8 - система аэрации, 9 - светоотражающий материал, 10 - стеллаж, 11 - направление света от источника

Материал кассет - полипропилен (PP5- пластик пищевой), устойчивый к растрескиванию, воздействию химических веществ и микроорганизмов, обладает приемлемым пропусканием света (85-90 %), экологичностью, устойчив при

стерилизации паром (Богуславская, 2006; Полипропилен..., 2025). Легкость и прочность обеспечивают простой и качественный уход за кассетами. Размер кассет и их количество можно варьировать в зависимости от поставленных при культивировании целей, регулируя освещённость и объем производимой культуры. С боковой и верхней стороны каждой кассеты закреплены два светодиодных светильника со световым потоком у каждого 5000Лм и световой температурой 6500 К и 4000К. Освещение в процессе культивирования осуществляется круглосуточно. Каждая кассета снабжена донным аэратором, к которому по воздуховоду компрессором подается газовоздушная смесь. Уровень подачи углекислого газа регулируется редуктором, закрепленным на баллоне со сжиженным газом. Каждая емкость снабжена погружным аквариумным обогревателем мощностью 25 Вт. Производство биомассы происходило при искусственном круглосуточном освещения светодиодными светильниками (10000 Лм) и температуре 28 °С и 35 °С для *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* соответственно. Для аэрации и перемешивания через культуру пропускалась газо-воздушная смесь с содержанием CO₂ на уровне 3 % и интенсивностью 60 л /час для *Chlorella vulgaris* и 30 л/час для *Arthrospira platensis*.

Чистые культуры микроорганизмов поддерживали на жидких питательных средах при освещении 1000 Лм. Для микроводоросли *Chlorella vulgaris* использовалась минеральная питательная среда Тамия следующего состава (г/л): KNO₃ – 5,0; MgSO₄·7H₂O – 2,5; KHPO₄ – 1,25; Fe цитрат – 0,137; раствор микроэлементов – 1,0 мл/л (Упитис, 1983). Для цианобактерии *Arthrospira platensis* использовалась минеральная питательная среда Зарукка следующего состава (г/л): KH₂PO₄ – 1; NaHCO₃ – 16,8; NaNO₃ – 2,5; MgSO₄·7H₂O – 0,2; NaCl – 1,0; K₂SO₄ – 1,0; CaCl₂·2H₂O – 0,04; Fe цитрат – 0,04; раствор микроэлементов – 1,0 мл/л (Пиневиц, 1970).

Определение концентрации микроводорослей в суспензии производили по показателю оптической плотности на фотоэлектроколориметре КФК-2 (Сиренко, 1975; Толеутаев, 2018). Для *Chlorella vulgaris* использовали светофильтр $\lambda = 490$ нм

и кювету с толщиной слоя жидкости 1 см. Для *Arthrospira platensis* - светофильтр $\lambda = 750$ нм и кювету с толщиной слоя жидкости 0,5 см (Геворгиз, 2005). При оптической плотности выше 1 ед.опт.плотн. суспензию перед измерением разбавляли питательной средой близкой температуры в 2 раза.

Для определения доли сухого вещества в культуре на разных этапах культивирования биомассу отделяли от культуральной жидкости методом вакуумной фильтрации (Пименова, 1995). Мембранные фильтры с биомассой высушивали в сушильном шкафу при температуре 110 °С в стеклянных бюксах в течение 2 ч. Экспонировали в эксикаторе с безводным хлоридом кальция в течении 1 часа или более до достижения постоянной массы с погрешностью не более 0,1 мг. На основе полученных экспериментальных данных построены калибровочные график для определения сухой биомассы микроводорослей по оптической плотности культуры (рисунок 11). Далее его использовали для определения массы сухого вещества по оптической плотности.

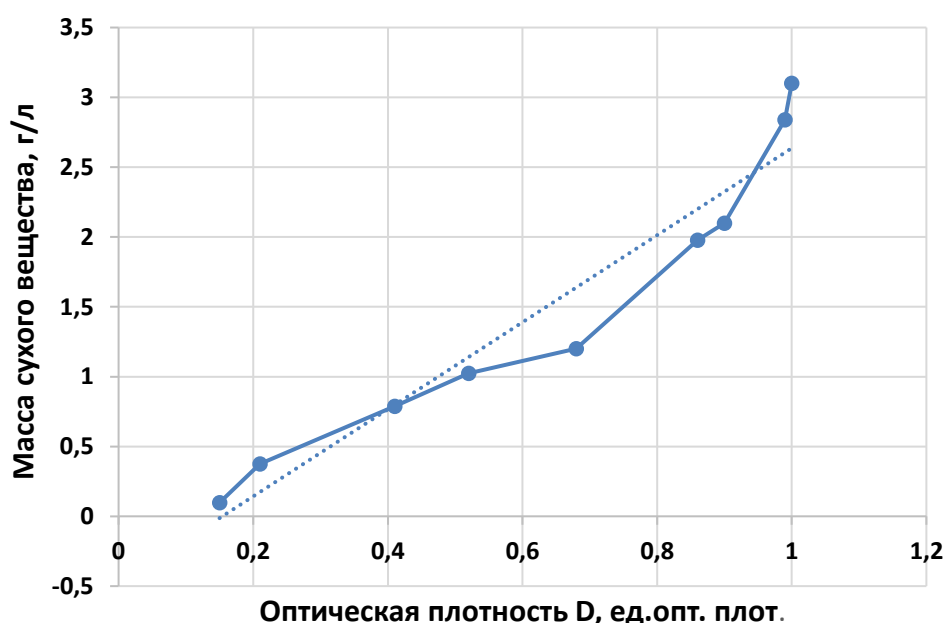


Рисунок 11 – Зависимость сухой биомассы *Chlorella vulgaris* от оптической плотности суспензии

Зависимость биомассы хлореллы от оптической плотности практически линейная. Важно отметить, что данный калибровочный график функционален

только для регулярно (не реже, чем каждые 7-10 дней) пересеваемой культуры. При использовании для посева инокулята старше 14 дней клеткам характерно образование конгломератов, что влияет на фотометрические показатели. Это связано с особыми биохимическими механизмами в «стареющей» культуре, описанные Робертом Праттом (1943). Вероятно, исследование влияния «стареющей» культуры, как источника веществ-ингибиторов роста на вредителей и физиологическое состояние культурных растений может открыть перспективное направление биопрепаратов.

Зависимость сухой биомассы *Arthrospira* (рисунок 12) носит линейный характер до плотности 0,66, далее следует резкий рост, связанный вероятно с адгезией трихом цианобактерии, линейные размеры которых значительно увеличиваются в этой стадии.

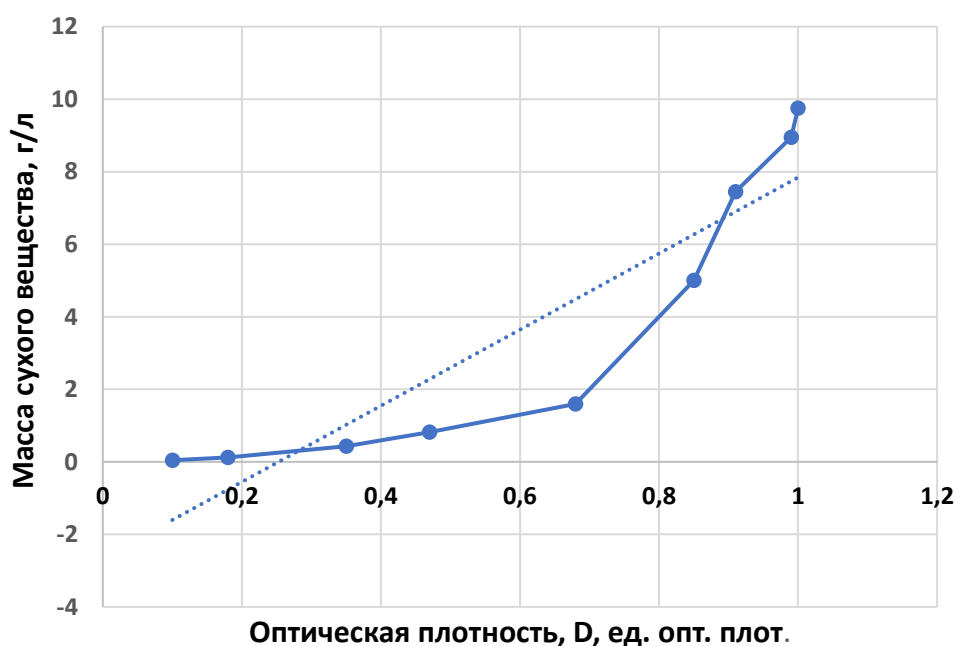


Рисунок 12 – Зависимость сухой биомассы *Arthrospira platensis* от оптической плотности суспензии

На рисунок 13 представлены кинетические кривые роста микроводорослей при описанных условиях культивирования, которые демонстрируют лаг-фазу, экспоненциальную и стационарную фазы (Лелеков, Тренкеншу, 2007). В лаг-фазе происходит адаптация клеток и подготовка к делению. Ее длительность зависит от

объема и качества инокулята. Экспоненциальная фаза демонстрирует высокую скорость роста, максимальную фотосинтетическую активность. Стационарная фаза представляет собой конец развития и начало гибели культуры.

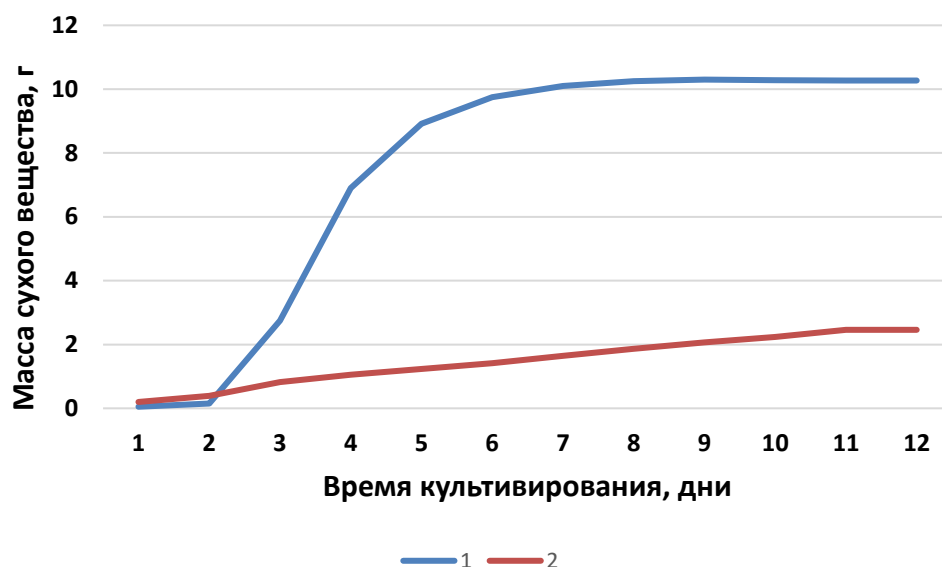


Рисунок 13 – Кинетика роста культуры *Chlorella vulgaris* (1) и *Arthrospira platensis* (2)

Растет численность погибающих клеток, накапливается детрит и продукты распада клеток. Их накопление снижает интенсивность деления живых клеток (Перт, 1978; Богданова и др., 2019; Лукьянов и др., 2019).

Для получения биопрепарата использовали суспензию микроводорослей и цианобактерий в конце экспоненциальной фазы роста. При накопительном культивировании именно в этой фазе большинство клеток достигают зрелости и имеют толстые клеточные стенки, что обеспечивает им значительную устойчивость при дальнейших манипуляциях. При этом биомасса микроводоросли и содержание биологически активных веществ в клетках и культуральной среде достигает максимума (Лисовский, 1964). Культура *Chlorella vulgaris* достигала конца экспоненциальной фазы и начала стационарной на 7 сутки, а *Arthrospira platensis* на 11 сутки. Продуктивность микроорганизмов составляла соответственно $10 \pm 0,41$ г/л и $2,5 \pm 0,25$ г/л.

При создании биопрепаратов на основе живых микроорганизмов первостепенной задачей является сохранение жизнеспособности организмов и максимальное увеличение срока годности. Иммобилизация микроорганизмов (закрепление клеток в носителе) – это путь, подсказанный Природой и утвержденный Эволюцией.

Изучение природных сообществ микроорганизмов доказывает естественность для них иммобилизованного состояния. По всей планете встречаются образования, представляющие собой ассоциацию бактерий, цианобактерий или консорциум авто- и гетеротрофных микроорганизмов: строматолиты, онколиты, бактериальные маты, биологические почвенные корки. Они демонстрируют успешную стратегию выживания. Бактериальные маты обнаруживают в экстремальных температурных и химических условиях в непосредственной близости к гидротермальным подводным источникам. Самые древние на планете цианобактериальные маты, строматолиты имеют возраст около 3,5 млрд. лет. Они начали свое существование в условиях жесткой солнечной радиации и высокой вулканической активности еще до появления кислородной атмосферы. В горных, степных и пустынных экосистемах, сообществах с нарушенным почвенно-растительным покровом, первичных сукцессиях биологические почвенные корки становятся очагами развития биоценозов.

На начальном этапе сукцессий этих биогенных образований пионерными организмами выступают цианобактерии и зеленые микроводоросли. Их клетки выделяют в окружающую среду экзополисахариды, природные биополимеры. Набухая в водной среде, они создают особый «микроклимат» и физически объединяют микроорганизмы. Гель не препятствует обмену веществ с окружающей средой. Он предохраняет от пересыхания, снижает потери питательных компонентов (Сироткин и др., 2007). Экологичность обусловлена крайне эргономичным характером трофических связей: продукты жизнедеятельности одних организмов служат пищевыми ресурсами для других. Они становятся центрами концентрации органических и биологически активных

веществ и аугментации субстрата. Физические и экологические объединяющие факторы делают биогенные маты и корки долговечными, способными переносить неблагоприятные условия и быстро восстанавливаться.

Биологические почвенные корки (БПК) – один из распространенных вариантов эволюционно сложившихся консорциумов микроорганизмов в наземно-воздушной среде. Это среда резкой сезонной и суточной смены температурного режима и влажности, скоротечной эрозии и высокой антропогенной активности. Благодаря биополимерам они способны поглощать атмосферную влагу в объеме в десятки раз больше собственного (Голлербах, Штина, 1969; Lababpour, 2016, 2017; Goncalves, 2021). Эксперименты по инокуляции песчаных дюн цианобактериями выявили, что в экстремальных климатических условиях БПК, искусственно сформированные лабораторными штаммами, отличались высокой устойчивостью и обеспечивали благоприятные условия питания для выживания и сукцессии сообществ сосудистых растений (Lababpour, 2016).

Разработка в наших исследованиях новых биопрепаратов на основе микроводорослей и цианобактерий производилась с целью создания эффективной, эргономичной формы с длительным сроком годности, не требующей особых условий хранения.

Наиболее простой вариант препарата на основе микроорганизма – это суспензия клеток (раствор культуры определенной концентрации), вносимая в почву при поливе или опрыскивателем надземной части растений. При всей простоте производства и низкой себестоимости, форма суспензии имеет ряд недостатков. Короткий срок годности – один из важных для потребителя. У большинства представленных на российском рынке биопрепаратов на основе живых микроводорослей срок годности от 6 до 12 месяцев, а в диапазонах температур окружающей среды ниже 0 °C и выше 30°C – не превышает 5 суток. Одна из существенных причин гибели культуры в транспортировочной таре – это оседание клеток на дно сосуда. При отсутствии перемешивания все больший процент клеток переходит из взвеси в уплотняющийся со временем осадок. В толще

осевшей биомассы снижаются обменные процессы, ускоряется отмирание. Как следствие – разложение мертвой биомассы с выделением токсичных продуктов, снижающих жизнеспособность микроводорослей во всем объеме.

Особые условия хранения суспензии живых клеток – вторая существенная причина (Гайсина и др., 2008). Как сказано выше, большинство известных препаратов могут переносить критические температуры не более 5 суток. При этом многие производители рекомендуют хранить суспензию микроводорослей на свету, хотя прямые солнечные лучи разрушительно действуют на фотосинтетический аппарат уже ослабленной культуры (Макаров, Воскобойников, 2017).

Применение жидкого препарата в крупных хозяйствах при производстве экономически важных культур не технологично и повышает стоимость конечной продукции. Это связано с необходимостью двукратного или трехкратного опрыскивания посевов в разные стадии вегетации. Внесение биопрепарата в баковых смесях с пестицидами остается спорным вопросом. Ежегодно пестициды обновляются, в разных хозяйствах и на разных культурах используется целый спектр этих препаратов. Гарантировать в каждом случае безопасное для микроводоросли сочетание невозможно. Поэтому биопрепарат с живыми клетками водоросли рациональнее вносить за 5-10 дней до обработки пестицидами.

Таким образом, необходимы новые формы препарата. Жидкая, с пониженной седиментацией клеток и сохраняющая их высокую жизнеспособность. Сухая, вносимая вместе с семенами при посеве и содержащая «спящие» клетки, способные восстановить жизненные процессы при попадании в почву. Для решения проблемы оседания клеток микроорганизмов был применен стандартный технологический прием – введение стабилизатора суспензии. Вещества, предотвращающие оседание твердых частиц в жидкой фазе, широко применяются в пищевой промышленности и фармацевтике. Как правило, их роль играют натуральные полисахариды, способные образовывать гели различной вязкости, от псевдопластичных до плотных и упругих. Предъявляемые требования при выборе стабилизатора:

безопасность для микроорганизмов и экосистемы; микробиологическая стабильность (не должен выступать субстратом для микробиологических процессов, например брожения); стабильность при длительном контакте с живыми микроводорослями или цианобактериями.

Наиболее эффективным стабилизатором в экспериментах оказалась карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) – пищевая добавка Е-466. КМЦ входит в реестр разрешенных пищевых добавок (Регламент ТР ТС 029/2012, 2012). Используется как стабилизатор и загуститель в зубной пасте, кисломолочных продуктах, мороженом, оболочках для мясных и рыбных деликатесов и др. КМЦ в растворах препятствует кристаллизации и обладает хорошей адсорбцией на широком спектре материалов. В настоящее время нет достоверных данных о негативном влиянии на организм, единовременном или пролонгированном вреде для экосистем. Важным преимуществом этого стабилизатора является загущение жидких продуктов без нагрева.

Жидкий препарат со стабилизатором приобретает при изготовлении консистенцию жидкого геля с вязкостью около 100 мПа*с. В течение 3-5 дней он снижает вязкость до 15-20 мПа*с и сохраняет ее далее постоянно. Осадок формируется почти в два раза медленнее и имеет рыхлую, подвижную, не уплотняющуюся структуру. Установлено, что клетки микроводоросли *Chlorella* в укупоренной таре, находящейся постоянно при уличной температуре и освещении, в течение трех лет сохраняют высокую жизнеспособность. Полученные результаты основаны на экспериментах, проведенных с иммобилизованной *Chlorella vulgaris* с полным замораживанием препаратов в течение трёх зимних сезонов и суточными перепадами температур в течение трёх летних сезонов.

Таким образом, новая форма жидкого препарата приобрела существенные качественные изменения, решившие две проблемы из трех.

К сухой форме биопрепарата при разработке предъявляли следующие требования: экологическая безопасность и биоразлагаемость носителя; сохранение жизнеспособности клеток микроорганизмов в течение длительного времени;

возможность включения в сухую форму культуральной среды суспензии, содержащей много ценных для высших растений и агроценоза веществ; технологичность применения; большой срок годности, лояльность к условиям хранения; стабильность при перепаде температур и влажности.

В качестве носителя был опробован ряд веществ, образующих гели различной вязкости: гидроксипропилцеллюлоза, карбоксиметилцеллюлоза, агар-агар, альгинат натрия, модифицированные крахмалы и др.

Наилучшим образом по простоте использования, относительно низкой себестоимости и экологической безопасности себя показали крахмалы холодного набухания. Отличие между сортами крахмалов (E1400, E1412, E1414, E1422) проявлялось лишь в степени пористости сухих гранул, скорости их растворения во влажной среде и высыхания при производстве. Как показали эксперименты, существенно сорт крахмала не повлиял на технические и биологические характеристики гранул.

При введении носителя в суспензии как микроводорослей, так и цианобактерий образуется гель удобной для дозатора консистенции (2000-3000 мПа*с). Высушенные гранулы прозрачны и имеют пористую структуру, важную для газообмена и быстрого набухания и растворения в почве. Крахмал обладает высокой гидрофильностью и биоразлагаемостью (Овсянникова и др., 2023). Как показали эксперименты, гранулы сохраняются без изменений в течение двух лет как минимум и могут быть успешно использованы для инокуляции микроорганизмов. Сухая форма биопрепарата успешно вносилась в почву вместе с семенами в полевых опытах высокоточной пневматической сеялкой. Гранулы не создавали помех в работе агрегата, высевались равномерно с посевным материалом, моментально прилипали при контакте к влажной почве.

Технология изготовления гранул с микроводорослями включала следующие технологические приёмы (рисунок 14). Выращивание культур *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* для препарата производилось по методике, описанной выше.

Суспензию клеток отбирали в конце экспоненциальной фазы роста и проводили иммобилизацию.

Жидкая форма биопрепарата представляет собой 0,4-10 % раствор карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) на основе суспензии *Chlorella vulgaris* (биомасс и культуральная среда без разведения водой). Порошок КМЦ вводится в суспензию при интенсивном перемешивании. В течение 3-4 часов происходит набухание КМЦ и раствор повторно интенсивно перемешивается. Готовый препарат разливают и укупоривают в герметичную тару.

Жидкий препарат может храниться в светопроницаемой таре на свету и в темноте длительное время. Отрицательные температуры допустимы, в том числе длительное замораживание и регулярное замораживание-размораживание. На данный момент установлен срок хранения 3 года.

Для фоллиарной обработки растений, в том числе и в баковых смесях с пестицидами, рекомендуется использовать 1 % раствор жидкого биопрепарата, приготовленный на воде для полива непосредственно перед применением. Норма внесения 300 л готового раствора на площадь посевов размером 1 га.

Крахмал холодного набухания смешивали с суспензией *Chlorella vulgaris* или *Arthrospira platensis* в соотношении 1:10 при интенсивном перемешивании и доводили раствор до гомогенности. Оставляли на 30-60 минут для полноценного набухания. Готовый гель при помощи дозатора наносили на гладкую поверхность полипропиленовых пластин (PP5) в виде небольших капель и оставляли до полного высыхания при комнатной температуре. Время высыхания составляло в среднем от 3 до 6 часов в зависимости от влажности и температуры в помещении. Совмещать в одной грануле оба микроорганизма не удалось из-за физиологических особенностей и, прежде всего, pH среды.

Готовые гранулы представляют собой округлые плоские «чешуи» диаметром 3-8 мм и весом около 0,02 г/шт. В 100 граммах сухих гранул содержится около 10 г сухой биомассы. Средний расход препарата 2,5-3 кг/га. Хранение гранул

возможно в таре бумажной, картонной, ПЭТ при любой температуре и влажности не выше 75 %, как и крахмал (ГОСТ 53876-2010 Крахмал картофельный, 2019).

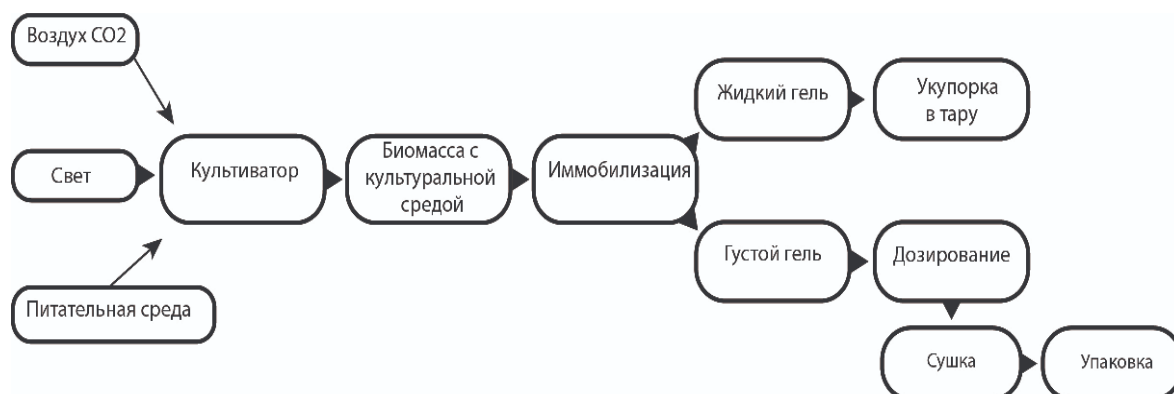


Рисунок 14 - Схема технологического процесса изготовления препаратов, содержащих иммобилизованную культурой микроводорослей

При попадании в почву гранулы набухают и растворяются в течение короткого срока — от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от влажности. Наличие в биопрепарате жизнеспособных клеток микроводорослей и их численность, как показали исследования, влияет на его эффективность.

Для оценки этих показателей в сухой форме препарата размещали по 10 гранул с разным сроком изготовления и условиями хранения в сосуды, содержащие 50 мл соответствующей питательной среды, и экспонировали 8 суток при комнатной температуре и обычном освещении рабочего помещения. Ежедневно измеряли оптическую плотность в сравнении с соответствующей питательной средой с добавлением гранул из чистого крахмала.

На рисунок 15 показаны результаты тестов. Во всех вариантах наблюдалось развитие культуры клеток из сухих гранул. Наиболее низкая скорость развития наблюдается при хранении гранул под прямыми солнечными лучам и при температуре 40°C. Гранулы заметно снижали интенсивность окраски уже после месяца хранения на солнце, что свидетельствует о разрушении хлорофилла и возможном повреждении фотосинтетического аппарата. Наилучшие результаты демонстрируют гранулы, сохраняемые в холодильнике (плюс 5°C) и в темноте.

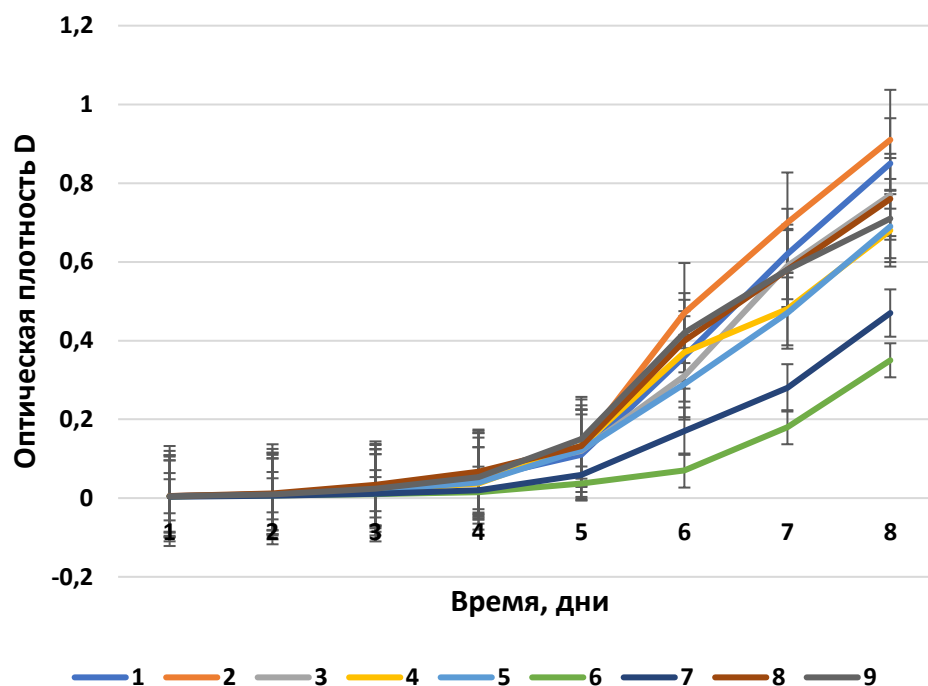


Рисунок 15 – Кинетика развития культуры *Chlorella vulgaris* из гранул в зависимости от условий и сроков хранения: 1– +5°C в темноте месяц; 2– +22°C в темноте неделя; 3– +22°C в темноте месяц; 4 – +22°C в темноте 12 месяцев; 5– +22°C в темноте 24 месяца; 6 – + 40°C комнатное освещение, месяц; 7 – на солнце месяц; 8 – + 22°C комнатное освещение, неделя; 9 – + 22°C комнатное освещение, месяц.

Культура микроводоросли, развивающаяся из гранул, достигает оптической плотности 1 % раствора суспензии (жидкой формы) только на 7-8 сутки (~0,5 ед. опт. плотности). Справедливо предположить, что объём гранул, содержащий с жидкой формой препарата равное количество сухого вещества, отстает по численности живых клеток. Однако в состав гранул входят не только клетки, но и биологически активные вещества культуральной среды. Они становятся доступными для растений сразу после растворения гранулы. Сухая форма препарата позволяет внести его в борозду вместе с семенами сразу при посеве. Таким образом, развивающиеся зародышевые корешки получают дополнительное питание и стимуляцию с первых часов существования.

Некоторыми авторами показано, что *Chlorella* не только способна к гетеротрофному питанию, но и повышает свою продуктивность более чем в 3 раза

(Liang et al., 2009). Одно из успешно используемых для повышения выхода биомассы *Chlorella* веществ – глюкоза (Мамедова, 2015), а её источником является крахмал.

Крахмальный гель гранул при попадании в почву быстро набухает и гидролизуется вне клеток ферментами, выделяемыми микроорганизмами. Даже в неблагоприятных условиях этот процесс продолжается, т.к. ферменты выделяются в избытке, и продолжают работать даже после гибели клеток бактерий. Как показывают исследования В.С. Овсянниковой с соавт. (2023), в почвах на 7 сутки после внесения крахмала в составе многокомпонентных гелей наблюдается увеличение численности аммиолитических микроорганизмов в 4 раза, а на 14 сутки аммонифицирующих бактерий до 40 раз. Они производят деструкцию мертвой биомассы аммиолитической микрофлоры, уже закончившей свою деятельность к этому моменту (Овсянникова и др., 2023).

Таким образом, крахмальный носитель гранул сам превращается в питательный ресурс для микроводорослей, способствующий их развитию в отсутствии света под слоем почвы.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ ФОРМ БИОПРЕПАРАТОВ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР

4.1 Действие культуры микроводоросли на ростовые процессы в начальной стадии развития сельскохозяйственных культур

Ключевой проблемой современного сельского хозяйства является истощение и деградация пахотных земель (Современное состояние..., 2012). Комплексная химическая обработка посевов приводит к пестицидному стрессу растений, угнетает развитие микроорганизмов в почве, снижает потенциальную урожайность. Восстановление почвенных экосистем на сельскохозяйственных угодьях, повышение плодородия и продуктивности агроценозов за счет применения биопрепаратов эффективно и безопасно.

Существует мнение (Гасанов, Омаров, 2013; Кураченко и др., 2023), что удобрения на основе микроводорослей совмещают в себе функции органического удобрения и биостимулятора. Их применение позволит осуществить комплексный подход к проблеме восстановления и повышения плодородия почвы и эффективности производства сельскохозяйственной продукции. Биологические препараты не могут быть полноценным источником минерального питания для сельскохозяйственных культур (Hernandez et al., 2021), однако они являются поставщиком микроэлементов и биологически активных веществ (Овчинникова, 2017). Их применение в условиях сельскохозяйственного производства показывает высокую экономическую эффективность (Лукиянов, 2016). Биологические препараты могут использоваться в качестве эффективного средства регулирования роста и развития возделываемых культур, что в перспективе позволит научиться управлять продуктивностью агроценозов в целом (Шалыго, 2019; Кураченко, Абакумова, 2024). В частности, обработка семян биопрепаратами решает ключевые задачи для формирования урожая сельскохозяйственных культур: повышение посевных качеств семян (энергии прорастания, всхожести, жизнеспособности) и

формирование мощной корневой системы. В связи с этим, цель исследования заключалась в оценке действия культуры *Chlorella vulgaris* на ростовые процессы в начальной стадии развития ряда сельскохозяйственных культур.

Анализ лабораторных экспериментов показал, что обработка семян яровой пшеницы биопрепаратом, содержащим культуру микроводосли *Chlorella vulgaris*, увеличивает на 6 % энергию прорастания по сравнению с контролем (таблица 1). При определении лабораторной всхожести на седьмые сутки выявлено, что замачивание семян яровой пшеницы препаратом в течение шести часов формирует максимальную лабораторную всхожесть – 97 %, что достоверно выше контроля на 5 % ($p = 0,0301$).

Таблица 1 - Посевные качества семян сельскохозяйственных культур

Вариант	Энергия прорастания, %	Изменения к контролю, +/-	Лабораторная всхожесть, %	Изменения к контролю, +/-
<i>Яровая пшеница</i>				
Контроль (вода)	91	-	92	-
<i>Chlorella vulgaris</i> (1 % раствор)	97	+ 6	97	+ 5
<i>p</i>	0,010*		0,0301*	
<i>Редис</i>				
Контроль (вода)	25	-	40	-
<i>Chlorella vulgaris</i> (1 % раствор)	26	+ 1	55	+ 15
<i>p</i>	0,8444		0,0210*	
<i>Кресс-салат</i>				
Контроль (вода)	83	-	83	-
<i>Chlorella vulgaris</i> (1 % раствор)	86	+ 3	89	+ 6
<i>p</i>	0,4812		0,005*	

Здесь и далее: *- достоверные значения

Энергия прорастания семян редиса на третьи сутки была достаточно низкой и составляет по вариантам 25-26 %. Замачивание семян редиса биопрепаратом,

содержащим в своём составе микроводоросли *Chlorella vulgaris*, не оказывает выраженный положительный эффект на семена на стадии определения энергии прорастания, т.к. изменения к контролю были не достоверными ($p = 0,8444$). Исследованиями установлено, что при замачивании семян редиса водой и нахождении их в термостате при температуре 25 °С на 6-е сутки нормально проросло только 40 % семян. Достоверно лучшие результаты по лабораторной всхожести получены в случае обработки семян редиса биопрепаратом (55 %). Начальные стадии образования проростков у кресс-салата по вариантам опыта характеризовались близкой энергией прорастания (83-86 %). Увеличение энергии прорастания на 3 % по сравнению с контролем математически не доказывается на этой стадии. Активное образование зародышевых корешков сказывается на продуктивности растений, способности обеспечивать растения элементами питания. Количество корней и их длина у всех исследуемых культур достоверно зависит от применяемой в опыте культуры *Chlorella vulgaris* (таблица 2).

Таблица 2 - Биометрическая характеристика проростков (на 7 суток)

Вариант	Количество корней, шт.	Длина ростка, см	Длина корней, см
<i>Яровая пшеница</i>			
Контроль (вода)	4,9	12,8	13,9
<i>Chlorella vulgaris</i> (1 % раствор)	5,8	12,7	14,7
<i>p</i>	0,0500*	0,8912	0,0202*
<i>Редис</i>			
Контроль (вода)	-	2,2	2,9
<i>Chlorella vulgaris</i> (1 % раствор)	-	5,6	7,1
<i>p</i>		0,0400*	0,0010*
<i>Кресс-салат</i>			
Контроль (вода)	-	2,2	1,1
<i>Chlorella vulgaris</i> (1 % раствор)	-	2,6	2,4
<i>p</i>		0,02220*	0,0200*

- не определялось

Таким образом, применение культуры *Chlorella vulgaris* для обработки семян яровой пшеницы, редиса и кресс-салата способствовало улучшению их посевных

качеств, заключающихся в повышении энергии прорастания на 1-6 % и лабораторной всхожести на 5-15 %. Действие биопрепарата на посевные качества семян и биометрические показатели проростков определяется особенностями сельскохозяйственных культур. Максимальный эффект от применения культуры *Chlorella vulgaris* обнаружен на семенах редиса, приводящий к увеличению длины ростка на 3 см; длины корней – на 4 см по сравнению с контролем. Эффективность действия культуры микроводоросли на яровой пшенице и кресс-салате заключалась в усилении корнеобразования культур и увеличения длины корней на 1 см.

4.2 Влияние биопрепаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* на физиологические и биометрические показатели растений кабачка и огурца

Целью данной части работы была оценка в лабораторном эксперименте действия культуры *Chlorella vulgaris* подвергнутой термической обработке и необработанной на ростовые показатели овощных культур: кабачка сорта Ролик и огурца сорта Изящный. Важно установить, что оказывает более существенное влияние на развитие и физиологическое состояние растений при применении альгологических препаратов – наличие биологически активных веществ микроводорослей или их живые клетки, способные потенциально продолжать жизнедеятельность в почве. Согласно современным данным, кратковременная термическая обработка суспензии *Chlorella vulgaris* при плюс 50°C приводит к лизису 70-80 % клеток с одновременным выходом в культуральную среду биологически активных компонентов - аминокислот, пептидов и фотосинтетических пигментов (Becker, 2004; Gauthier et al., 2020; Brück et al., 2024). При этом, как показали некоторые исследования (Асякина и др., 2021; Чаплина, 2021), значительная часть биологически активных веществ сохраняет свою функциональность, что открывает перспективы создания эффективных биостимулирующих препаратов.

Для оценки действия микроводорослей на растения были выбраны метрические параметры: длина главного побега, длина корня, площадь листовой пластинки и сырая масса растения. Размеры растения и их соотношение характеризуют в сумме целый комплекс факторов, оказывающих влияние на его рост и развитие, и, косвенно, потенциальную продуктивность. Так соотношение длины корня к длине стебля является показателем распределения ресурсов в теле растения. От площади листовой пластинки зависит количество поглощаемого растением свет, и, соответственно эффективность фотосинтеза (Zelitch, 2012). По данным исследователей, для овощных культур урожайность находится в сильной корреляционной связи с площадью листьев (Poorter et al., 2012). Г.А. Прядкина с соавт. (2014) показывает связь увеличения листовой пластинки и содержания хлорофилла с внесением высоких доз удобрений, т.е. улучшением минерального питания.

Важным физиологическим показателем состояния растения признано содержание пигментов в листьях. Пигментный комплекс тонко реагирует на изменения внешних условий и его показатели достаточно информативны (Тимаков и др., 2019). На рисунок 16 представлена зависимость длины корня и главного побега от применяемого препарата.



Рисунок 16 – Длина главного стебля и длина корня (см) растений огурца (А) и кабачка (Б): 1 – контроль; 2 – *Chlorella vulgaris* нативная; 3 – *Chlorella vulgaris* термически обработанная, А- $p=0,0058$; Б - $p = 0,0043$.

Для растений огурца наблюдалось снижение размера и корня и стебля по сравнению с контролем для нативной культуры незначительно, а для термически обработанной хлореллы на 6 и 4 %. Растения кабачка отреагировали так же уменьшением длины корня на 2,5-5 %, при этом дали значительное увеличение длины стебля на варианте с нативной культурой (плюс 16 %). Увеличение отношения длины главного стебля к длине корня демонстрирует преимущество в развитии надземной части растения над корневой и, вероятно является показателем хорошей обеспеченности питательными веществами.

Для нативной хлореллы (рисунок 17) он увеличивается на 4 % и снижается ниже уровня контроля для термически обработанной культуры. Для кабачка этот показатель значительно вырос для нативной культуры (24 %) и вдвое меньше, но на 12 % выше контроля для обработанной.

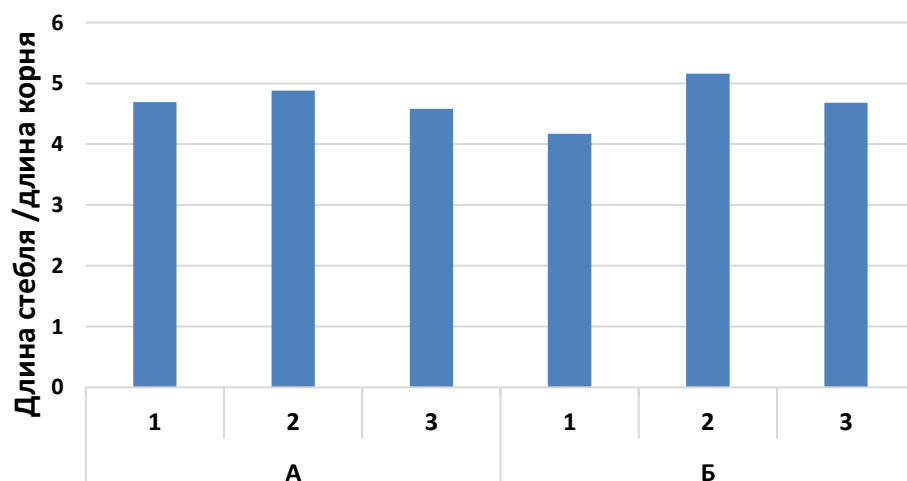


Рисунок 17 – Отношение длины главного стебля к длине корня растений огурца (А) и кабачка (Б): 1 – контроль; 2 – *Chlorella vulgaris* нативная; 3 – *Chlorella vulgaris* термически обработанная, А- $p=0,05$; Б $p=0,005$.

Увеличение длины главного побега на варианте с нативной хлореллой может быть следствием действия фитогормонов микроводоросли, усиливающих реакцию на хорошую обеспеченность питательными веществами, что говорит о позитивной реакции растений на обработку хлореллы. При этом присутствует видоспецифичность. Кабачок чувствительнее реагирует на присутствие дополнительных питательных и биологически активных веществ.

Показатель площади листовой пластинки, который, как сказано выше, можно уверенно считать релевантным для оценки потенциальной урожайности растения, реагировал на препараты иначе. На рисунок 18 А представлено изменение площади листа для растения огурца. Достоверный прирост ($p=0,0030$) виден для нативной хлореллы (8 %) и значительный (26 %) для термически обработанной. Площадь листа кабачка (рисунок 18 Б) увеличилась на 6 % ($p=0,0040$) для нативной культуры и практически на треть уменьшилась у растений, получавших термически обработанный препарат.

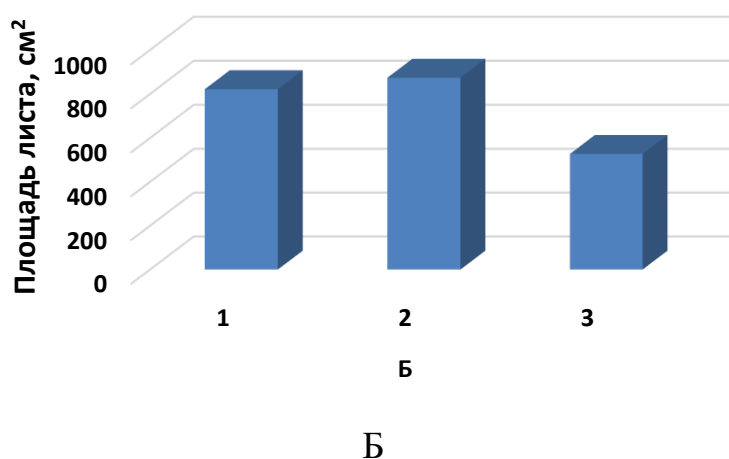
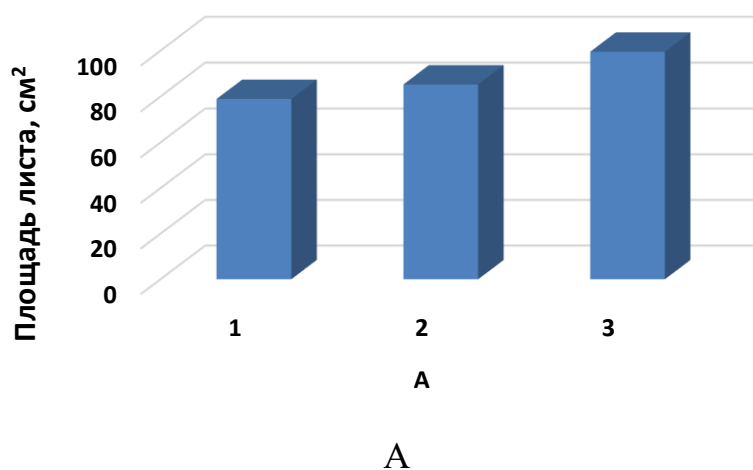


Рисунок 18 – Площадь листовой пластинки (см²) растений огурца (А) и кабачка (Б): 1 – контроль; 2 – *Chlorella vulgaris* нативная; 3 – *Chlorella vulgaris* термически обработанная, А- $p=0,003$; Б $p=0,004$.

Согласно «концепции функционального разделения» (Poorter et al., 2012) и исследованиям других авторов (Прядкина и др., 2014) значительный прирост площади листовой пластинки в варианте с обработанной культурой можно оценивать, как реакцию на поступление легкодоступных питательных веществ. Развитие тканей стебля, вероятно больше подчиняется гормональной стимуляции. Исследователями показано избирательное действие фитогормонов хлореллы на меристемы побегов (Gitau et al., 2021). Обратная реакция растений кабачка может быть связана с ингибирующим эффектом отдельных метаболитов хлореллы в повышенной концентрации или сочетанием нескольких факторов.

Содержание пигментов в листьях растений показывает значительный прирост (15-60 %), причем для термически обработанной культуры – более значительный (рисунок 19). Отношение хлорофилла «а» к хлорофиллу «б» согласно А.Г.Тимакову с соавт. (2019) «является характеристикой фотосинтетической активности». Для растений огурца это показатель изменился менее чем на 1 % в вариантах по сравнению с контролем.

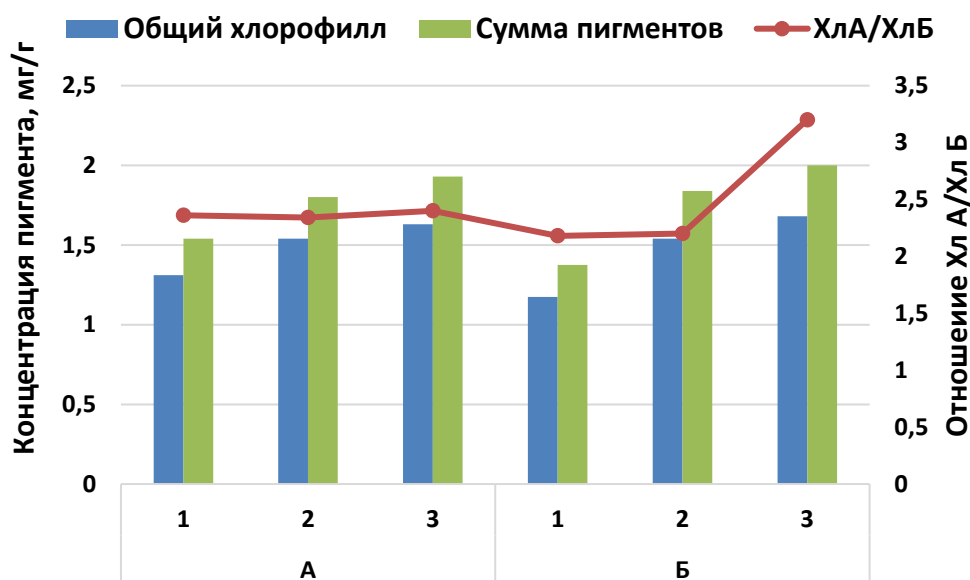


Рисунок 19 – Содержание пигментов (мг/г) в листьях растений огурца (А) и кабачка (Б): 1 – контроль; 2 – *Chlorella vulgaris* нативная; 3 – *Chlorella vulgaris* термически обработанная, А- $p=0,003$; Б $p=0,00045$.

В листьях кабачка соотношение хлорофиллов изменилось в положительную сторону на 46 % только на варианте с обработанной культурой. И сравнение с нормой от 2,0 до 3,0 (Тимаков и др., 2014), для всех вариантов кроме обработанной культуры, где он максимален (3,2), показатель находится в нормальных пределах. Вероятно, максимальную развитость и активность фотосинтетического аппарата на этом варианте можно объяснить высокой минерализацией поступивших с препаратом веществ. В варианте с нативной хлореллой, где жизнеспособность клеток не снижалась физическим воздействием, поступление питательных веществ в почву происходит постепенно. Развивающиеся на них, как на питательном субстрате микроорганизмы имеют меньшую численность. Биологически активные вещества, прежде чем будут утилизированы микроорганизмами, успевают проявить себя воздействием на растение. При этом содержание общего хлорофилла и сумма пигментов (хлорофилл а, хлорофилл б, каротиноиды) увеличиваются очень существенно для обеих культур и препаратов. Для огурцов на 17 и 24-25 %, для кабачков на 30-34 и 43-45 % соответственно. Что говорит об обеспеченности питательными веществами, улучшении физиологического состояния растения, растущей устойчивости и потенциальной продуктивности.

Незначительные изменения показателя хлорофилл а/хлорофилл б для растения огурца и кабачка на варианте с нативной хлореллой может быть сигналом частичного перехода на миксотрофное питание. Так как доступные органические вещества могут снижать фотосинтетическую активность. Так же возможной причиной незначительной реакции растений огурца может быть более высокая потребность этого вида к содержанию азота и калия.

Лабораторный опыт по сравнению действия нативной культуры хлореллы и термически обработанной на растения огурца и кабачка показывает прирост основных показателей при применении нативной культуры и видоспецифичность реакции растений. Результатами полевого опыта в 2021 году с яровой пшеницей показали наибольшее увеличение легкогидролизуемого азота и почвенного дыхания на вариантах с термически обработанной хлореллой. Урожайность на

варианте с нативной хлореллой превысила таковую для термически обработанной культуры.

Таким образом, использование при выращивании овощных культур препаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* эффективно для повышения качества и устойчивости растений, их потенциальной продуктивности. Необходимо учитывать специфические потребности растений разных видов и подбирать вид и дозировку препаратов.

4.3 Влияние биопрепаратов на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* на физиологические и биометрические показатели растений огурца

Совместное применение микроводорослей разных видов в растениеводстве по данным многих исследователей – перспективное направление в биологизации земледелия (Панкратова и др., 2014). Для зеленых водорослей и цианопрокариот в почвенном ценозе возможны симбиотические отношения и заметное воздействие на показатели почвы. Проведенные исследования показали, что применение *Chlorella* и *Spirulina* (по новой классификации *Arthrospira*) способствует повышению содержания общего азота и доступных форм фосфора в почве, при этом *Spirulina* дополнительно увеличивает концентрацию нитратов (Джуманиязов, Аллаберганов, 1977). Р. Alvarenga с соавт. (2022) показали, что совместное применение *C. vulgaris* и *S. obliquus* для горшечных растений салата заменило на 50 % азотные удобрения. Их экзометаболиты аддитивно действуют на жизнедеятельность высших растений (Ammar et al., 2022). Применение консорциума *Anabaena oryzae* и *Chlorella vulgaris* для топинамбура повышало качество продукции - содержание сахаров в корнеплодах (Abdel-Hamid et al., 2022). Комплексная внекорневая обработка препаратами на основе *Arthrospira sp.* и *Scenedesmus almeriensis* декоративных растений показали улучшение развития вегетативных и генеративных органов (Uysa et al., 2015).

В лабораторном опыте нами изучалось влияние на биометрические и физиологические показатели растений огурца ряда факторов: самостоятельное и совместное применение разных форм препаратов *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*; предварительное замачивание семян раствором суспензии хлореллы или воды. Особое внимание уделялось изучению реакции корневой системы. Основные биометрические показатели надземной части растения для вариантов опыта, в которых семена предварительно не замачивали в растворе суспензии хлореллы, были в основном не достоверно, но выше, чем на вариантах с замачиванием. Все виды и комбинации препаратов кроме гранул хлореллы не одинаково воздействовали на растения, выросшие из предварительно обработанных суспензией и необработанных семян (Абакумова, 2022). Длина стебля и площадь листовой пластинки (рисунок 20) в сравнении с контролем продемонстрировала максимальный достоверный ($p = 0,015-0,0040$) прирост при использовании гранул *Chlorella vulgaris*.

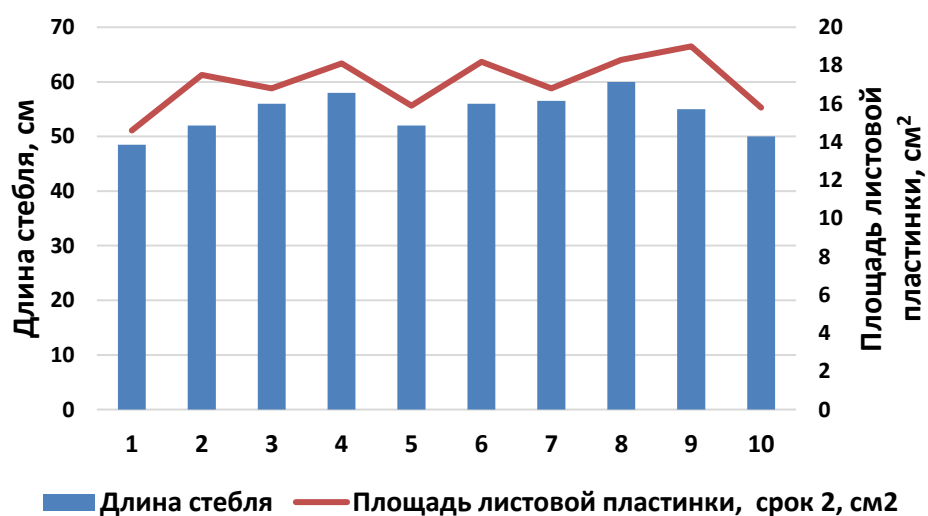


Рисунок 20 – Длина стебля (см) $p=0,015$ и площадь листовой пластинки (см²) $p=0,004$: 1 – контроль; 2 – *C. vulgaris* замачивание; 3 – *C. vulgaris* замачивание + опрыскивание; 4 – *C. vulgaris* замачивание + гранулы *C. vulgaris*; 5 – *C. vulgaris* замачивание + гранулы *C. vulgaris* + *A. platensis*; 6 – *C. vulgaris* замачивание + *A. platensis*; 7 – без замачивания + опрыскивание *C. vulgaris*; 8 – без замачивания + гранулы *C. vulgaris*; 9 – без замачивания + гранулы *C. vulgaris* + *A. platensis*; 10 – без замачивания + гранулы *A. platensis*

Для варианта совместного использования гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* размер листа и стебля также увеличились достоверно ($p=0,0200$) только без замачивания на 13 % и 30 % соответственно. Гранулы *Arthrospira* оказали влияние лишь при замачивании семян (плюс 15 и 23 %). Опрыскивание растений стимулировало их рост только на вариантах, включающих и обработку семян (плюс 15 %). Определенный синергизм применяемых микроводорослей, способов внесения и обработки установлен. Внесение гранул с микроводорослями в грунт, вероятно, обеспечивает достаточное поступление питательных веществ на первых этапах развития растения. Внекорневая обработка, проводимая на стадии 2-3 настоящих листьев, не дает такого же прироста вегетативных органов, хотя определенно стимулирует. Совместное действие культур, внесенных в грунт, проявляется лишь при отсутствии обработки семян. По-видимому, это связано с разными механизмами воздействия или разницей в наборе биологически активных и минеральных веществ препарата с живой культурой и гранул.

Развитие корневой системы – показатель способности получать питание из грунта. В лабораторном опыте стандартный грунт был заменен на торф с нормализованной кислотностью для облегчения извлечения корневой системы. Для вариантов с замачиванием семян раствором *Chlorella vulgaris* (рисунок 21) сохранялась тенденция увеличения плотности корней с максимумом для гранул *Chlorella vulgaris* и *Chlorella vulgaris* + *Arthrospira platensis* (достоверный прирост 23 %; $p=0,013$) и отсутствие эффекта для самостоятельных гранул *A. platensis*.

Для вариантов без замачивания отмечен прирост в 32 и 23 % только при опрыскивании *Chlorella vulgaris* и внесении её гранул. Совместное и самостоятельное использование *Arthrospira platensis* показало результаты значительно ниже контроля.

Относительный показатель масса корня/масса надземной части повторил результаты плотности корня за исключением варианта с замачиванием семян без дополнительных обработок, где показатель увеличивается на 17 % ($p=0,0048$).

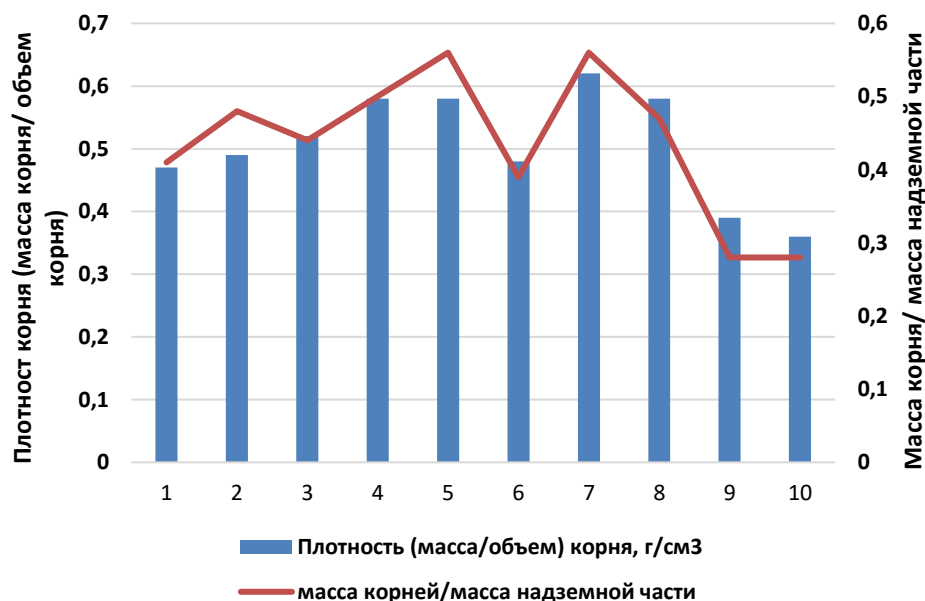


Рисунок 21 – Плотность корня (г/см^3) $p=0,013$ и отношение массы корня к массе надземной части $p=0,0048$: 1 – контроль; 2 – *C. vulgaris* замачивание; 3 – *C. vulgaris* замачивание + опрыскивание; 4 – *C. vulgaris* замачивание + гранулы *C. vulgaris*; 5- *C. vulgaris* замачивание + гранулы *C. vulgaris*+ *A. platensis*; 6- *C. vulgaris* замачивание + *Arthrospira platensis*; 7 – без замачивания + опрыскивание *C. vulgaris*; 8 – без замачивания + гранулы *C. vulgaris*; 9 - без замачивания + гранулы *C. vulgaris*+ *A. platensis*; 10 - без замачивания + гранулы *A. platensis*

Важно, что опрыскивание значительно (на 32-36 %) стимулировало развитие корня только на вариантах без обработки семян *Chlorella vulgaris*. Варианты с *Chlorella vulgaris* в этом опыте всегда оказывали стимулирующее влияние на развитие корневой системы, что с высокой вероятностью связано с выделяемым ей гормоном роста ауксином (Шапова, Можарова, 2021; Gitau et al., 2021). Замачивание семян стимулировало корнеобразование в первую очередь. В жидком препарате, содержащем живые метаболизирующие клетки, концентрация гормона выше. При замачивании и опрыскивании, вероятно, наступает ингибирование тем же гормоном. При этом, *Arthrospira* так же повлияла на развитие корня, но только совместно с замачиванием, вероятно являясь поставщиком питательных веществ. Можно утверждать, что использование технологии с внесением гранул *Chlorella vulgaris* очень перспективно для эффективного прорастания семян без дополнительных обработок.

Чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) - ключевой показатель, используемый для оптимизации технологий применения удобрений и биопрепаратов в растениеводстве. В эксперименте (рисунок 22) ЧПФ достоверно ($p=0,0032$) и значительно увеличивается на всех вариантах при замачивании семян без дополнительных обработок (плюс 10 %) и более чем в 2 раза при совместном использовании гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*. На всех вариантах без замачивания семян раствором *Chlorella vulgaris* рост показателя был ниже, что еще раз подтверждает сильное стимулирующее действие этой микроводоросли. Вероятно, это проявление антиоксидантного действия метаболитов микроводорослей, снижающих стресс и повышающих эффективность фотосистемы II.

Варианты с *Arthrospira platensis* показывают интенсивное влияние на ЧПФ, достоверно, но незначительно ниже хлореллы. Этот результат подтверждает аддитивное действие культур.

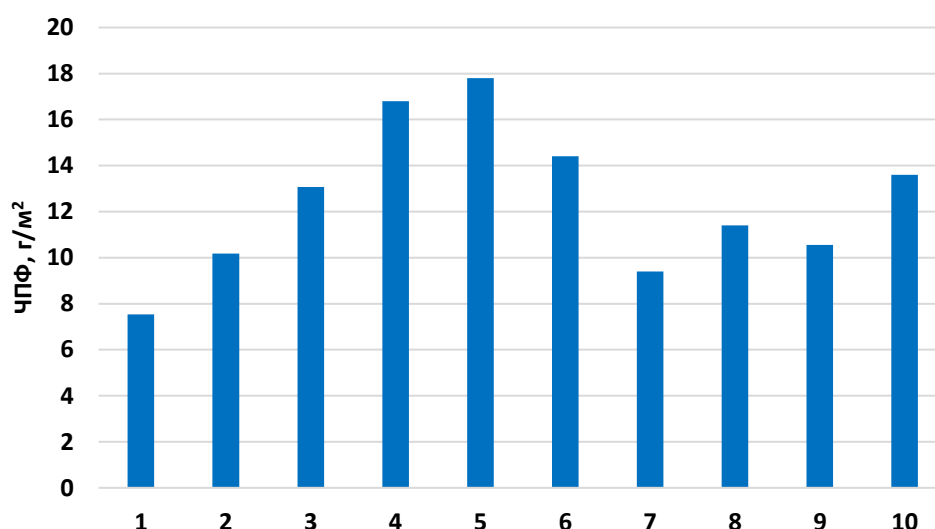


Рисунок 22 – Чистая продуктивность фотосинтеза, г/м²: 1 – контроль; 2 – *C. vulgaris* замачивание; 3 – *C. vulgaris* замачивание + опрыскивание; 4 – *C. vulgaris* замачивание + гранулы *C. vulgaris*; 5- *C. vulgaris* замачивание + гранулы *C. vulgaris*+ *A. platensis*; 6 – *C. vulgaris* замачивание + *Arthrospira platensis*; 7 – без замачивания + опрыскивание *C. vulgaris*; 8 – без замачивания + гранулы *C. vulgaris*; 9 – без замачивания + гранулы *C. vulgaris*+ *A. platensis*; 10 – без замачивания + гранулы *A. platensis*

Изучение влияния различных форм препарата продемонстрировало стимулирующее действие жидкой и сухой форм препарата, возможность использования гранул *Chlorella vulgaris* и совместно *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* как агрономическую технологию без дополнительных стадий. Внесение препарата вместе с семенами во время посева технологичнее и экономичнее для больших посевных площадей. Влияние альгологических препаратов на показатели высших растений видоспецифично. Необходима разработка специализированных подходов для каждой культуры. Сочетание различных форм удобрения и технологических приемов для разных видов культурных растений позволит эффективно влиять на их развитие, устойчивость и продуктивность.

4.4 Действие биопрепаратов на основе культуры микроводоросли *Chlorella vulgaris* на продуктивность томата

Целью данной части работы являлось изучение влияния биопрепаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* на урожайность и биохимическую характеристику плодов томата, возделываемых в условиях открытого грунта Красноярской лесостепи.

Наблюдения за ростом и развитием томатов являются важным условием формирования урожайности культуры. Для получения высокого урожая томаты нуждаются в хорошо развитой вегетативной массе, обеспечивающей интенсивный уровень ассимиляционного процесса (Селиванова, 2017). Замачивание семян томата и опрыскивание рассады биопрепаратом на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* положительно повлияло на некоторые показатели листового аппарата растений (таблица 3).

Учет высоты растений и числа ветвей после сбора плодов показывает тенденцию их увеличения на вариантах опыта с замачиванием семян и последующим опрыскиванием растений 1 % раствором в фазу пяти настоящих листьев, а также при совмещении замачивания семян с внесением биопрепарата в почву в виде гранул (Кураченко, Абакумова, 2024). При отсутствии достоверного

влияния биопрепаратов на высоту растений и число ветвей, установлено, что эти показатели на 54-39 % зависят от погодных условий вегетационного сезона.

Таблица 3 – Листовой аппарат растений томата (2022-2023 гг.)

Вариант	Высота растений, см	Число ветвей, шт./раст.	Сырая надземная масса, г/раст.	Количество листьев, шт./раст.	Масса листьев, г/раст.
Контроль	96,0	2,4	319,2	27,9	176,8
<i>C. vulgaris</i> замачивание	94,1	2,3	357,5	29,4	184,6
<i>C. vulgaris</i> 3 замачивание + опрыскивание	98,3	2,5	439,2	31,6	226,7
<i>C. vulgaris</i> замачивание + гранулы	97,2	2,8	378,4	34,6	247,5
<i>pA</i> (вариант)	0,3470	0,4100	0,0010*	0,0080*	0,0000*
<i>pB</i> (год)	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*
<i>pAB</i> (взаимод.)	0,0061*	0,4100	0,0040*	0,1140	0,0000*

По средней массе растений судят об устойчивости их к заглушению травянистой растительностью и к другим неблагоприятным факторам среды. Обработка семян томатов 1 % раствором *Chlorella vulgaris* благоприятно влияет на накопление сырой надземной массы растений, количество листьев и их массу. На всех экспериментальных вариантах растения томата в ходе вегетации увеличивают сырую надземную фитомассу по сравнению с контролем на 38-120 г/растение ($p = 0,0010$). Дополнительное опрыскивание растений в фазу 5-ти настоящих листьев 1 % раствором биопрепарата формирует максимальную надземную массу растений (439 г/растение). Внесение гранул в почву с *Chlorella vulgaris* при пикировке растений обеспечивает наибольшее количество листьев (35 шт./растение) и их массу (248 г/растение). Это может свидетельствовать о том, что данный способ применения микроводорослей отличается высокой эффективностью и биодоступностью для растений на всем протяжении периода вегетации от

проростков до плодоношения. В качестве примера положительного влияния хлореллы на рост и развитие растений являются исследования М.Э. Климкиной с соавт. (2023). На варианте опыта с использованием суспензии хлореллы у растений томата не только отчетливо выделялся главный корень, но и развивались придаточные корни. За счет их укоренения и развития при пересадке в открытый грунт отмечалось положительное действие на увеличение массы плодов и, соответственно, урожайность томатов.

Основополагающим фактором развития растений и формирования урожая плодов является фотосинтез. Для достижения максимальной урожайности культуры важную роль играет быстрое образование оптимальной площади листьев. При этом условия растения способны усваивать солнечную энергию, необходимую для синтеза сахаров, аминокислот, белков, ферментов и других соединений, из которых создаются новые клетки, ткани и органы растений (Козлова и др., 2019).

Главный показатель вегетативного состояния растений – это площадь листовой поверхности. Лист у растений – это основной ассимилирующий орган, в котором образуются органические вещества, служащие строительным материалом для всего организма. Но при этом чрезмерное развитие листовой массы и значительное потребление ассимилянтов может вызвать их недостаток при формировании генеративных органов. Вследствие густой облиственности растения ухудшаются условия освещения, особенно нижних листьев, снижается интенсивность фотосинтеза, что в результате может отрицательно сказаться на продуктивности растения, урожайности.

Существенное увеличение количества листьев по сравнению с контролем на варианте опыта с замачиванием семян томатов и опрыскиванием рассады 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* приводит к достоверному увеличению площади листьев до 8626 см² ($p = 0,0000$) (рисунок 23). Формирование площади листьев в наибольшей степени зависит от применяемых в производстве рассады биопрепаратов (53 %).

Определение удельной поверхностной плотности листьев, позволяющей оценить светопроницаемость и толщину листа, показывает улучшение на 7-14 % величины этого параметра на всех экспериментальных вариантах опыта по сравнению с контролем. На варианте опыта, где использовалось замачивание семян с последующим опрыскиванием раствором *Chlorella vulgaris*, этот показатель достигает 0,32 г/дм² ($p = 0,0020$).



Рисунок 23 – Площадь листьев (см²) и удельная поверхностная плотность листьев томата (г/дм²): 1 – контроль; 2 – *C. vulgaris* замачивание; 3 – *C. vulgaris* замачивание + опрыскивание; 4 – *C. vulgaris* замачивание + гранулы

Учет биометрических показателей плодов томата в фазу созревания, проведенный по количеству плодов с одного растения и средней массы плодов показывает, что на контрольном варианте количество плодов составляет в среднем за период наблюдений 11 шт. с растения при средней массе плода 107 грамм (таблица 4). Применение биопрепаратов с хлореллой приводит к увеличению количества плодов на растении и к снижению средней массы плода. Так при замачивании семян в 1 % растворе количество плодов составило 13 шт./растение. При этом средняя масса плода стала меньше на 16 граммов. На вариантах опыта, где применяется замачивание семян с опрыскиванием растений и замачивание семян с внесением гранул отмечаются статистически достоверное увеличение количества плодов до 16 шт./растение. Средняя масса плодов на этих вариантах

опыта различается незначительно и не превышает 96-97 граммов. Таким образом, биопрепарат на основе микроводоросли существенно не повлиял на такой биометрический показатель как средняя масса плода, что обусловлено увеличением количества плодов на растении.

Таблица 4 – Биометрические показатели плодов томатов (2022-2023 гг.)

Вариант	Количество плодов шт./растение	Средняя масса плода, г
Контроль	11,3	106,8
Замачивание 1 % р-р <i>C. vulgaris</i>	13,3	91,3
Замачивание + опрыскивание 1 % р-р <i>C.</i> <i>vulgaris</i>	16,3	95,8
Замачивание 1 % р-р + гранулы <i>C. vulgaris</i>	15,9	97,0
<i>pA</i> (вариант)	0,0000*	0,0280*
<i>pB</i> (год)	0,0000*	0,0220*
<i>pAB</i> (взаимод.)	0,0000*	0,0040*

Одним из основных показателей эффективности применения биопрепаратов является урожайность. Так, по данным В.А. Лукьянова (2012), микроводоросль *Chlorella vulgaris* увеличивала урожайность зерна ячменя в мелкоделяночном опыте на темно-серых лесных почвах по вариантам опыта. М.М. Голлербах и Э.А. Штиной (1969) доказано, что микроводоросли обогащают почву органическими веществами, улучшают ее структуру, стимулируют рост полезных почвенных микроорганизмов. Кроме того, они являются источников физиологически активных веществ, играющих особую роль в почвенных процессах. Микроводоросли способны изменять рН в сторону нейтральной реакции среды. Там, где микроводоросли находятся в достаточном количестве, почва всегда нейтральная или слабощелочная. Под их влиянием водоудерживающая способность почв повышается до 50 %. (Бжеумыхов, 2005). Оценка урожайности томата по вариантам опыта (рисунок 24) показывает, что наибольшая урожайность (6 кг/м²) отмечается на вариантах, где применялось замачивание семян и

опрыскивание растений в фазу пяти настоящих листьев, и замачивание семян с последующим внесением при пикировке гранул. По сравнению с контролем, биопрепараты повышали урожайность на 31 и 27 % соответственно.

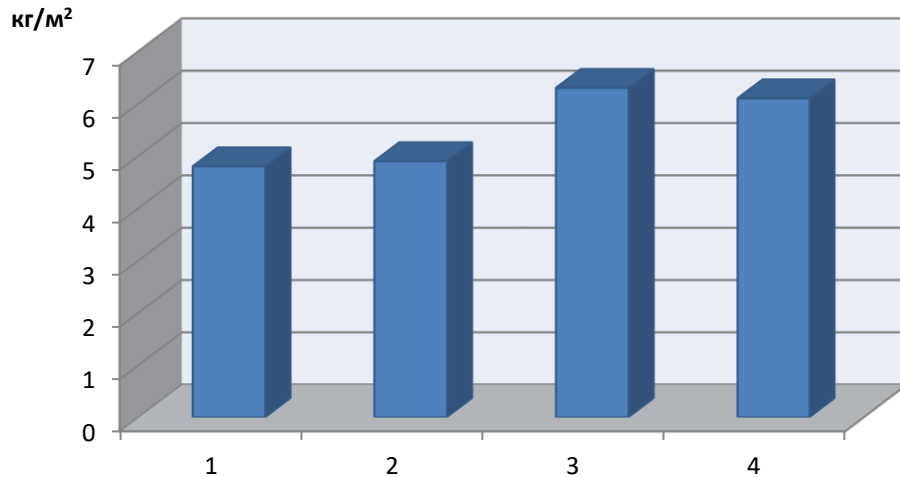


Рисунок 24 – Урожайность томатов, кг/м²: 1 – контроль; 2 – *C. vulgaris* замачивание; 3 – *C. vulgaris* замачивание + опрыскивание; 4 – *C. vulgaris* замачивание + гранулы (pA (вариант) = 0,0000; pB (год) = 0,0000; pAB (взаимод.) = 0,0000)

Данные результаты коррелируют с биометрическим показателем количества плодов с одного растения и позволяют судить о положительном влиянии микроводоросли за счет содержания в ней фитогормонов, влияющих на развитие растений. Простое замачивание семян не показало достоверных результатов, урожайность данного опытного варианта оказалась примерно на одном уровне с контролем и не была принята во внимание.

Томаты относятся к одним из наиболее популярных овощей. Е.А. Бочарникова с соавторами (2023) отмечают, что улучшение их вкусового и биохимического качества возможно в результате снижения содержания нитратов и увеличения содержания сахара. Содержание нитратов, кроме того, является одним из важнейших показателей безопасности свежей овощной продукции. Нитратный азот в овощных культурах накапливается с различной интенсивностью. Отдельные сельскохозяйственные культуры даже при внесении большого количества азотсодержащих удобрений не накапливают нитраты в выращенном

урожае. В данном случае содержание солей азота в овощах будет колебаться от 10-150 мг/кг. К таким сельскохозяйственным культурам относятся томаты. Содержание нитратов в плодах томатов экспериментальных делянок оказалось в 1,3-1,9 раза меньше, чем их предельно допустимая концентрация в условиях открытого грунта (150 мг/кг). *Chlorella vulgaris* способствует снижению уровня нитратов на 10 % при замачивании семян в растворе биопрепарата (таблица 5). При замачивании семян и внесении гранул с *Chlorella vulgaris* отмечено повышение содержания нитратов в плодах томата на 28 % по сравнению с контролем. По-видимому, гранулы биопрепарата, вносимые в почву, образовали биокорку, которая способствовала интенсивному накоплению и фиксации азота.

Пищевая ценность овощей обуславливается содержанием в них углеводов, белков и других азотистых соединений, минеральных или зольных веществ и витаминов. Понимание изменчивости количественного и качественного биохимического состава необходимо для выращивания и сохранения урожая овощей. Биохимический состав плодов томата зависит от почвенно - климатических условий, агротехники и сортовых особенностей (Велижанов, 2019). Известно, что плоды с повышенной концентрацией сухих веществ имеют хорошие вкусовые качества, дают больший выход продукции при переработке, обладают лучшей транспортабельностью и лежкостью при хранении. Результаты биохимического анализа плодов томата на содержание сухого вещества, сахаров и витамина С, показывают, что в зависимости от способа внесения биопрепарата их значения имели различия по сравнению с контрольным вариантом. Применение биопрепарата на основе микроводоросли при выращивании рассады томата приводит к снижению концентрации сухих веществ в плодах на 0,3-0,7 % по сравнению с контролем. Снижение концентрации сухого вещества на фоне применения биопрепаратов при производстве рассады томата не оказало прямого влияния на содержание сахара и витамина С в плодах, что подтверждает результаты исследованиями А.Б. Куриной с соавт. (2021). При изучении коллекционных, селекционных и гибридных образцов культурного и некоторых

видов дикорастущих томатов авторами установлена слабая взаимозависимость содержания аскорбиновой кислоты с содержанием сухих веществ ($r = 0,32$). Концентрация сахара в плодах томата оценивается на близком уровне (3,46-3,64 %; $p = 0,4650$).

Таблица 5 – Содержание нитратов и биохимический состав плодов томатов (2022-2023 гг.)

Вариант	Нитраты, мг/кг	Сухие вещества, %	Сахара, %	Витамин С, мг/100г
Контроль	88,3	6,15	3,58	26,09
Замачивание 1 % р-р	79,2	5,44	3,46	27,61
Замачивание + опрыскивание 1 % р-р	88,1	5,90	3,64	29,90
Замачивание 1 % р-р + гранулы	113,0	5,44	3,54	21,32
<i>pA (вариант)</i>	0,0000*	0,0000*	0,4650	0,0000*
<i>pB (год)</i>	0,9911	0,0174*	0,0000*	0,03800*
<i>pAB (взаимод.)</i>	0,0130*	0,0061*	0,0821	0,0292*

В томатах витамин С существует в двух водорастворимых биологически активных формах: аскорбат (восстановленная форма) и дегидроаскорбиновая кислота (окисленная форма). Обе формы присутствуют во всех клеточных компонентах тканей, находящихся в стадии активного роста и развития. В послеуборочный период содержание аскорбиновой кислоты значительно снижается в процессе хранения, но содержание витамина С демонстрирует значительную стабильность, если выразить его как сумму аскорбиновой кислоты и дегидроаскорбиновой кислоты. Исследованиями установлено, что биопрепараты с культурой *Chlorella vulgaris* и способы их применения достоверно влияют на концентрацию витамина С в плодах. Варианты опыта с замачиванием семян 1 % раствором микроводоросли, с замачиванием и последующим опрыскиванием растений 1 % раствором в фазу пяти настоящих листьев показали увеличение содержания витамина С на 2-4 мг/100г ($p = 0,0000$). Существенное снижение содержания витамина С в среднем за годы исследований до 21,3 мг/100г стабильно

проявляется по годам. Снижение содержания витамина С при применении гранул биопрепарата возможно обусловлено лучшей обеспеченностью почвы минеральным азотом, что вполне согласуется с данными по содержанию нитратов в плодах томата этого варианта. Улучшение условий азотного питания растений может вызывать снижение содержания витамина С по косвенной причине, связанной с увеличением густоты и массы листьев, что отмечалось для этого варианта опыта. При оценке биохимического состава плодов томата по ряду показателей выделялся вариант с применением *Chlorella vulgaris* для замачивания и опрыскивания растений 1 % раствором. При таком способе получения рассады культуры отмечалось максимальное содержание сахара (3,6 %) и витамина С в плодах (29,9 мг/100г). Следует отметить, что факторы, влияющие на качество томатов, сложны и взаимосвязаны, и необходимы дополнительные исследования для закрепления знаний о реальных взаимозависимостях.

Таким образом, биопрепараты на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* и способы их применения на томатах открытого грунта определяют продукционный потенциал культуры и качество продукции. Замачивание семян в 1 % растворе биопрепарата с последующим опрыскиванием рассады, а также с внесением гранул в почву при пикировке растений увеличивает их надземную фитомассу на 59-120 г., количество листьев на 4-7 шт. и массу листьев на 50-71 г. на одно растение по сравнению с контролем. На этих вариантах опыта была получена максимальная урожайность томатов, достигающая 6 кг/м². Технология получения рассады томата с замачиванием семян и последующим опрыскиванием растений 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* благоприятно отразилась на биохимическом составе плодов томата.

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ СРОКОВ ПРИМЕНЕНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОВОДОРОСЛИ *CHLORELLA* *VULGARIS* НА СВОЙСТВА АГРОЧЕРНОЗЕМА И УРОЖАЙНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

5.1 Агрофизические свойства

Уменьшение объемов применения минеральных и органических удобрений привело к снижению эффективного плодородия почв, что и определило поиск и изучение приемов использования органоминеральных удобрений и биологических стимуляторов на основе культуры микроводорослей для повышения продуктивности системы «почва-растение» (Кураченко и др., 2011; Абакумова и др., 2024).

Агрогенное воздействие, проявляющееся при обработке почвы, внесении удобрений и попадании на поверхность почвы препаратов для защиты растений, является одним из факторов, определяющих направление и степень изменения агрофизических свойств (Медовик и др., 2011; Гармашов и др., 2014). В связи с усилением антропогенной нагрузки широкое распространение получили дегумификация, переуплотнение и дезинтеграция структуры, и ухудшение агрофизических свойств пахотного горизонта, что усиливает проявление основной формы деградации – водной и ветровой эрозии (Суханова и др., 2019; Ерёмина, Котченко, 2020; Гребенников, 2020).

Агрофизические свойства являются факторами, определяющими водный, воздушный режим и продуктивность сельскохозяйственных растений (Ахтариев и др., 2019). Они необходимы для оценки происходящих в почве процессов влаго- и теплообмена, жизнедеятельности микроорганизмов и оценки агротехнических приёмов возделывания сельскохозяйственных культур (Уткаева и др., 2008; Ширяева и др., 2020; Ковалец и др., 2023). По мнению А.П. Попкова и О.А.

Сорокиной (2023), характеристика агрофизических свойств является индикатором трансформации их почвенного плодородия.

Важнейшим показателями агрофизического состояния почв является структура и плотность сложения почвы, оказывающие существенное влияние на формирование, динамику запасов продуктивной влаги и продукционный процесс в целом (Анциферова, 2017). По мнению Н.А. Воронковой (2009), определение закономерностей формирования запасов продуктивной влаги в условиях интенсификации технологий возделывания сельскохозяйственных культур позволяет выявить меры воздействия на климатические ресурсы зоны.

Структура – совокупность различных по величине, форме и качественному составу отдельностей (агрегатов), на которые способна распадаться почва. Структурный состав почв не является обязательным условием высокой урожайности возделываемых на них культур. Однако он влияет на плотность сложения почвы, водный, воздушный и тепловой режим, которые в свою очередь оказывают воздействие на протекающие в почве микробиологические, физико-химические и другие процессы, в конечном итоге обеспечивающие оптимальные условия для роста и развития растений.

Устойчивость структурного состояния пахотных почв реализуется за счет взаимодействия различных специфических почвенных механизмов и в большей степени за счет способности к переагрегации. Переагрегация почвенной массы происходит в результате циклов набухания – усадки при увлажнении и высыхании, замораживании и оттаивании, обработки почвы, внесения удобрений и биологических факторов (Кураченко, 2013).

Анализ фракционного состава структурных отдельностей агрочернозема опытного поля показывает господство глыбистых отдельностей больше 10 мм (рисунок 25). На их долю в пахотном слое приходится от 36 до 48 % по вариантам опыта. Агрономически ценные фракции размером от 10 до 1 мм практически равномерно распределены в почвенной массе и занимают от 9 до 15 %. Доля тонких отдельностей менее 1 мм незначительная и не превышает 2 % от почвенной массы.

Пылеватые отдельности 0,5-0,25 и меньше 0,25 мм практически отсутствуют в почвенной массе.

Исследованиями установлено, что обработка вегетирующих посевов яровой пшеницы препаратами *C. vulgaris* определяет изменение фракционного состава агрочернозема. Наиболее трансформируемыми фракциями в опыте оказались отдельности больше 10 и 3-1 мм.

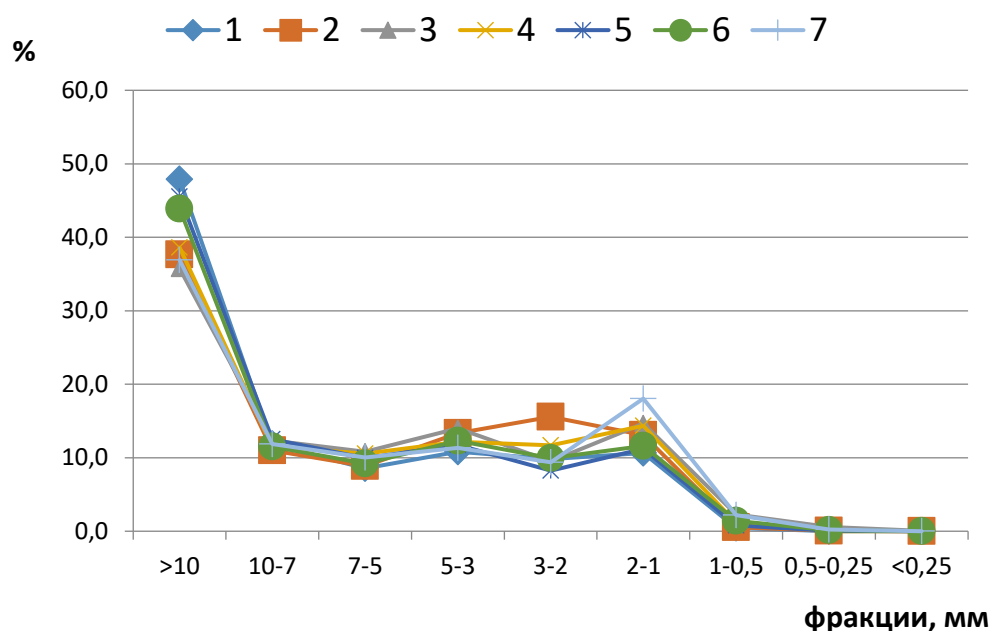


Рисунок 25 – Фракционный состав структуры агрочернозема, % (0–20 см; n = 6) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. Фон + суспензия *C. vulgaris* (1-кратная); 3. Фон + суспензия *C. vulgaris* (2-х-кратная); 4. Фон + суспензия *C. vulgaris* (3-х-кратная); 5. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (1-кратная); 6. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (2-х-кратная); 7. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (3-х-кратная)

Максимальная глыбистость почвы в 0-20 см слое агрочернозема отмечена на контрольном варианте. В среднем за период наблюдений она составляет 48 % от массы почвы. Одно-, двух- и трёхкратная обработка вегетирующих посевов пшеницы 1 % раствором биопрепарата способствует существенному снижению доли крупных отдельностей. По сравнению с контрольным вариантом глыбистость почвы уменьшается на 9-12 %. В случае применения термически обработанной суспензии *Chlorella vulgaris* на яровой пшенице положительное действие на

фракционный состав структуры агрочернозема установлено только в условиях трёхкратной обработки посевов. Здесь отмечено снижение глыбистых отдельностей на 11 %. На этом варианте опыта установлено значительное увеличение комковато-зернистых агрегатов размером 2-1 мм (18 %).

Содержание агрономически ценной фракции (АЦФ) – один из важнейших показателей структурного состояния почвы. Принято считать, что к агрономически ценным агрегатам относятся структурные отдельности размером от 10 до 0,25 мм, так как они обуславливают наиболее благоприятный водно-воздушный режим для растений.

Применение суспензии *Chlorella vulgaris* оказывает положительное влияние на структурное состояние агрочернозема (прил.1). Расчет среднестатистических данных содержания агрономически ценных фракций в агрочерноземе за период наблюдений показал положительную структурообразующую роль биопротекторных препаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* в технологии возделывания яровой пшеницы (таблица 6).

Установлено, что почва контрольного варианта в среднем за вегетационный период оценивается удовлетворительной оструктуренностью с содержанием АЦФ 52 %. Обработка вегетирующих растений биопрепаратами с культурой *Chlorella vulgaris* обеспечивает увеличение содержания агрономически ценных фракций на 2-12 % по сравнению с контролем. Максимальный структурообразующий эффект биопрепаратов с хорошей оструктуренностью почвы установлен на всех вариантах опыта с обработкой посевов пшеницы 1 % раствором суспензии. При этом кратность обработки не определяет существенные различия между вариантами опыта (61-64 %). Хорошая оструктуренность агрочернозема (63 %) установлена и в случае трёхкратного опрыскивания растений термически обработанной *Chlorella vulgaris*.

Благоприятная переагрегация почвенной массы под действием биопрепаратов микроводорослей может быть объяснены действием экзополисахаридов, продуцируемых микроводорослями. При попадании в почву

эти полисахариды имеют тенденцию образовывать клейкую и студенистую оболочку, которая способствует агрегации почв и предотвращает их эрозию. Эти полисахариды также играют важную роль в аэрации почв (Lababpour, 2016; 2017). Слизистые оболочки и экзополисахариды также позволяют микроводорослям выживать при высыхании даже до 70 лет хранения и восстанавливать свою деятельность после влияния негативных экологических факторов (Goncalves, 2021). Кроме того, хелаторы слизистых оболочек образуют органоминеральные комплексы для усиления агрегации за счет связывания металлов, таких как кальций, железо и цинк, а также алюмосиликатные глинистые минералы.

Таблица 6 – Агрофизическое состояние агрочернозема в посевах яровой пшеницы (0-20 см; n=6)

Вариант	Содержание АЦФ, %	Плотность сложения, г/см ³	Запасы продуктивной влаги, мм
Контроль (хим. защита - фон)	52,1	0,97	37,9
Фон + нативная суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	62,4	0,81	32,0
Фон + нативная суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	64,3	0,79	30,6
Фон + нативная суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	61,4	0,94	34,3
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	54,4	0,90	35,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	56,2	0,95	36,5
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	63,1	0,92	34,4
<i>p</i>	<i>p</i> (вар.) = 0,0520*; <i>p</i> (срок) = 0,0000*; <i>p</i> (взаим.) = 0,2461	<i>p</i> (вар.) = 0,0010*; <i>p</i> (срок) = 0,0000*; <i>p</i> (взаим.) = 0,3732	<i>p</i> (вар.) = 0,0190*; <i>p</i> (срок) = 0,0000*; <i>p</i> (взаим.) = 0,2125

Структурообразование – это сложный процесс, возможный только при увлажнении и при определенных пределах влажности, когда проявляется действие сил различной природы. Важное место среди них занимают процессы увлажнения и иссушения и тесно связанные с ними усадка и набухание, приводящие к объемным изменениям в почве. Направленность изменений агрономически ценных фракций обусловлена, как правило, динамикой влажности (Данилова, 1996).

Корреляционный анализ показывает обратную сильную зависимость между влажностью агрочернозема и содержанием в нем агрономически ценных фракций ($r = -0,65$; рисунок 26).

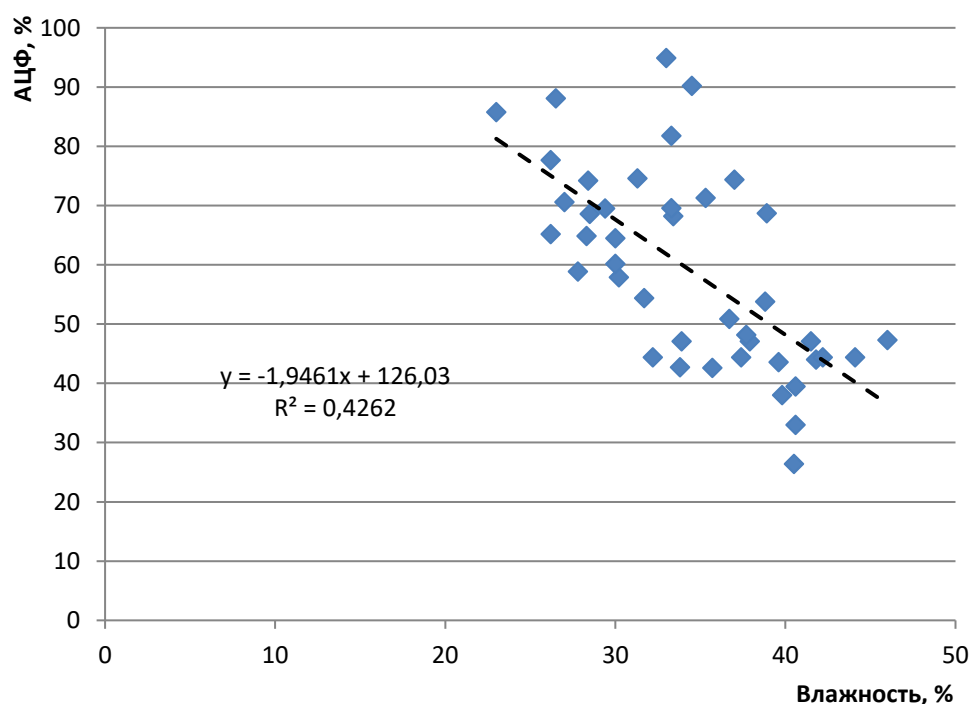


Рисунок 26 – Результаты корреляционного анализа влияния влажности на содержание агрономически ценных фракций в агрочерноземе ($r_{05}=0,30$; $n=42$)

Установлено, что в интервале влажности от 24 до 33 % формируется максимальное содержание агрономически ценных фракций в почве по вариантам опыта (86-95 %). Обильные осадки третьей декады июня определяют существенное огрубление структуры почвы (26-40 %) (прил. 1).

Плотность почвы является информативным показателем, определяющим эффективность отдельных агротехнологий. Этот агрофизический параметр влияет на доступность влаги для растений и тесно связан с продуктивностью сельскохозяйственных культур (Пигорев, Ишков, 2021; Лукьянов, Прущик, 2022; Скороходов и др., 2024).

При оценке плотности сложения нами использована градация С.В. Астапова, С.И. Долгова, по которой почва с величиной плотности 0,90–0,95 г/см³ считается рыхлой; 0,95– 1,15 г/см³ – нормальной; 1,15–1,25 г/см³ – уплотненной, более 1,25 г/см³ – сильно уплотненной (Кураченко, 2013).

Исследованиями установлено, что плотность почвы контрольного варианта в среднем за период наблюдений имеет нормальное сложение (0,97 г/см³). Применение в технологии возделывания яровой пшеницы суспензии микроводоросли и её термически обработанного аналога определяет снижение плотности 0-20 см слоя агрочернозема на 0,03-0,18 г/см³. На всех вариантах опыта почва становится рыхлой. Фолиарная обработка посевов яровой пшеницы 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* по всходам и всходам + кущению определяет максимальное снижение плотности агрочернозема до 0,81-0,79 г/см³ ($p = 0,0010$).

Установлено, что существенное разуплотнение почвы на этих вариантах опыта произошло к периоду молочной спелости яровой пшеницы ($p = 0,0000$; прил. 1), что в сильной степени сопряжено с увеличением содержания агрономически ценных агрегатов в почве ($r = -0,69$). Сильная обратная зависимость между изучаемыми параметрами показывает, что при формировании отличной оструктуренности агрочернозема закономерно снижается плотность сложения, и она стремится в величине 0,70 г/см³. Эта закономерность отмечена на всех вариантах, где применялись препараты на основе микроводорослей, что еще раз подчеркивает положительное влияние этих организмов не только на растения, но и на агрофизические свойства почв (рисунок 27).

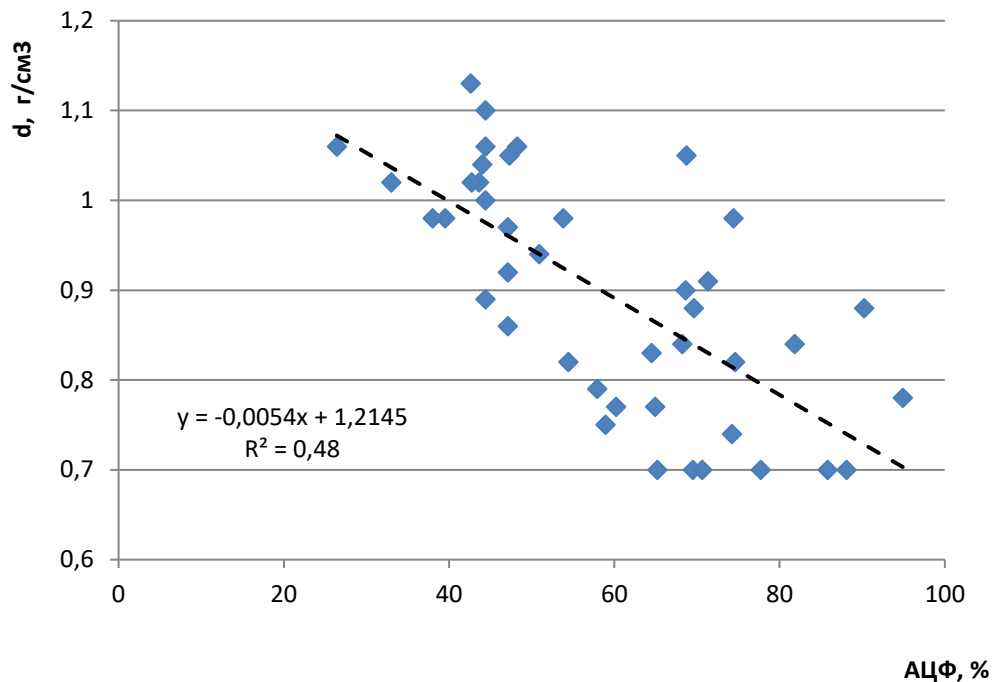


Рисунок 27 – Результаты корреляционного анализа влияния содержания агрономически ценных фракций на плотность сложения агрочернозема ($r_{05}=0,30$; $n=42$)

В условиях интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур запасы продуктивной влаги нередко являются факторами, лимитирующими урожай (Анцифорова, 2017). Для характеристики влагообеспеченности сельскохозяйственных культур целесообразно учитывать почвенную влагу, обладающую мобильностью и доступностью для поддержания жизни растений и формирования урожая (Кураченко и др., 2020). Количество осадков, выпавших в июне и в августе, определило в целом удовлетворительную влагообеспеченность агрочернозема под посевами яровой пшеницы. При этом в период кущения яровой пшеницы обильные осадки определяют хорошие и удовлетворительные запасы продуктивной влаги в 0-20 см слое агрочернозема по вариантам опыта (33-42 мм), в августе они оцениваются меньшей величиной (26-35 мм) (прил. 2). Дисперсионный анализ показывает существенное влияние фактора «вариант» и «срок» отбора образцов на формирование запасов продуктивной влаги (таблица 6; $p = 0,0190-0,0000$). Исследованиями установлено, что обработка вегетирующих посевов биопрепаратами микроводоросли *Chlorella*

vulgaris способствует снижению запасов продуктивной влаги в почве на 1-7 мм по сравнению с контрольным вариантом. Двух- и трёхкратное применение 1 % раствора суспензии микроводоросли определяет максимальное снижение запасов продуктивной влаги до 31-32 мм в 0-20 см слое агрочернозема, что связано с более интенсивным развитием растений на этих вариантах опыта.

Используя данные дисперсного анализа, нами рассчитан показатель силы влияния факторов на формирование структурного состава агрочернозема в посевах яровой пшеницы (рисунок 28). Установлено, что наибольшее влияние на формирование агрофизического состояния агрочернозема в посевах яровой пшеницы в вегетационный сезон 2021 года повлиял срок отбора образцов. На долю этого фактора приходится 75-48 %. Полученные результаты обусловлены значительной контрастностью сезона по количеству атмосферных осадков и влажности почвы.

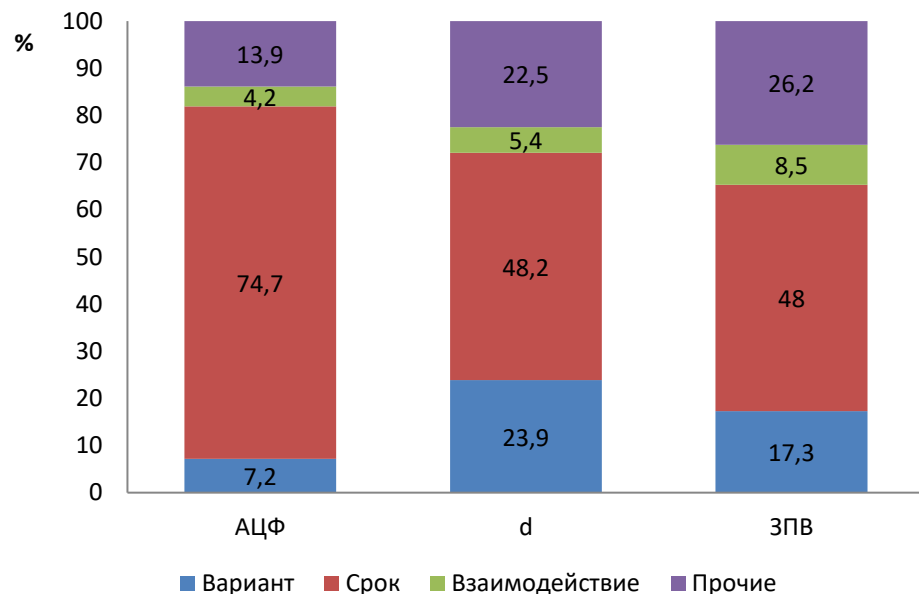


Рисунок 28 - Вклад агроэкологических факторов в формирование агрофизического состояния агрочернозема

Июньский период сопровождался большим количеством осадков, что превысило норму на 75 %. В этот период температура воздуха ниже среднегодового показателя на 0,7 °C. В июле и августе отмечался дефицит

осадков. Влияние фактора «вариант» оценивается величиной в 7-24 %. В наибольшей степени исследуемые препараты в виде суспензии *Chlorella vulgaris* и её термически обработанного аналога, а также кратность применения микроводорослей на посевах яровой пшеницы влияют на плотность сложения и запасы продуктивной влаги 0-20 см слоя агрочернозема. Показатель степени влияния этого фактора оценивается величиной 17-24 %.

Таким образом, возделывание яровой пшеницы на агрочерноземах Красноярской лесостепи с применением биопрепаратов на основе микроводорослей положительно отразилось на их агрофизическом состоянии. Применение 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris* в баковых смесях по всходам, всходам и кущению определяет максимальный структурообразующий эффект по содержанию агрономически ценных фракций (62-64 %) и снижает плотность сложения до 0,81-0,79 г/см³ в 0-20 см слое агрочернозема.

5.2 Гумусное состояние агрочернозема

В связи с возросшей интенсивностью земледелия, в настоящее время остро встает вопрос о сохранении почвенного плодородия. Так, главнейшим фактором, обуславливающим почвенное плодородие, является органическое вещество почвы (Аристовская, 1988). В последние годы все активнее стали применяться различные биопрепараты, используемые в основном, в целях роста- и иммуностимуляции растений. Однако их воздействие на органическое вещество и гумусное состояние почв мало изучено.

Микроводоросли — это уникальные, одноклеточные фотосинтезирующие организмы, которые являются первичными продуцентами органического вещества и кислорода на Земле. С каждым годом они всё больше привлекают внимание ученых, так как считаются возобновляемым источником биомассы, обладают колоссальными темпами роста и ценным биохимическим составом (Минюк, Дробецкая, 2008). Микроводоросли обогащают почву органическими веществами,

являются источником физиологически активных веществ, играющих особую роль в почвенных процессах, макро- и микроэлементов (Гущина, 2016; Джуманиязов, Аллаберганов, 1977).

Исследованиями установлено, что агрочерноземы опытного поля отличаются высоким содержанием гумуса (таблица 7). Содержание углерода гумуса в почве контрольного варианта с химической защитой растений в среднем за период наблюдений оценивается на уровне 3754 мгС/100г (прил. 3).

Таблица 7 – Гумусное состояние агрочернозема в посевах яровой пшеницы (0-20 см; n = 6)

Вариант	Сгумуса	С _{Н2О}
	мгС/100	
Контроль (хим. защита - фон)	3753,8	13,6
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	3597,5	15,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	3570,6	13,7
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	3716,2	16,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	3620,2	12,9
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	3739,6	18,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	3753,9	17,0
<i>p</i>	<i>p</i> (вар.) = 0,003*; <i>p</i> (срок) = 0,2244; <i>p</i> (взаим.) = 0,0430*	<i>p</i> (вар.) = 0,3171; <i>p</i> (срок) = 0,2642; <i>p</i> (взаим.) = 0,2322

Установлено, что обработка вегетирующих посевов яровой пшеницы в баковых смесях приводит к уменьшению концентрации гумусовых веществ в почве (Абакумова, Бурак, Кураченко, 2022). Убыль Сгумуса по сравнению с контрольным вариантом составляет 14-183 мгС/100г почвы. Максимальное достоверное снижение концентрации Сгумуса в 0-20 см слое агрочернозема происходит в случае одно- и двукратной обработки посевов яровой пшеницы 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris*. Снижение концентрации углерода гумусовых веществ на этих вариантах опыта оценивается величиной 156-183 мгС/100г ($p = 0,003$).

В период кущения пшеницы на всех вариантах опыта была проведена однократная обработка вегетирующих растений суспензией *Chlorella vulgaris* и термически обработанным аналогом. Уже в этот период установлено снижение концентрации Сгумуса на всех вариантах опыта, которое отмечается в период молочной спелости пшеницы. Полученные результаты свидетельствуют об усилении минерализационных процессов в почве под действием микроводорослей. В современной научной литературе практически не отражено влияние *Chlorella vulgaris* на состояние органического вещества почв. Положительные результаты таких исследований, могли бы говорить о возможности использования хлореллы в качестве органического удобрения. Единичные исследования свидетельствуют о повышении количества гуминовых кислот в почве под воздействием микроводорослей, что объясняется бурным развитием микробиологических и биохимических процессов в почве (Панкратова, 2014; Шалыго, 2019).

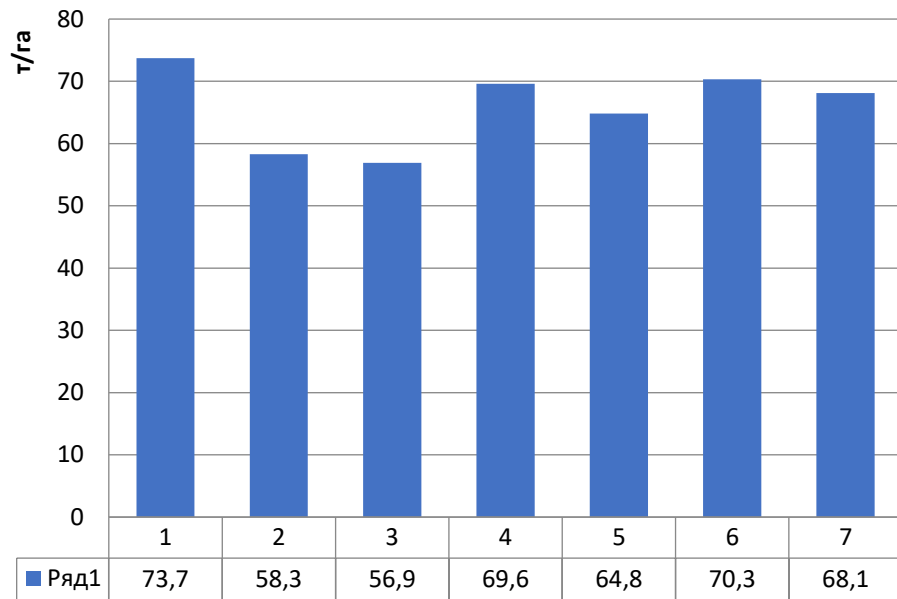
Почвенное органическое вещество – сложная гетерогенная система, состоящая из активной (легкоминерализуемой) и устойчивой (стабильной) части (Ларионова и др., 2011). К легкоминерализуемой части органического вещества относят растительные остатки, микробную биомассу и подвижный гумус. Подвижный гумус – это комплекс веществ гумусовой природы, который легко переходит в растворимую форму. Водорастворимые соединения гумуса постоянно обновляются и реагируют на любые агрогенные воздействия. В отношении

водорастворимого углерода, выщелачиваемого из растительных остатков в процессе их разложения, установлена иная зависимость. К моменту кущения пшеницы при однократной обработке вегетирующих посевов отмечено увеличение C_{H_2O} на 1-8 мгС/100г по сравнению с контрольным вариантом (прил. 3). К периоду созреванию пшеницы максимальная концентрация водорастворимого гумуса отмечается в случае трёхкратной обработки посевов яровой пшеницы 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* и её термически обработанным аналогом (16-21 мг/100г). Эти закономерности отразились в содержании C_{H_2O} в целом за период наблюдений, когда концентрация водорастворимого гумуса изменяется по вариантам опыта от 13 до 19 мгС/100г, но эти различия не являются достоверными ($p = 0,3171$).

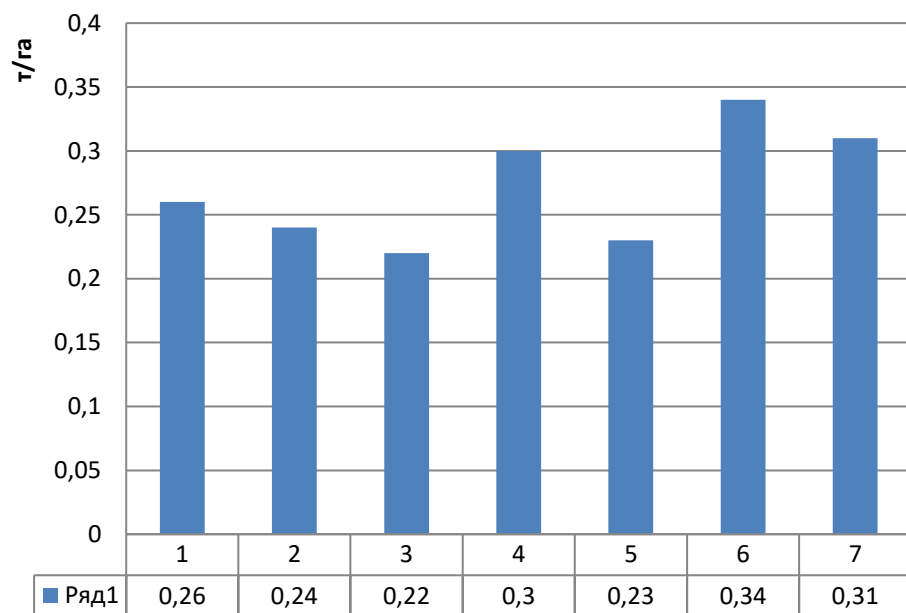
Между концентрацией в почве гумусовых веществ и водорастворимых соединений подвижного гумуса выявлена средняя обратная зависимость, проявляющаяся во все сроки отбора образцов ($r = - 0,35...- 0,36$). Она описывается полиномом второй степени и свидетельствует о том, что снижение концентрации гумусовых веществ в агрочерноземе приводит к увеличению подвижных соединений гумуса.

Расчет запасов $S_{гумуса}$ с учетом плотности сложения позволил выявить, что применение биопрепаратов на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* снижает запасы $S_{гумуса}$ по сравнению с контрольным вариантом (рисунок 29).

Одно- и двукратная обработка посевов яровой пшеницы *Chlorella vulgaris* определяет максимальное снижение запасов углерода гумусовых веществ до 57-58 т/га, что обусловлено усилением процессов минерализации органического вещества и значительным разуплотнением почвы. Обработка посевов 1 % раствором нативной суспензии *Chlorella vulgaris* по всходам, кущению и колошению определяет пополнение запасов водорастворимого углерода до 0,3 т/га. Такие же результаты (0,31-0,34 тС/га) выявлены в случае применения термически обработанной *Chlorella vulgaris* при двукратном и трёхкратном опрыскивании растений.



А



Б

Рисунок 29 – Запасы Сгумуса (А) и CH_2O (Б) (т/га) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. Фон + суспензия *C. vulgaris* (1-кратная); 3. Фон + суспензия *C. vulgaris* (2-х-кратная); 4. Фон + суспензия *C. vulgaris* (3-х-кратная); 5. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (1-кратная); 6. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (2-х-кратная); 7. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (3-х-кратная)

Полученные результаты согласуются с оценкой доли C_{H2O} от Сгумуса в агрочерноземе. Более широкое отношение между стабильной частью гумуса и его подвижным компонентом свидетельствует о пополнении пула легкоминерализуемого органического вещества в почве.

Оценка вклада изучаемых факторов в изменение содержания гумусовых веществ показывает, что исследуемые в опыте препараты на 37 % повлияли на содержание Сгумуса и на 16 % на его водорастворимые соединения (рисунок 30).

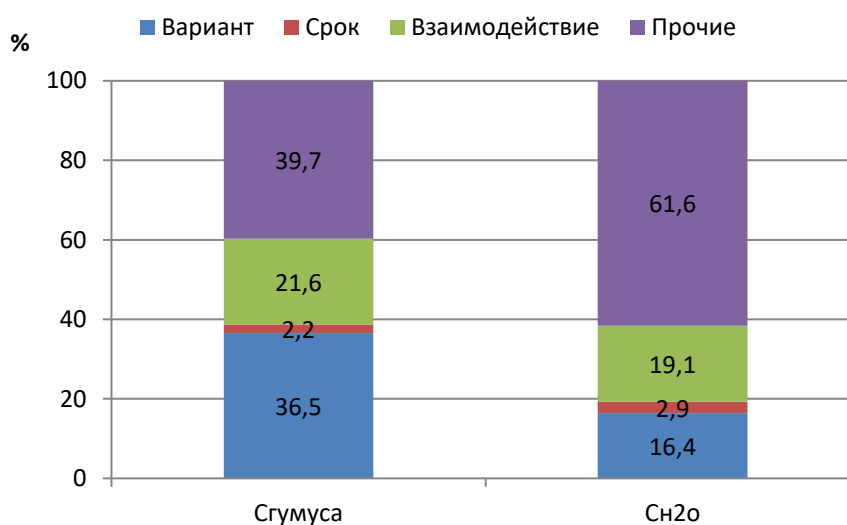


Рисунок 30 - Вклад агроэкологических факторов в формирование гумусного состояния агрочернозема

Незначительная роль фактора «срок» отбора образцов (2-3 %) свидетельствует о небольшой изменчивости содержания Сгумуса и его водорастворимой части в сезонном цикле функционирования агроценоза яровой пшеницы по вариантам опыта. Значительно большая роль принадлежит взаимодействию изучаемых факторов (19-22 %).

Таким образом, возделывание яровой пшеницы с применением биопрепаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* отразилась на состоянии гумусовых веществ в агрочерноземе. Обработка посевов яровой пшеницы по всходам и всходам – кущению препаратом микроводоросли *Chlorella vulgaris* существенно снижает запасы Сгумуса до 57-58 т/га. Двух и трёхкратное

применение препарата с термически обработанной хлореллой формирует максимальные запасы водорастворимого гумуса (0,31-0,34 т/га).

5.3 Агрохимическое состояние агрочернозема

Одним из наиболее важных показателей физико-химического состояния почв является реакция их среды – величина pH. Реакция среды имеет существенное значение для условий питания растений и применения удобрений, выступает определяющим показателем при оценке внутрипочвенной и внутриландшафтной миграции подвижных соединений. Оптимальный уровень реакции почвенной среды для растений обуславливается многими факторами: наличием в почве ионов водорода и алюминия, физико-химическими свойствами почвы, содержанием в ней гумуса, поглощенных оснований, гранулометрическим составом почвы и буферностью. В каждом конкретном случае доминируют разные факторы, которые оказывает многостороннее воздействие на почву и растения.

Исследованиями установлено, что агрочернозем опытного поля характеризуется нейтральной реакцией среды. Сохранение нейтральной реакции почвенного раствора отмечается в почве контрольного и опытных вариантов на протяжении периода наблюдений (Абакумова, Коваль, 2022). В момент кущения яровой пшеницы реакция почвенного раствора изменяется от 6,8 до 7,1 ед. pH (прил.4). В период начала созревания яровой пшеницы её величина в почве контрольного варианта и вариантов с применением биопрепаратов снизилась на 0,1-0,2 ед. pH. Оценка среднесезонной величины pH водной вытяжки показывает, что одно- и двукратная обработка посевов яровой пшеницы 1 % раствором *Chlorella vulgaris* способствует повышению pH водной вытяжки почвы на 0,1 ед. Применение термически обработанного препарата с микроводорослями в фазу всходов и кущения, а также всходов, кущения и колошения снижает величину pH водной вытяжки на 0,1 ед. pH с сохранением нейтральной среды (рисунок 31).

Отсутствие достоверных отличий по величине pH_{H_2O} между вариантами опыта свидетельствует о том, что применяемые в эксперименте препараты на основе культуры *Chlorella vulgaris* не оказывают подщелачивающего или подкисляющего действия на почву ($p = 0,0670$). Ранее установлено, что применение минеральных, органических удобрений и биологических стимуляторов способствует достоверному изменению реакции почвенного раствора (Кураченко и др., 2011; Кураченко, 2021), что при длительном применении негативно сказывается на состоянии почвы.

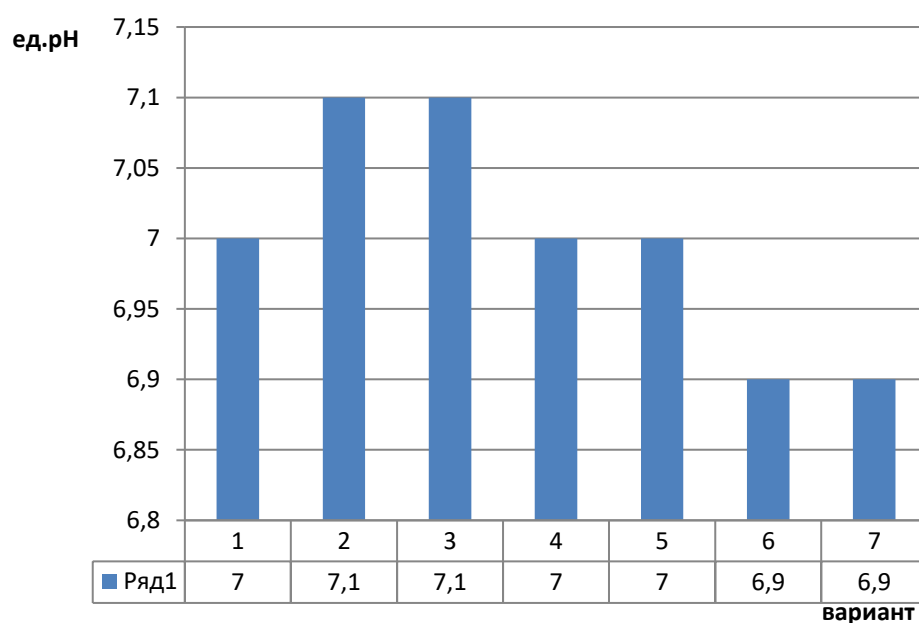


Рисунок 31 – Реакция почвенного раствора агрочернозема на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. Фон + суспензия *C. vulgaris* (1-кратная); 3. Фон + суспензия *C. vulgaris* (2-х-кратная); 4. Фон + суспензия *C. vulgaris* (3-х-кратная); 5. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (1-кратная); 6. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (2-х-кратная); 7. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (3-х-кратная) (p ($var.$) = 0,0670; p ($срок$) = 0,3000; p ($взаим.$) = 0,0601)

По мнению ряда исследователей (Solovchenko et al., 2016; Schreiber et al., 2018) использование суспензий микроводорослей в качестве биологического мелиоранта приводит к сохранению и повышению плодородия почв. Благодаря своей биомассе почва обогащается микро- и макроэлементами (азот, фосфор,

калий, йод и др.). Микроводоросли быстро разлагаются в почве и, в отличие от навоза, не оставляют за собой семена сорняков и споры фитопатогенных грибов (Лукьянов, Стифеев, 2014). Аминокислотный состав хлореллы делает качество её белка сравнимым с качеством других белков растительного происхождения, молока, дрожжей и даже превосходящим их (Митишев и др., 2021). Многие микроводоросли способны утилизировать азот, который, наряду с фосфором, нужен им как питательное вещество для размножения (Толеутаев, 2018). По мнению В.А. Лукьянова и А.И. Стифеева (2014), они могут усваивать органические формы азота с помощью выделяемых ферментов, а также его минеральные формы, подобно высшим растениям. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление роли препаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* на азот фонд почв и содержание в них доступных элементов питания.

Ведущее место среди всех элементов питания растений отводится, прежде всего, азоту. Накопление общего азота в почве в процессе почвообразования определяется биоклиматическими условиями её формирования (Гамзиков, 2013). При этом важно понимать, что потребность растений в азоте удовлетворяется как за счет почвенных запасов, так и удобрений, содержащих азот. Запасы азота в почве формируются вследствие выноса с урожаем культуры, за счет гидролиза соединений азота почвы, а также его накопления, денитрификации и внутрипочвенных миграционных процессов (Ганжара и др., 2001).

Высокое содержание общего азота в агрочерноземе по вариантам опыта (4011-4193 мг/кг) обусловлено высокой гумусированностью этих почв (таблица 8). Исследованиями В.В. Чупровой (1997) установлено, что для черноземов, выщелоченных земледельческой части Красноярского края коэффициент корреляционной связи между содержанием азота и гумуса равен 0,938. Применение нативной суспензии *Chlorella vulgaris* и её термически обработанного аналога в качестве foliarной обработки посевов способствует повышению содержания

общего азота на 14-181 мг/кг по сравнению с контрольным вариантом, но эти различия не являются достоверными ($p = 0,7090$).

Таблица 8 - Содержание органических форм азота в агрочерноземе (0-20 см; $n = 6$)

Вариант	Н _{общ} , мг/кг	Н _{тг} , мг/кг	Н _{лг} , мг/кг	Н _{нг} , мг/кг
Контроль (хим. защита - фон)	4011,3	294,0	146,0	3571,3
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	4025,0	281,8	152,3	3590,9
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	4110,0	267,8	147,7	3694,5
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	4109,8	287,0	161,0	3661,8
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	4078,8	290,5	152,6	3635,7
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	4060,0	281,8	161,7	3616,5
Фон + суспензия <i>C.a vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	4192,5	288,8	174,3	3729,4
p	p (вар.) = 0,7090; p (срок) = 0,2555; p (взаим.) = 0,7781	p (вар.) = 0,0190* ; p (срок) = 0,0060* ; p (взаим.) = 0,0271*	p (вар.) = 0,0000* ; p (срок) = 0,7044; p (взаим.) = 0,0060*	p (вар.) = 0,0200* ; p (срок) = 0,1533; p (взаим.) = 0,2142

Минимальное содержание общего азота зафиксировано в почве контрольного варианта без применения биопротекторных препаратов с микроводорослями (4011 мг/кг). Здесь же отмечается снижение легко- и негидролизуемой части азота. Полученные результаты согласуются с исследованиями Л.Б. Сайфуллина с соавт. (2017) доказавшими, что на вариантах опыта без удобрений происходит значительное нарушение общей структуры азотистых соединений. В большей степени это касается «негидролизуемого ядра»

и легкогидролизуемого азота. В общей структуре потерь на эти соединения приходится 65 и 26 % соответственно.

Большая часть органического почвенного азота в агрочерноземе представлена негидролизуемыми и трудногидролизуемыми фракциями (таблица 8). На долю трудногидролизуемого азота от Нобщ приходится 89-90 %, трудногидролизуемой фракции – 7 % по вариантам опыта.

Органические формы азота практические недоступны сельскохозяйственным растениям без предварительной минерализации. Только незначительная часть этих соединений (не более 3 %) способна минерализоваться и перейти в доступное состояние для растений. По мнению Г.П. Гамзикова (2013), устойчивость органического азота к минерализации – положительное свойство, приводящее к консервированию запаса элемента и предотвращению его непроизводительного расхода. Фракцию трудногидролизуемых соединений азота составляет азот гуминовых и фульвокислот, связанный с подвижными полуторными оксидами, неспецифические органические вещества и фиксированный аммоний. Азот легкогидролизуемый – основной резерв доступного азота для растений и является ближайшим резервом для минерализации. Доступность растениям азота этой фракции определяется интенсивностью биологических процессов в почве. Содержание и амплитуда колебаний легкогидролизуемого азота отражают культурное состояние почвы и в первую очередь – связь с агрофоном (Кураченко и др., 2020).

Исследования показали, что применение биопрепаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* достоверно влияет на содержание органических форм азота ($p = 0,0000-0,0190$) (Абакумова, Назаренко, 2022). В почве контрольного варианта содержание трудногидролизуемого азота в период кушения яровой пшеницы оценивалось на уровне 284 мг/кг (прил. 5). К моменту созревания культуры отмечено увеличение этой формы азота на 21 мг/кг, что обусловлено процессами трансформации органического вещества, поступающего в почву в результате постепенного отмирания корней и надземной фитомассы. Подобная

закономерность в динамике трудногидролизуемого азота выявлена практически на всех вариантах опыта. Исключение составляют варианты, где применялась обработка посевов пшеницы суспензией *Chlorella vulgaris* по всходам и в период кущения и двух и трёхкратная обработка термически обработанной хлореллой. Содержание трудногидролизуемой фракции азота к уборке культуры здесь снижается до 263-284 мг/кг.

Агрочернозем опытного поля характеризуется средней обеспеченностью легкогидролизуемым азотом. Срок определения легкогидролизуемого азота достоверно не влияет на его концентрацию ($p = 0,7044$). Так, в почве контрольного варианта отмечается средняя обеспеченность Нлг (144-148 мг/кг). Обработка вегетирующих растений яровой пшеницы в фазу всходов и кущения определяет существенное пополнение почвы легкогидролизуемым азотом. В июльский период отмечено накопление легкогидролизуемого азота при применении культуры *Chlorella vulgaris* до 153-160 мг/кг, термически обработанной культуры *Chlorella vulgaris* до 169-186 мг/кг. Заметные изменения в содержание легкогидролизуемого азота отмечены на варианте с термически обработанным препаратом и в период молочной спелости пшеницы, что является подтверждением пополнения запаса мобильных соединений органического азота.

Оценка среднесезонных значений содержания гидролизуемых форм азота показала, что применение препаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* в технологии возделывания яровой пшеницы снижает обеспеченность агрочернозема трудногидролизуемой формой азота на 3-26 мг/кг. В отношении легкогидролизуемой формы отмечается накопление по сравнению с контролем на 2-28 мг/кг. Максимальное количество Нтг отмечено в агрочерноземе при обработке пшеницы препаратами по всходам и кущению (268 и 282 мг/кг соответственно). Наибольшая концентрация легкогидролизуемого азота выявлена на вариантах с применением трёхкратной обработки пшеницы препаратами. Суспензия культуры *Chlorella vulgaris*, а также термически обработанный аналог обеспечивает повышенное содержание Нлг в агрочерноземе (161 и 174 мг/кг).

Исследованиями установлено изменение соотношения между азотом органических фракций. Для агрочернозема глинисто-иллювиального типичного характерно преобладание трудногидролизуемой формы азота над легкогидролизуемой. В почве контрольного варианта оно составляет 0,50. Установлено, что обработка посевов биопрепаратами определяет повышение подвижности органического азота, что отразилось на отношении $N_{lg}: N_{tg}$ (0,53-0,57). Корреляционный анализ подтвердил прямую среднюю зависимость между гидролизуемыми формами азота ($r = 0,39$).

Полученные результаты позволяют утверждать, что применение препаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* в технологии возделывания яровой пшеницы изменяет состав органического азота и приводит увеличению запасов фракций гидролизуемых форм азота. Наиболее эффективным приёмом является опрыскивание растений яровой пшеницы термически обработанной *Chlorella vulgaris* в период всходов, кущения и колошения яровой пшеницы. Такой приём существенно пополняет содержание легкогидролизуемого азота как источника минеральных форм.

Содержание углерода и азота в почве рассматриваются как наиболее важные элементы, дающие представления о накоплении органического вещества. При этом отношение $C: N$ является показателем, отражающим специфику органического вещества почв и агрономическую ценность гумуса (Ерёмин, 2016; Дубас и др., 2024). Анализ экспериментальных данных показывает, что при средней обеспеченности гумуса агрочерноземов Красноярской лесостепи азотом отмечается уменьшение соотношения углерода к азоту при применении в технологии возделывания яровой пшеницы биопрепаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* (рисунок 32). Уменьшение значений показателя $C: N$ на 0,2-0,5 ед. по отношению к контрольному варианту свидетельствует об увеличении содержания общего азота в гумусе почвы и усилении минерализации органического вещества. Исследованиями В.В. Чупровой (1997) доказано, что изменение соотношения $C: N$ в черноземах сопряжено с изменением содержания в

них гуминовых кислот как соединений, богатых углеродом. Автором установлена закономерность – чем шире соотношение углерода к азоту, тем больше гуминовых кислот содержится в гумусе.

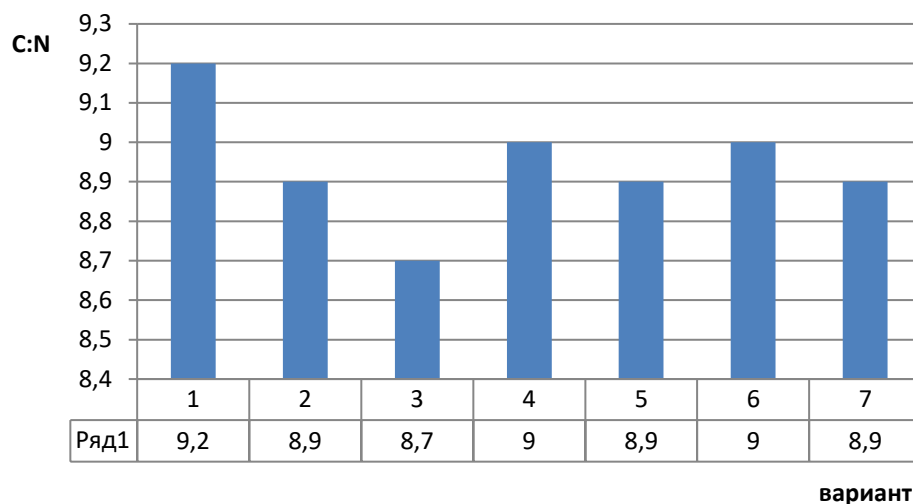


Рисунок 32 – Отношение C: Nв агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. Фон + суспензия *C. vulgaris* (1-кратная); 3. Фон + суспензия *C. vulgaris* (2-х-кратная); 4. Фон + суспензия *C. vulgaris* (3-х-кратная); 5. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (1-кратная); 6. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (2-х-кратная); 7. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (3-х-кратная)

Для оценки текущего состояния эффективного плодородия почв и направленности его изменений под влиянием агротехнических приёмов актуальны исследования, отражающие обеспеченность почвы доступными элементами питания. Одним из определяющих факторов устойчивого функционирования агроэкосистем в земледелии является создание оптимальных условий потребления сельскохозяйственными культурами азота, находящегося в первом минимуме. Регулирование содержания минеральных соединений азота в почвах осуществляется за счет применения органических и минеральных удобрений, приёмов биологизации земледелия (Пути сохранения..., 2020).

При физиологической равноценности в питании растений аммонийной и нитратной формы азота в условиях земледельческой зоны Красноярского края установлено преимущественное использование растениями нитратного азота

(Кураченко, Колесник, 2020), что подтверждается результатами полевых исследований (таблица 9).

Таблица 9 – Содержание элементов питания в агрочерноземе (0-20 см; n = 6)

Вариант	N-NH ₄ мг/кг	N-NO ₃ , мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
Контроль (химическая защита - фон)	9,4	2,5	169,0	238,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	5,1	4,1	145,9	274,1
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	4,4	4,6	181,8	290,7
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	7,3	4,8	167,5	304,5
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	15,2	4,3	162,6	296,9
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	12,4	4,1	148,3	278,2
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	11,5	4,0	171,7	327,8
<i>p</i>	<i>p</i> (вар.) = 0,0000*; <i>p</i> (срок) = 0,0030*; <i>p</i> (взаим.) = 0,0000*	<i>p</i> (вар.) = 0,0000*; <i>p</i> (срок) = 0,0000*; <i>p</i> (взаим.) = 0,1455	<i>p</i> (вар.) = 0,4680; <i>p</i> (срок) = 0,5161; <i>p</i> (взаим.) = 0,2356	<i>p</i> (вар.) = 0,0500*; <i>p</i> (срок) = 0,0244*; <i>p</i> (взаим.) = 0,8557

Очень низкая и низкая обеспеченность агрочернозема нитратным азотом по вариантам опыта свидетельствует о его преимущественном расходе растениями. Данные по определению минеральных форм азота в агрочерноземе на фоне применения биопрепаратов с культурой *Chlorella vulgaris* подтверждают роль микроводорослей в регулировании азотного питания растений. Установлено, что содержание аммонийного азота в среднем за период наблюдений оценивается на уровне средней обеспеченности (9 мг/кг). Применение термически обработанной

суспензии *Chlorella vulgaris* в технологии возделывания яровой пшеницы определяет достоверное накопление аммонийной формы азота в почве до повышенного уровня (12-15 мг/кг; $p = 0,0000$). Существенное увеличение концентрации $N-NH_4$ в пахотном слое агрочернозема отмечается уже в период кушения яровой пшеницы и не зависит от кратности обработки вегетирующих посевов яровой пшеницы (прил. 6). Очень низкая обеспеченность нитратным азотом почвы сохраняется на контрольном варианте в период кушения и молочной спелости яровой пшеницы (2-3 мг/кг; прил.6). Фолиарная обработка вегетирующих посевов пшеницы не зависимо от сроков применения определяет низкую обеспеченность почвы нитратным азотом и увеличение её концентрации по сравнению с контролем в среднем на 2 мг/кг ($p = 0,0000$).

По мнению ряда исследователей, использование микроводорослей повышает доступность для высших растений ряда важных питательных веществ, в том числе фосфора (Базарнова и др., 2018; Goncalves, 2021). На фоне средней обеспеченности агрочернозема контрольного варианта подвижным фосфором (169 мг/кг) достоверных изменений в подвижности фосфатов не произошло. Уровень обеспеченности подвижным P_2O_5 0-20 см слоя почвы по вариантам опыта был в среднем за период наблюдений близок к контролю (148-182 мг/кг; $p = 0,4680$). Тяжелый гранулометрический состав почвообразующих пород земледельческой зоны Красноярского края обуславливает очень высокую обеспеченность агрочерноземов обменным калием в условиях полевого эксперимента (238-328 мг/кг). Использование 1 % раствора суспензии микроводоросли *Chlorella vulgaris* и её термически обработанного аналога на яровой пшенице способствует накоплению обменного калия в почве по сравнению с контрольным вариантом на 36-90 мг/кг ($p = 0,0500$), что обусловлено, по-видимому, усилением мобилизации калия хлореллой и его переходом в более подвижное состояние. Известно, что функционирование черноземов лесостепной зоны Красноярского края происходит в условиях умеренно сухого и континентального климата. Благодаря неравномерности выпадения осадков наблюдается чередование периодов

иссушения почвы и ее увлажнения. Это способствует высвобождению и фиксации калия и, следовательно, сезонной изменчивости в т.ч. и обменного калия (Кураченко, Колесников, 2023). Так установлено, что к периоду молочной спелости яровой пшеницы отмечается достоверное увеличение содержания обменного калия на всех вариантах опыта ($p = 0,0500$; прил. 7) по сравнению с периодом кущения яровой пшеницы. Этот прирост оценивается величиной 33-67 мг/кг. Максимальный уровень накопления обменного калия в почве под влиянием микроводорослей установлен в случае трёхкратной обработки посевов яровой пшеницы 1 % раствором *Chlorella vulgaris* и её термически обработанного аналога (305-328 мг/кг). Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что препараты на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* способны регулировать азотный фонд агрочерноземов и обеспеченность их минеральным азотом и обменным калием.

5.4 Биологическая активность почвы

Биологическая активность рассматривается как совокупность биологических процессов, протекающих в почве. Основными составляющими биологической активности являются интенсивность дыхания почвы, а также активность гидролитических ферментов уреазы и протеазы и окислительного фермента каталазы (Звягинцев, 1978; Киреева, 1994). Смена естественных природных экосистем на агроценозы запускает ряд негативных экологических последствий, в частности, к увеличению эмиссионных потоков углекислого газа. Сельскохозяйственные угодья рассматриваются как значительные источники двуокиси углерода (CO_2) – парникового газа, рост концентрации которого в атмосфере Земли приводит к усилению парникового эффекта и глобальному потеплению (Ишханов и др., 2011). В настоящее время активно развиваются технологии по снижению выбросов углерода в сельском хозяйстве. Они предполагают применение восстановительного земледелия, в результате которого

предпринимаются меры по сохранению запасов углерода в почве путём нулевой или минимальной обработки почвы, и использования агрокультур с мощной корневой системой (Столбовой, 2020). Согласно прогнозам, благодаря изучению органического земледелия и поддержанию восстанавливающего потенциала почв, в скором времени доля потребляемых минеральных удобрений будет снижаться (Боинчан, 2013). Таким образом, появляется возможность управления балансом углерода в сельском хозяйстве, что, с учётом большой площади сельскохозяйственных угодий в Российской Федерации, может внести ощутимый вклад в уменьшение выбросов углекислого газа в атмосферу на национальном уровне. Информация об интенсивности выделения CO_2 необходима для выбора стратегии развития сельского хозяйства, экологической направленности, разработки оптимальных систем обработки почв, применения удобрений и построения рациональных севооборотов, всего комплекса агротехнических мероприятий, способствующих уменьшению выделения парниковых газов из почв сельскохозяйственного использования без снижения урожайности культур (Лукин, 2015).

Интенсивность газообразных потерь углерода из почв агроландшафтов обусловлена, с одной стороны, особенностями агротехники (Кураченко, Бопп, 2016), с другой, экологическими факторами, основные из которых температура и влажность (Курганова и др., 2007). Динамика дыхания почв в агроценозах непостоянна и зависит от биологических особенностей выращиваемой культуры и прочих агротехнических условий. Подъёмы и спады интенсивности дыхания почвы обуславливаются усилением или ослаблением микробиологической активности, которая зависит от гидротермических условий и поступления в почву свежего органического вещества. Определение потенциальной активности дыхания агрочернозема показывает, что максимальное дыхание почвы ($5,3 \text{ мгCO}_2/10\text{г}$) отмечается в период кущения пшеницы на контрольном варианте (прил. 8). Однократная обработка посевов по всходам препаратами с культурой *Chlorella vulgaris* к периоду кущения достоверно снижает интенсивность дыхания почвы на

1-2 мгСО₂/10г (Абакумова, Коваль, 2022). Интенсивность дыхания агрочернозема к периоду созревания яровой пшеницы была меньшей и не превышает 4,5 мгСО₂/10г. Установлено, что двух- и трёхкратная обработка вегетирующих посевов яровой пшеницы термически обработанной суспензией *Chlorella vulgaris* влияет на усиление потенциального дыхания почвы (4,2-4,5 мгСО₂/10г).

Средние значения потенциальной эмиссии углекислого газа агрочернозёма в посевах яровой пшеницы показывают тенденцию увеличения интенсивности дыхания на вариантах с трёхкратной обработкой вегетирующих растений суспензией *Chlorella vulgaris*, а также двух- и трёхкратным опрыскиванием термически обработанной *Chlorella vulgaris* (рисунок 33). Потенциальная интенсивность дыхания почвы в среднем на этих вариантах составляет 4,2-4,4 мгСО₂/10г, что является фактом усиления биологической активности почвы.

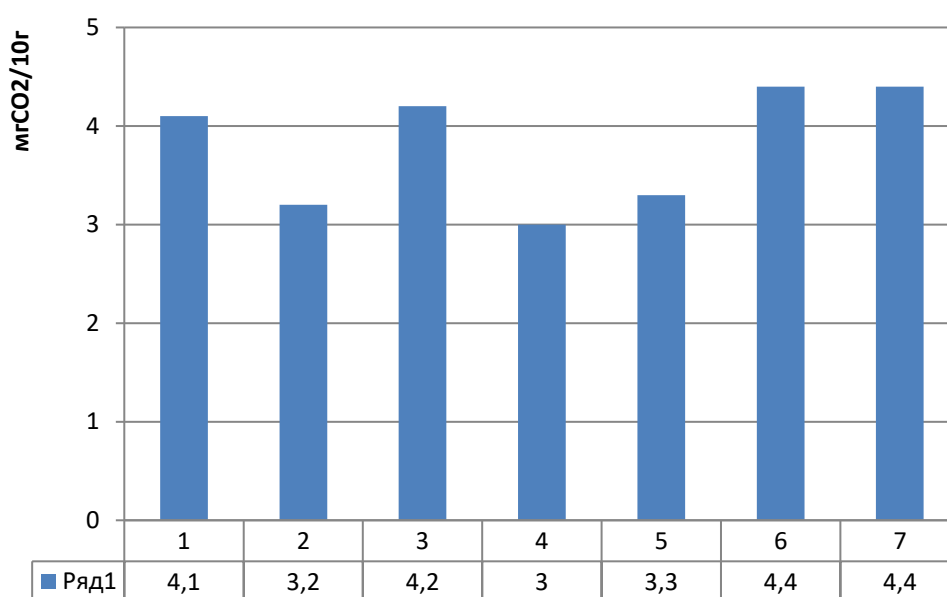


Рисунок 33 – Потенциальная интенсивность дыхания агрочернозема (мгСО₂/10г) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. Фон + суспензия *C. vulgaris* (1-кратная); 3. Фон + суспензия *C. vulgaris* (2-х-кратная); 4. Фон + суспензия *C. vulgaris* (3-х-кратная); 5. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (1-кратная); 6. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (2-х-кратная); 7. Фон + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (3-х-кратная) (p (вар.) = 0,0010; p (срок) = 0,0000; p (взаим.) = 0,1744)

Агрогенное воздействие на почву при поступлении средств защиты растений, минеральных удобрений и стимуляторов роста является фактором, оказывающим существенное влияние на её биотические компоненты (Попов, Матюгин, 2021). При этом существенно изменяются механизмы ферментативного уровня почв (Наими, 2019). Почвенные ферменты, являясь продуктами метаболизма почвенного биогеоценоза, образуются в результате жизнедеятельности высших зелёных растений, почвенных животных и микроорганизмов (Наумова и др., 2019). Они выполняют ведущую роль в процессах трансформации органических веществ, превращении труднодоступных форм питательных веществ в легкоусвояемые для растений и являются чувствительными индикаторами на воздействие различных факторов почвообразования, а также изменение условий функционирования агроэкосистем (Алексеева, Фомина, 2014).

По мнению А.В. Косолаповой (2016), ферментам принадлежит особая роль в азотном режиме почв, т.к. трансформация азотсодержащих соединений в почве протекает при непосредственном участии гидролитических ферментов. Известно, что уреазы во многом формируют азотный статус почв, влияют на их обеспеченность доступными формами азота и являются важным диагностическим показателем активности процессов мобилизации азота в почве (Вяль, Шиленков, 2008; Матявина, 2020; Турусов, Гармашова, 2018). Особую актуальность в теоретическом и практическом отношении представляет изучение ферментативной активности почв в связи с использованием в растениеводстве биопрепаратов на основе микроводорослей (Мачнева и др., 2009). *Chlorella vulgaris* – одноклеточные фотосинтезирующие организмы, которые являются продуцентами органического вещества и обладает ценным биохимическим составом (Лукиянов и др., 2018). При этом широкий спектр макро- и микроэлементов отработанной при выращивании микроводорослей культуральной среды обуславливает целесообразность её использования в качестве удобрения (Лукиянов, Стифеев, 2012, 2016). Содержание биологически активных веществ в культуральной среде суспензии хлореллы значительно превышает таковое в

клетках. Кроме того, вещества культуральной среды более доступны для почвенного биоценоза и высших растений. Их максимальное содержание достигается на 7 сутки культивирования. При этом некоторые авторы (Халюткин, Сидельников, 2021) отмечают эффективность температурного стресса для увеличения выхода ценных веществ из клетки.

Исследования показывают, что агрочерноземы в условиях полевого опыта отличаются средней обогащенностью уреазой (14-22 мгNH₄/10г/24ч) (Кураченко, Фомина, Абакумова, 2023). Заметное нарастание активности уреазы, свидетельствующей о способности накопления в почве аммонийного азота ($r = 0,52$) проявляется в первую половину вегетации пшеницы на вариантах опыта с опрыскиванием посевов термически обработанной *Chlorella vulgaris* (прил. 9). На этих вариантах опыта биопрепарат, применяемый по различным фазам развития яровой пшеницы, усиливает активность уреазы до 18 мгNH₄/10г/24ч. Усиление активности уреазы отмечено в почве контрольного варианта в период молочной спелости пшеницы до 22 мгNH₄/10г/24ч, что обусловило снижение обеспеченности легкогидролизуемым азотом до 148 мг/кг ($r = - 0,42$) и повышение обеспеченности аммонийным азотом до 15 мг/кг ($r = 0,58$). Интенсивное потребление аммонийного азота во вторую половину вегетации яровой пшеницы (Кураченко, Колесник, 2020) и обработка вегетирующих посевов *Chlorella vulgaris* сопровождается снижением уреазной активности в этот период до 14-21 мгNH₄/10г/24ч, что на 1-8 мгNH₄/10г/24ч меньше по сравнению с контролем. Трёхкратная обработка посевов пшеницы термически обработанной *Chlorella vulgaris* повышает активность фермента до 21 мгNH₄/10г/24ч. В среднем за период наблюдений за активностью уреазы, приходящейся на кущение и молочную спелость яровой пшеницы установлено снижение активности уреазы по сравнению с контрольным вариантом на 3-0,1 мгNH₄/10г/24ч (таблица 10). Ингибирующее действие биопрепаратов, по-видимому, обусловлено фотосинтезирующей активностью хлореллы, т.к. для процесса фотосинтеза требуется вода, углекислый газ и небольшое количество элементов питания (Старовойтов, Халил, 2017). Это подтверждается низкой

обеспеченностью агрочернозема аммонийным азотом на вариантах опыта с применением биопрепаратов (5-9 мг/кг). В целом, к концу вегетационного периода развития яровой пшеницы сезонная активность фермента снижается незначительно что, по мнению Ф.Х. Хазиева и А.Е. Гулько (1991) обусловлено накоплением в почве органических соединений, способствующих не только продуцированию ферментов, но и сохранению их в почве. Выраженные различия в обеспеченности агрочернозема аммонийным азотом на вариантах опыта с двухкратным опрыскиванием посевов яровой пшеницы термически обработанной *Chlorella vulgaris* обнаруживают сильную корреляционную связь с активностью уреазы, проявляющейся в июльский период ($r = 0,62 \dots 0,99$).

Таблица 10 – Ферментативная активность агрочернозема (0-20 см; n = 6)

Вариант	Протеаза, мг аминного азота/10г почвы за 20 часов	Уреаза, мгNH ₄ /10г/24ч	Каталаза, мл 0,1 н KMnO ₄ /г сух. почвы за 20 минут
Контроль (хим. Защита - фон)	4,3	19,2	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	3,5	16,1	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	4,0	17,1	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	3,9	16,8	0,16
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	3,7	18,0	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	4,2	15,9	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	3,4	19,1	0,18
<i>p</i>	p (вар.) = 0,1250; p (срок) = 0,0000*; p (взаим.) = 0,0010*	p (вар.) = 0,0273*; p (срок) = 0,0280*; p (взаим.) = 0,0000*	p (вар.) = 0,0000*; p (срок) = 0,0000*; p (взаим.) = 0,0000*

К периоду кущения яровой пшеницы формируется высокая обеспеченность почвы аммонийным азотом (18 мг/кг) и повышенная легкогидролизуемым (280 мг/кг; $r = 0,39$).

Каталазная активность, по мнению Ф.Х. Хазиева (1982), отражает общий окислительный потенциал почвы и является наиболее чувствительной к агрогенной нагрузке. Этот показатель отражает функциональную активность микроорганизмов в различных экологических условиях (Фомина и др., 2006). Определение каталазы по методу Джонсона и Темпле показывает низкий уровень каталитической активности агрочерноземов в условиях полевого опыта. В среднем за период наблюдений она составляет по вариантам опыта 0,16-0,18 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут ($p = 0,0000$). Установлено, что одно- и двукратная обработка вегетирующих посевов яровой пшеницы биопротекторными препаратами с микроводорослями *Chlorella vulgaris* в период кущения пшеницы сохраняет каталазную активность агрочернозема на уровне контроля или снижает активность на 0,01-0,04 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут. Максимальные темпы снижения приходятся на варианты опыта с применением 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris* (прил. 9). Окислительные процессы в почве и жизнедеятельность почвенных микроорганизмов к периоду созревания яровой пшеницы оцениваются по вариантам опыта на близком уровне (0,18-0,19 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут). Известно, что каталаза в сильной степени коррелирует с уровнем содержания и доступности органического вещества в почве (Зинченко и др., 2017). На вариантах опыта с использованием 1 % раствора суспензии микроводоросли в этот период отмечается существенное снижение обеспеченности почвы Сгумусом. Это позволяет предположить, что снижение каталитической активности агрочернозема на этих вариантах опыта сопряжено с тратами и минерализацией гумусовых веществ. Однако поиск корреляционной зависимости между изучаемыми признаками показывает отсутствие достоверной связи ($r = 0,01-0,02$).

Анализ показателя силы влияния агроэкологических факторов интенсивность потенциального дыхания и активность почвенных ферментов агрочернозема доказывает, что вклад таких агроэкологических факторов как «вариант» опыта и «срок» определения показателей биологической активности оценивается неоднозначно (рисунок 34).

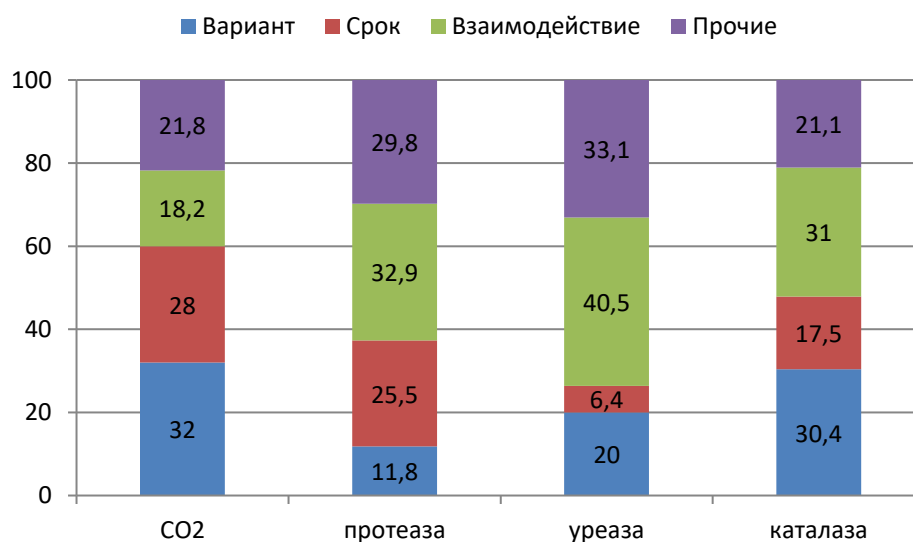


Рисунок 34 - Вклад агроэкологических факторов в формирование биологической активности агрочернозема

Изучаемые препараты и количество обработок посевов яровой пшеницы в наибольшей степени повлияли на интенсивность потенциального дыхания почвы и каталазную активность почвы (32-30 %). Уровень активности гидролитических ферментов протеазы и уреазы на 12-20 % определяется изучаемыми вариантами опыта. Активность уреазы в большей степени обуславливается фактором «взаимодействие» (41 %). Для остальных показателей взаимодействие изучаемых факторов оценивается на уровне 18-33 %.

Таким образом, применение биопрепаратов с термически обработанной *Chlorella vulgaris* определяет тенденцию усиления биологической активности. Интенсивность дыхания почвы в среднем на этих вариантах составляет 4,4 мг СО₂/10г. Максимальная уреазная активность агрочернозема проявляется на вариантах с обработкой вегетирующих посевов биопрепаратом, прошедшим

температурный стресс. К периоду кущения пшеницы при двухкратной обработке она достигала 18 мгNH₄/10г/24ч и обусловила высокую обеспеченность почвы аммонийным азотом (18 мг/кг). При трёхкратной обработке посевов активность уреазы в период молочной спелости пшеницы сохраняется на уровне 21 мгNH₄/10г/24ч.

5.5 Продуктивность яровой пшеницы

Увеличение урожайности в современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур достигается внесением большого количества минеральных удобрений. Удобрения производятся из не возобновляемого источника сырья, а само производство создает значительный вред окружающей среде. Имеющийся недостаток традиционных удобрений – низкая доступность внесенных с ними питательных веществ для растений и быстрое вымывание его из почвы. Концепция безотходной биоэкономики предписывает переход на использование биоудобрений. Одним из наиболее перспективных видов биоудобрений является биомасса микроводорослей *Chlorella vulgaris*. Этот подход обеспечивает, с одной стороны эффективное повышение урожайности сельскохозяйственных культур, а с другой – экономичное использование не возобновляемых ресурсов (Кублановская, 2019).

Формирование структуры урожая сельскохозяйственных культур определяется комплексом факторов, среди которых важную роль играют погодные условия и агротехнологические приёмы (Маслов и др., 2021). Результаты, полученные в ходе предварительного испытания сроков применения биопрепаратов, показали различия в отзывчивости яровой пшеницы на формирование показателей элементов структуры урожая (таблица 11, Абакумова, Кураченко, 2025). Исследованиями установлено, что фолиарная обработка посевов яровой пшеницы в фазу всходов, всходов и кущения дала возможность сформировать хорошо развитую корневую систему, что способствовало

максимальному увеличению продуктивных стеблей до 479-489 шт./м², что больше по сравнению с контролем на 72-82 шт./м² (НСР₀₅ = 32). На этих же вариантах опыта сформировались самые высокие растения (99-103 см).

Таблица 11 – Структура урожая яровой пшеницы, 2021г.

Вариант	Число продуктивных стеблей, шт./м ²	Высота растений, см	Длина главного колоса, см	Количество колосков, шт.	Масса 1000 зерен, гр.
Контроль (химическая защита - фон)	407	96,4	8,1	15,5	32,2
Фон + нативная суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	489	102,8	8,5	16,1	37,5
Фон + нативная суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	479	99,1	8,6	16,3	39,1
Фон + нативная суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	429	97,9	8,5	15,9	34,8
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	411	97,5	8,2	15,5	34,9
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	408	97,9	8,4	15,6	36,6
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	399	98,2	8,3	15,3	35,6
НСР ₀₅	32,3	2,5	0,3	0,6	5,1

Двукратное опрыскивание растений 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* определяет максимальную длину главного колоса (8,6 см), количество колосков колосе (16,3 шт.) и массу 1000 зерен, достигающую 39 гр. Установлено, что термически обработанная *Chlorella vulgaris* не дает преимуществ в формировании элементов структуры урожая пшеницы по сравнению с контрольным вариантом. По результатам исследования влияния суспензии

Chlorella vulgaris на продуктивность яровой пшеницы (рисунок 35), в условиях опыта, было отмечено, что максимальная урожайность зерна яровой пшеницы была установлена на варианте опыта с одно- и двукратной обработкой посевов пшеницы по всходам и кущению суспензией *Chlorella vulgaris* (3,6 т/га).

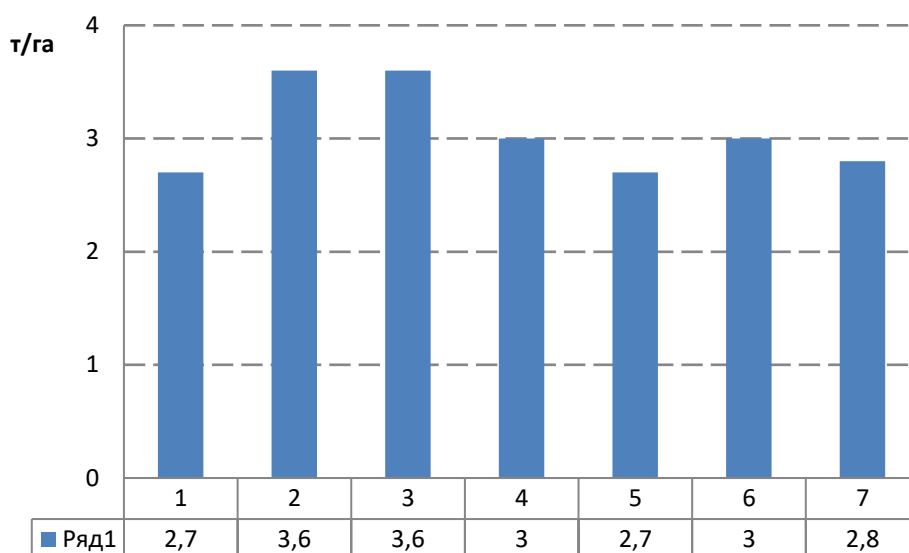


Рисунок 35 – Урожайность яровой пшеницы (т/га) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита); 2. Химическая защита + суспензия *C. vulgaris* (всходы); 3. Химическая защита + суспензия *C. vulgaris* (всходы + кущение); 4. Химическая защита + суспензия *C. vulgaris* (всходы + кущение + колошение); 5. Химическая защита + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (всходы); 6. Химическая защита + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (всходы + кущение); 7. Химическая защита + суспензия *C. vulgaris* термически обработанная (всходы + кущение + колошение), ($p = 0,0023$)

Применение термически обработанной *Chlorella vulgaris* на посевах яровой пшеницы не зависимо от кратности её применения не дает достоверной прибавки в урожайности яровой пшеницы ($НСР_{05} = 0,5$). На этих вариантах опыта получена урожайность, близкая к контрольному варианту (2,7-3,0 т/га).

Матрица парных коэффициентов корреляции показателей агрочернозема и продуктивности яровой пшеницы показывает, что урожайность семян этой культуры в условиях технологии её возделывания с применением средств химической защиты растений и биопрепаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* на 52-72 % сопряжена с запасами продуктивной влаги в почве, содержанием агрономически ценных агрегатов и плотностью сложения

корнеобитаемого слоя (таблица 12). Сильная обратная отрицательная зависимость между урожайностью яровой пшеницы и содержанием в почве углерода гумусовых веществ, трудногидролизуемого и аммонийного азота свидетельствует о роли микроводорослей в проявлении процессов минерализации и аммонификации и формировании азотного режима агрочерноземов ($r = - 0,71 \dots 0,77$). Связь урожайности пшеницы с нитратным азотом оценивается на достоверном среднем уровне ($r = 0,54$).

Таким образом, дополнительное введение в технологию возделывания яровой пшеницы биопрепаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* на фоне их комплексной защиты является эффективным приёмом повышения урожайности культуры и сохранения плодородия агрочерноземов Красноярской лесостепи.

Таблица 12 - Матрица парных коэффициентов корреляции абиотических факторов и урожайности яровой пшеницы
($n = 21$; $r_{05} = 0,413$)

	У	ЗПВ	АЦФ	d	Сгумуса	СН ₂ О	рН	Нообщ	N _{ТГ}	N _{ЛГ}	N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
У	1,000													
ЗПВ	-0,853*	1,000												
АЦФ	0,723*	-0,853*	1,000											
d	-0,849*	0,934*	-0,658*	1,000										
Сгумуса	-0,707*	0,804*	-0,379	0,909*	1,000									
СН ₂ О	0,032	0,175	0,263	0,347	0,579*	1,000								
рН	0,688*	-0,680*	0,314	-0,785*	-0,833*	-0,674*	1,000							
Нообщ	-0,093	-0,293	0,587*	-0,025	0,153	0,356	-0,392	1,000						
N _{ТГ}	-0,772*	0,784*	-0,643*	0,772*	0,641*	-0,012	-0,498*	-0,127	1,000					
N _{ЛГ}	-0,193	0,101	0,346	0,339	0,541*	0,796*	-0,744*	0,752*	0,214	1,000				
N-NH ₄	-0,768*	0,661*	-0,632*	0,623*	0,427*	0,121	-0,739*	0,134	0,612*	0,352	1,000			
N-NO ₃	0,538*	-0,669*	0,654*	-0,452*	-0,469*	0,202	0,164	0,495*	-0,546*	0,294	-0,171	1,000		
P ₂ O ₅	-0,218	-0,213	0,240	-0,088	-0,040	-0,375	0,122	0,525*	-0,189	-0,074	-0,188	0,039	1,000	
K ₂ O	0,076	-0,403	0,620*	-0,135	-0,032	0,359	-0,300	0,917*	-0,131	0,756*	0,175	0,720*	0,256	1,000

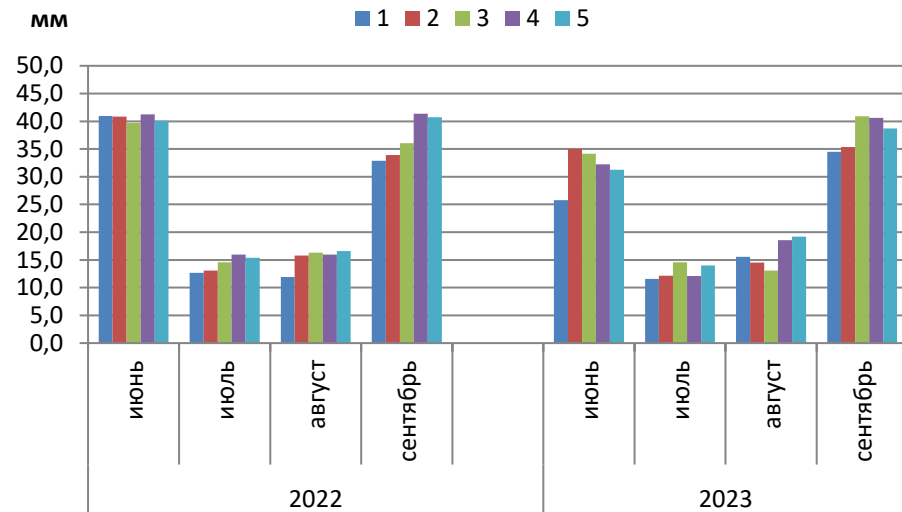
ГЛАВА 6 АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ФОРМ БИОПРЕПАРАТОВ НА СИСТЕМУ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ

6.1 Агрофизические свойства

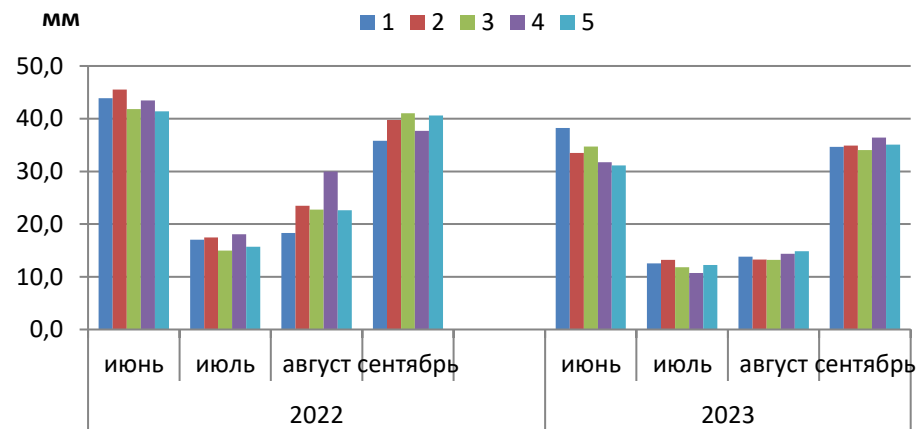
Использование биопрепаратов на основе микроводорослей и цианобактерий в технологии возделывания сельскохозяйственных культур основано на их способности обогащать почву макро- и микроэлементами, определять накопление органических и минеральных форм азота, повышать водоудерживающую способность корнеобитаемого слоя, выделять биологически активные вещества, оказывать стимулирующее действие на рост и развитие растений, пополнять микрофлору в почвах и т.д. (Михеева, 2018; Schreiber et al., 2018). По мнению А.А. Кублановской с соавт. (2019), применение микроводорослей в качестве биоудобрений имеет благоприятные перспективы. При этом широкое применение микроводорослей в качестве удобрений сдерживается недостатком знаний о влиянии микроводорослей и их форм на ключевые характеристики почвы.

Почвенная влага как физическая система является одним из важнейших факторов функционирования сельскохозяйственных культур (Шарипова, 2024). Важным фактором, способствующим повышению влагообеспеченности сельскохозяйственных культур, являются различные агроприемы, в т.ч. и внесение в почву биопрепаратов органического происхождения.

По А.А. Роде (1965), водный режим почвы – это совокупность физических процессов, вызывающих изменение количества воды в почвах во времени и в пространстве. Он определяется метеорологическими условиями, рельефом местности, свойствами почвы, особенностями растительного покрова и агротехническими приёмами возделывания сельскохозяйственных культур. Запасы продуктивной влаги, накопленные в агрочерноземе под посевами яровой пшеницы, имеют схожую сезонную динамику по годам исследований (рисунок 36).



А



Б

Рисунок 36 - Динамика запасов продуктивной влаги (мм) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Хорошая и удовлетворительная влагообеспеченность 0-20 см слоя агрочернозема (26-41 мм) в период всходов и полной спелости яровой пшеницы обусловлена осадками осенне-зимнего и осеннего периодов. Расходование значительного количества воды в период активного роста растений яровой пшеницы совпадает с дефицитом осадков в июне-июле 2022 и 2023 гг., что привело к существенному снижению запасов продуктивной влаги до 31-11 мм по вариантам опыта и свидетельствует об удовлетворительной и плохой влагообеспеченности

почвы. Схожий характер сезонной динамики запасов продуктивной влаги отмечается и в подпахотном 20-40 см слое. Анализ динамики запасов продуктивной влаги по вариантам опыта показывает, что применение биопрепаратов на основе микроводорослей в виде обработки вегетирующих растений яровой пшеницы 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* или внесения гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в почву при посеве яровой пшеницы, благоприятно сказывается на сохранении доступной для растений влаги в почве. В наибольшей степени эта закономерность проявляется для поверхностного 0-20 см слоя почвы. Так, в острозасушливый вегетационный сезон 2023 года во все месяцы отмечается увеличение запасов продуктивной влаги на вариантах с применением биоудобрений по сравнению с контролем.

Расчет среднестатистических показателей запасов продуктивной влаги в агрочерноземе за вегетационные сезоны показывает удовлетворительную влагообеспеченность почвы с высоким и очень высоким уровнем варьирования показателя ($C_v = 34-69\%$) (таблица 13). Лучшие условия увлажнения складываются в вегетационный сезон 2022 года. Для 0-20 см слоя почвы запасы влаги изменяются по вариантам опыта от 25 до 28 мм, 20-40 см слоя – от 29 до 32 мм. Засушливые условия вегетационного сезона 2023 года определяют накопление влаги, не превышающее 26 мм в 0-40 см слое агрочернозема. Установлено, что достоверные изменения в запасах продуктивной влаги под действием биопрепаратов отмечаются в корнеобитаемом 0-20 см слое агрочернозема ($p = 0,0112$). Максимальное увеличение запасов продуктивной влаги на 3-4 мм по сравнению с контролем выявлено в случае применения гранул *Arthrospira platensis* и совместном применении *Chlorella vulgaris* + *Arthrospira platensis*. Эта закономерность проявляется стабильно по годам и свидетельствует о более продуктивном расходовании влаги вегетирующими растениями в присутствии микроводорослей. Для слоя почвы 20-40 см математически не доказывается положительная роль биопрепаратов в регулировании влагозапасов в почве ($p =$

0,3521), в наибольшей степени определяющим фактором здесь является «год» ($p = 0,0000$).

Таблица 13 – Статистические показатели запасов продуктивной влаги в агрочерноземе, мм

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	$X_{ср}$	$C_v, \%$	$X_{ср}$	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	24,6	59	23,3	57
<i>C. vulgaris</i> (1 % раствор)	25,9	53	24,3	52
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	26,7	49	23,9	69
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы);	28,6	46	25,9	50
<i>A. platensis</i> (гранулы)	28,2	50	25,8	43
$p A = 0,0112^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0032^*$				
20-40 см				
Контроль	28,8	49	24,8	54
<i>C. vulgaris</i> (1 % раствор)	30,3	37	23,7	51
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	30,1	45	23,4	54
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы);	32,3	34	23,3	55
<i>A. platensis</i> (гранулы)	30,1	43	23,3	49
$p A = 0,3521$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,1889$				

Оценка запасов продуктивной влаги в агрочерноземе за период наблюдений отражает положительную роль биопрепаратов на основе микроводорослей *Arthrospira platensis*, применяемых в виде гранул только для слоя 0-20 см. На вариантах опыта, где гранулы цианобактерий вносились в почву при посеве яровой пшеницы в чистом виде и в смеси с *Chlorella vulgaris* установлено максимальное накопление запасов продуктивной влаги, достигающее 27 мм в среднем за вегетационные сезоны (рисунок 37).

Таким образом, применение гранул *Arthrospira platensis* при возделывании яровой пшеницы является эффективным приёмом повышения запасов продуктивной влаги в 0-20 см слое почвы. Наличие полисахаридов в составе биомассы спироулины, достигающей 15 %, определяет влагоудерживающую способность этой микроводоросли. Известно, что полисахариды являются

суперабсорбирующими гидрогелями, способными удерживать количество воды, во много раз превышающее их по массе, что позволяет постепенно отдавать влагу растениям (Максимова, 2023).

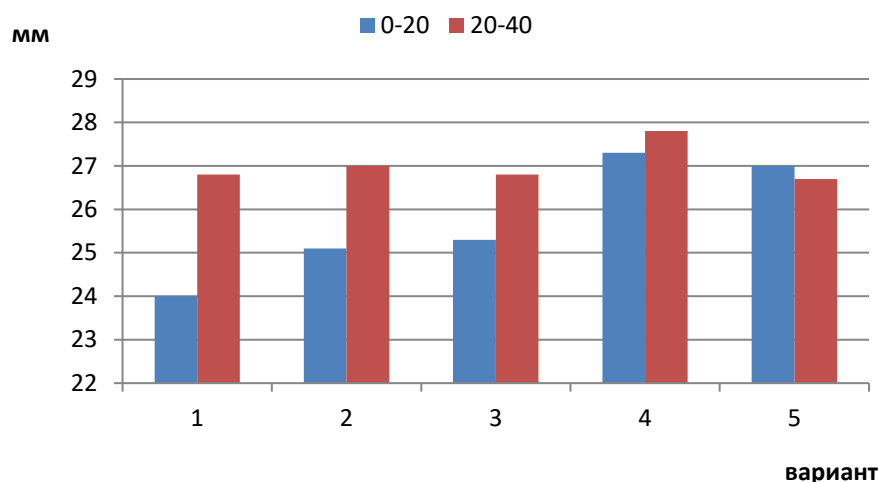
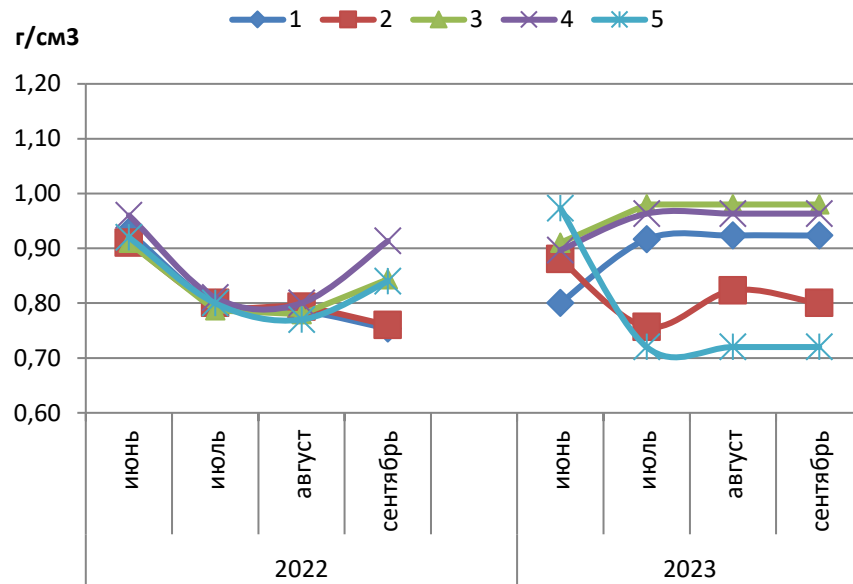


Рисунок 37 - Запасы продуктивной влаги (мм) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023гг.)

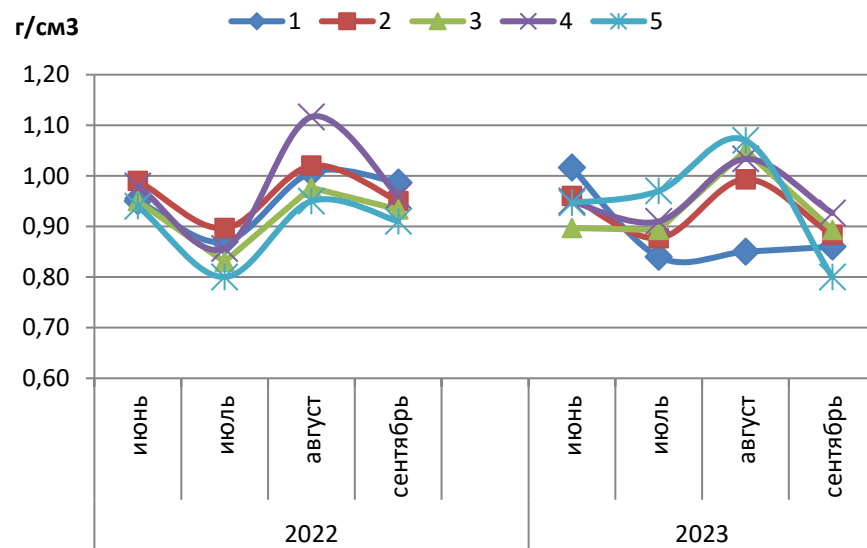
Плотность сложения почвы, являясь одним из важнейших показателей агрофизического состояния почв, весьма динамична во времени и в пространстве (Методические принципы..., 2017). Различный характер динамики плотности почвы под сельскохозяйственными культурами обусловлен уровнем их увлажнения, интенсивностью механических воздействий и напряженностью биологических процессов (Кураченко, 2013).

Исследованиями установлено, что сезонный ритм плотности сложения агрочернозема имеет различия по годам исследований (рисунок 38). В вегетационный сезон 2022 года при рыхлом сложении агрочернозема в 0-20 см слое по всем вариантам опыта отмечается постепенное снижение показателя к периоду молочной спелости яровой пшеницы (0,96-0,77 г/см³), сопряженное с влажностью почвы ($r = 0,481$). К уборке культуры на вариантах с внесением в почву гранул происходит увеличение плотности почвы до 0,84-0,91 г/см³ (Абакумова, Варганова, Дымченко, 2023). В подпахотном 20-40 см слое плотность агрочернозема на

контроле и на вариантах с применением микроводорослей имеет схожую динамику, но различные количественные оценка показателя. Почва отличается рыхлым и нормальным сложением в течение вегетационного сезона (0,94-1,12 г/см³).



А



Б

Рисунок 38 - Динамика плотности сложения (г/см³) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

В засушливый вегетационный сезон 2023 года динамические изменения плотности сложения почвы определялись применяемыми в опыте биопрепаратами. Ход сезонной динамики на контроле и с применением гранул *Chlorella vulgaris* и совместного применения *Chlorella vulgaris* + *Arthrospira platensis* характеризуется постепенным повышением плотности почвы до 0,90-0,96 г/см³ и далее стабильным состоянием показателя в течение вегетационного сезона. Фолиарная обработка вегетирующих посевов яровой пшеницы 1 % раствором *Chlorella vulgaris* и внесение в почву гранул *Arthrospira platensis* определяет снижение плотности почвы до 0,82-0,72 г/см³. В подпахотном слое отмечается схожая динамика с вегетационным сезоном 2022 года. При этом биопрепараты в виде суспензии и гранул увеличивают плотность сложения почвы в период молочной спелости пшеницы на 0,2 г/см³ по сравнению с контрольным вариантом.

Оценка сезонной динамики плотности сложения агрочернозема показывает незначительное и небольшое варьирование показателя ($C_v = 3-17\%$) (таблица 14). Установлено, что при рыхлом и нормальном сложении агрочернозема применяемые биопрепараты оказывают достоверное влияние на его плотность только в 0-20 см слое ($p = 0,0000$). Достоверные различия по плотности сложения установлены для фактора «год» и «взаимодействие» ($p = 0,011$).

Достоверное повышение плотности почвы на 0,05-0,06 г/см³ в пахотном и на 0,03-0,07 г/см³ подпахотном слое по сравнению с контролем стабильно проявлялось по годам исследований при внесении гранул *Chlorella vulgaris* + *Arthrospira platensis*. Это аддитивное влияние вероятно связано с повышенным содержанием экзополисахаридов, изменением порового пространства в связи с очагами развития микроводорослей и повышенной водоудерживающей способностью альгализированных почв. Обработка вегетирующих посевов суспензией *Chlorella vulgaris* сохраняет или снижает плотность сложения почвы по сравнению с контрольным вариантом, что соответствует данным исследований полевого опыта 2021 года.

Таблица 14 – Статистические показатели плотности сложения агрочернозема, г/см³

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	0,82	10	0,89	7
<i>C. vulgaris</i> (1 % раствор)	0,82	9	0,82	6
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	0,83	7	0,96	4
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы);	0,87	9	0,95	3
<i>A. platensis</i> (гранулы)	0,83	8	0,78	17
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0011^*$; $p AB = 0,0011^*$				
20-40 см				
Контроль	0,95	6	0,89	9
<i>C. vulgaris</i> (1 % раствор)	0,96	5	0,93	6
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	0,92	7	0,93	9
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы);	0,98	11	0,96	5
<i>A. platensis</i> (гранулы)	0,90	8	0,95	12
$p A = 0,4625$; $p B = 0,4789$; $p AB = 0,3596$				

Оценка плотности сложения агрочернозема в условиях полевого опыта показывает неоднозначное влияние биопрепаратов с микроводорослями на величину этого агрофизического параметра (рисунок 39). В среднем за период наблюдений применение суспензии *Chlorella vulgaris* и гранул *Arthrospira platensis* достоверно снижает плотность 0-20 см слоя почвы на 0,04-0,05 г/см³ по сравнению с контролем. Гранулы *Chlorella vulgaris* и их сочетание с *Arthrospira platensis* увеличивают показатель на 0,04-0,05 г/см³.

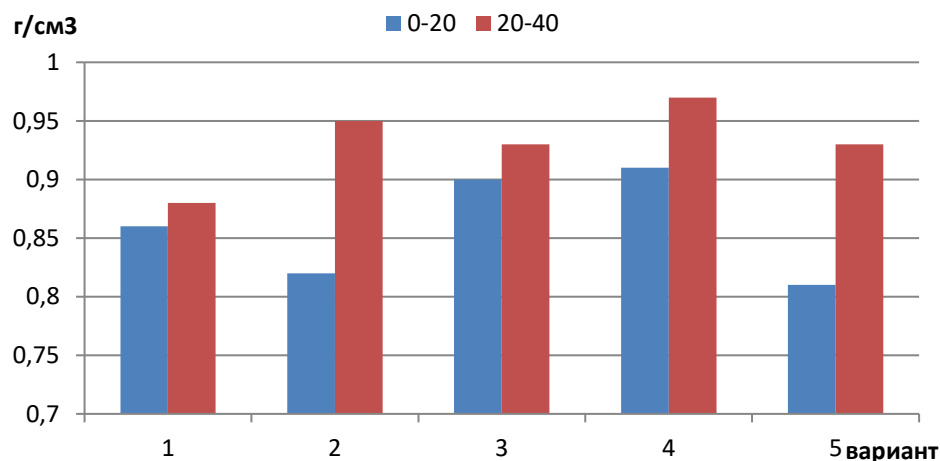
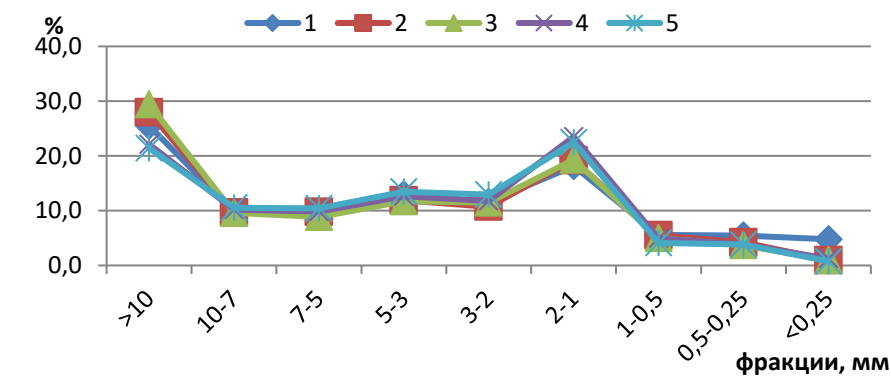
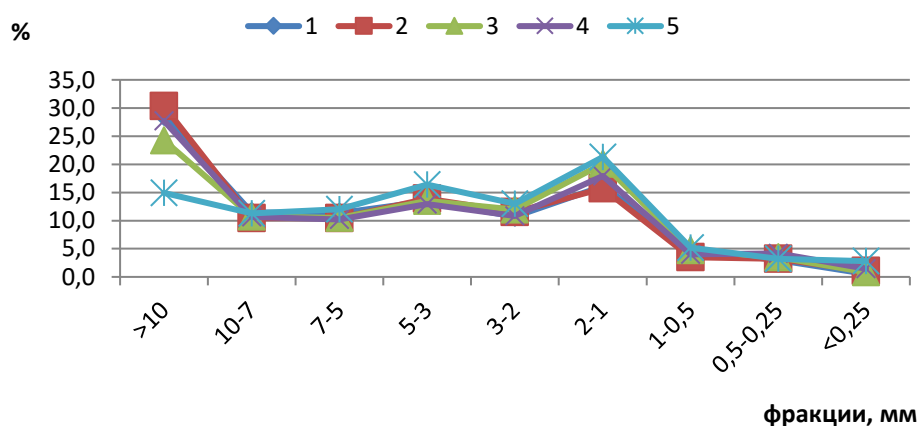


Рисунок 39 - Плотность сложения агрочернозема (г/см³) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы); 2022-2023гг.

С агроэкологической точки зрения такие результаты являются подтверждением различной роли форм биопрепаратов в стимулировании ростовых процессов у яровой пшеницы. Известно, что плотность сложения напрямую связана с деятельностью корневой системы растений и её плотностью при прочих равных условиях. Корневая система растений – это динамический орган, модулируемый сигналами окружающей среды. Параметры ризосферы определяются доступностью воды и питательных веществ, наличием почвенного воздуха, кислорода в нем и другими факторами (Иванов и др., 2022). Структурные отделности почв выполняют важную функцию, т.к. с ними связано протекание физико-химических процессов, развитие корневых систем растений и поглощение корнями элементов питания (Кураченко, 2013). Как показали исследования, в структурном составе агрочерноземов при возделывании яровой пшеницы с применением микроводорослей имеются свои особенности. Но общим для всех вариантов является заметная глыбистость (15-30 %) почвы и господство мелкозернистой и мелкокомковатой фракции размером 2-1 мм (16-23 %) (рисунок 40). Фракции размером от 10 до 2 мм практически равномерно распределены в 0-40 см слое почвенной массы (10-16 %).



А



Б

Рисунок 40 – Фракционный состав структуры агрочернозема, % (А – 0–20 см; Б – 20–40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы); 2022–2023 гг. (n = 24)

Оценка фракционного состава структуры, выполненная в среднем за весь период наблюдений, показывает, что внесение в почву гранул *Arthrospira platensis* и *Chlorella vulgaris* совместно с *Arthrospira platensis* снижает глыбистость 0–20 см слоя агрочернозема на 5 % и повышает содержание агрономически ценных агрегатов 2–1 мм на 4 %. В подпахотном 20–40 см слое почвы существенные изменения фракционного состава отмечаются на варианте опыта с гранулами *Arthrospira platensis*. Здесь установлено снижение содержания крупных агрегатов > 10 мм почвы на 13 % по сравнению с контрольным вариантом, максимальное количество агрономически ценных фракций размером 7–5, 5–3, 3–2 и 2–1 мм. Таким образом, биопрепараты на основе микроводорослей *Arthrospira platensis*. Сезонная

динамика содержания агрономически ценных агрегатов агрочернозема размером от 10 до 0,25 мм на контрольном варианте характеризуется заметной устойчивостью в пахотном и подпахотном слоях ($C_v = 3-11\%$) и схожим характером по годам исследований (рисунок 41, таблица 14).

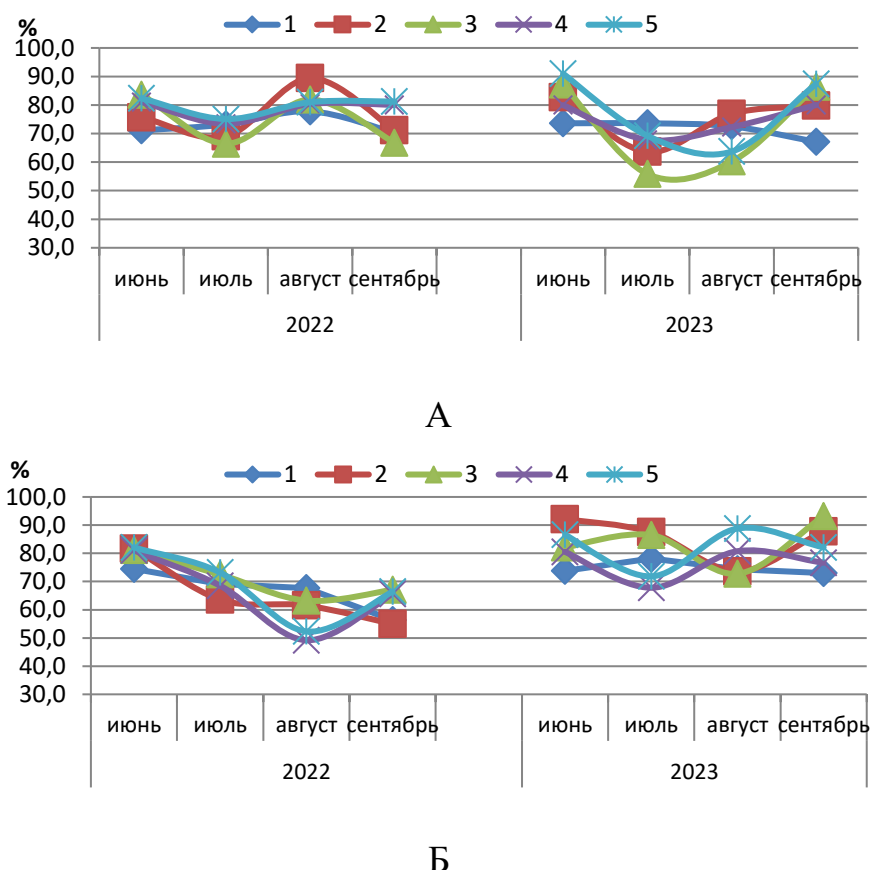


Рисунок 41 - Динамика содержания агрономически ценных фракций в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

На фоне отличной и хорошей оструктуренности почвы отмечается постепенное снижение содержания агрономически ценных агрегатов к периоду уборки культуры. Изменение фракционного состава структуры агрочернозема под действием биопрепаратов отразилось на содержании агрегатов агрономически ценного размера по вариантам опыта в отдельные фазы развития яровой пшеницы. Выявлено, что внесение в почву гранул с микроводорослями *Arthrospira platensis* и *Chlorella vulgaris* + *Arthrospira platensis* определяет схожий характер сезонной динамики АЦФ в агрочерноземе по годам исследований. Она заключается в

снижении содержания агрономически ценных отдельностей к июлю или августу. Применение суспензии *Chlorella vulgaris* на вегетирующих растениях и её поступление в почву при посеве яровой пшеницы также имеет близкую направленность с более выраженной динамикой, достигающей 23 %.

Решающее влияние на сезонную динамику структурного состояния почв играет режим увлажнения и иссушения почвы. Анализ экспериментальных данных показывает, что для условий корнеобитаемого 0-20 см слоя агрочернозема связь влажности почвы с содержанием АЦФ размером от 10 до 0,25 мм оценивается достоверной средней величиной ($r = 0,41$) и описывается полиномом 2-й степени (рисунок 42).

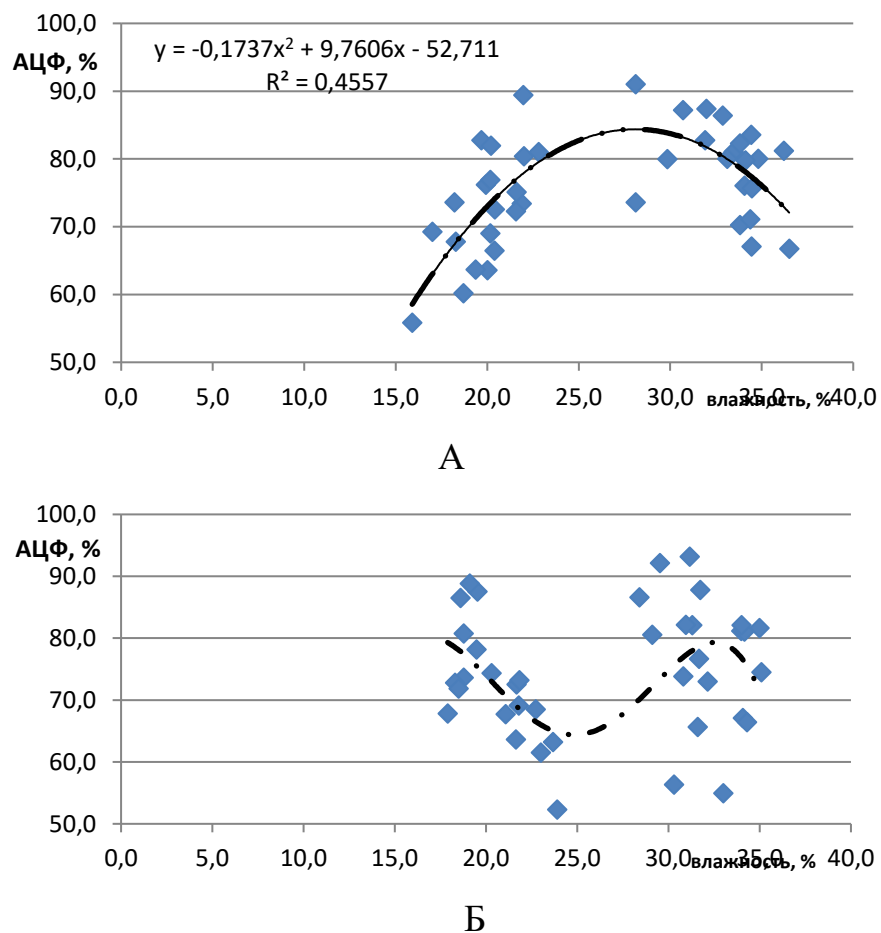


Рисунок 42 – Результаты корреляционного анализа влияния влажности на содержание агрономически ценных фракций в агрочерноземе: А – 0-20 см; Б – 20-40 см ($r_{05} = 0,33$; $n = 40$)

В интервале влажности от 15 до 23 % отмечается рост содержания агрономически ценных агрегатов до 89 %. Повышение влажности почвы до 37 %

усиливает глыбообразование в агрочерноземе, что приводит к снижению содержания АЦФ. В слое 20-40 см влажность не оказывает значимого влияния на структурообразование в почве.

Статистические показатели содержания агрономически ценных фракций в агрочерноземе позволяют его оценить как отлично оструктуренный с содержанием АЦФ, варьирующем по вариантам опыта в 0-20 см слое от 71 до 78 % (таблица 15). В подпахотном 20-40 см слое размах варьирования содержания АЦФ по годам исследований более широкий – от хорошей до отличной оструктуренности (65-84 %).

Таблица 15 – Статистические показатели содержания агрономически ценных фракций в агрочерноземе, %

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	<i>X_{ср}</i>	<i>C_v</i> , %	<i>X_{ср}</i>	<i>C_v</i> , %
0-20 см				
Контроль	71,3	7	71,7	4
<i>C. vulgaris</i> (1 % раствор)	76,3	12	75,8	11
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	74,7	12	72,4	23
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы);	78,7	4	75,0	8
<i>A. platensis</i> (гранулы)	79,9	4	77,8	17
$p A = 0,0498^*$; $p B = 0,0050^*$; $p AB = 0,8718$				
20-40 см				
Контроль	66,9	11	74,8	3
<i>C. vulgaris</i> (1 % раствор)	65,4	17	82,3	10
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	70,9	11	83,6	10
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы);	66,1	20	76,4	8
<i>A. platensis</i> (гранулы)	68,5	18	82,3	9
$p A = 0,0401^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,2130$				

Применяемые в опыте биопрепараты на основе микроводорослей определяют повышение АЦФ на достоверно значимую величину по сравнению с контрольным вариантом ($p = 0,0498$) стабильно по годам исследований в верхнем 0-20 см слое агрочернозема. Для подпахотного слоя почвы эта закономерность проявляется только в вегетационный сезон 2023 года. В среднем за период наблюдений увеличение содержания агрономически ценных фракций за счет

альголизации почвы составляет 2-7 % по сравнению с контролем. Максимальное содержание АЦФ отмечается на варианте опыта с внесением гранул *Arthrospira platensis* в почву при посеве яровой пшеницы и достигает 79 % (рисунок 43). Максимальный структурообразующий эффект гранул *Chlorella vulgaris* выявлен для 20-40 см слоя (77 %), что, по-видимому, обусловлено её способностью к миграции и быстрой адаптации к экологическим условиям (Штина, Голлербах, 1976).

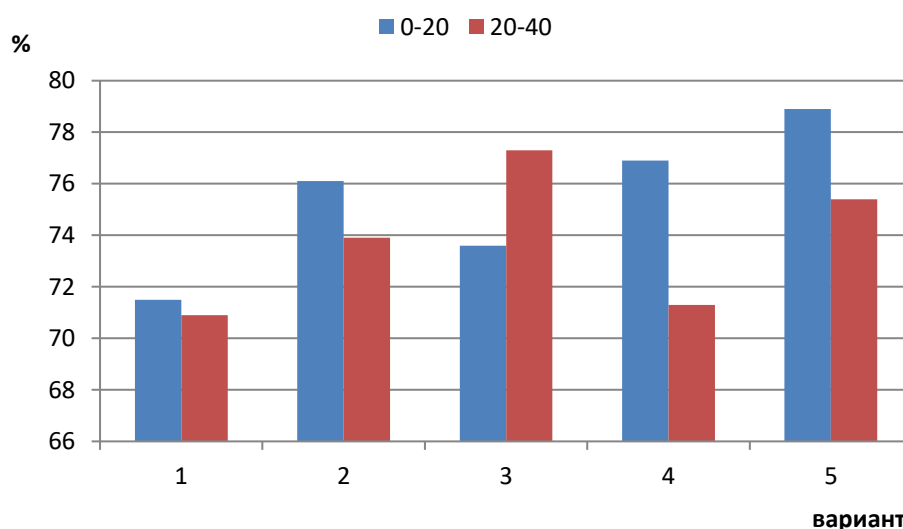


Рисунок 43 - Содержание агрономически ценных фракций (%) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы); 2022-2023гг.

Оценка вклада изучаемых биопрепаратов на основе микроводорослей в формирование агрофизического состояния агрочернозема показывает, что этот биотический фактор в наибольшей степени оказывает влияние на агрофизические показатели почвы в верхнем 0-20 см слое (рисунок 44). Для плотности сложения агрочернозема вклад биопрепаратов оценивается величиной 42 %, в меньшей степени он влияет на запасы продуктивной влаги и структурный состав почвы (27-18 %).

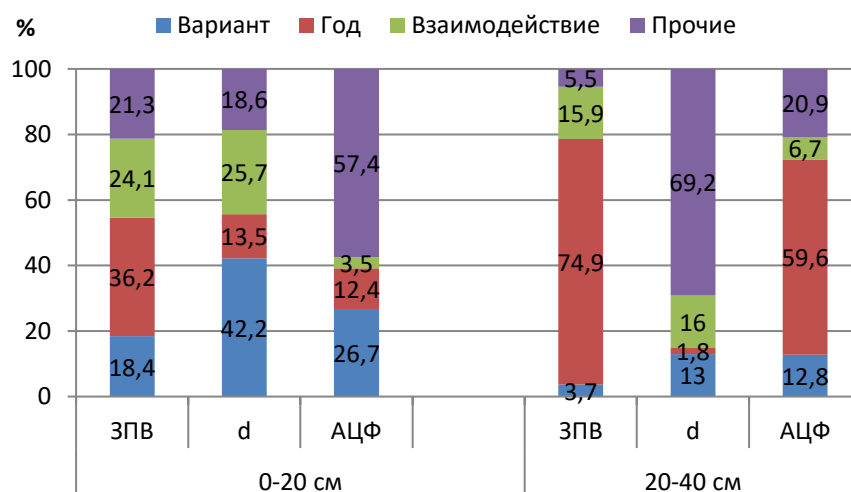


Рисунок 44 - Вклад факторов в формирование агрофизического состояния агрочернозема

Абиотический фактор «год», под которым понимаются погодные условия вегетационных сезонов, на 12-36 % влияет на агрофизическое состояние верхнего 0-20 см слоя агрочернозема. Биопрепараты с микроводорослями в подпахотном слое только на 4-13 % определяют влияние на запасы продуктивной влаги, плотность сложения и структурный состав агрочернозема.

Таким образом, полевые исследования подтверждают, что поддержание оптимального агрофизического состояния агрочерноземов возможно за счет альголизации почвы. Применение в технологии возделывания яровой пшеницы 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris* и гранул микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в чистом виде и в смеси способствует сохранению запасов продуктивной влаги и повышению содержания агрономически ценных фракций в 0-20 см слое агрочернозема.

6.2 Гумусное состояние агрочернозема

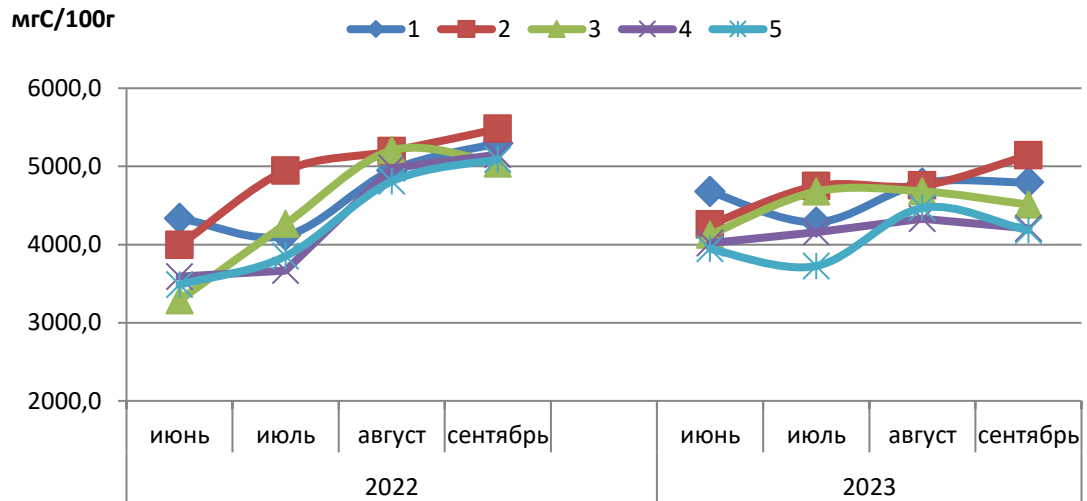
Одной из важнейших задач сельскохозяйственного производства современности является получение стабильных, высоких урожаев экологически чистой продукции при одновременном сохранении, и приумножении, почвенного

плодородия. Наиболее негативным фактором сельскохозяйственного производства, влияющим на плодородие почв, является - дегумификация, возникающая вследствие экстенсивного ведения сельского хозяйства (Современное состояние..., 2012). Содержание, запасы и состав гумуса, являются необходимым условием плодородия почв. Ими определяются многие свойства почв, а также условия питания растений. В пахотных почвах существенное значение в качестве источника гумуса имеют органические удобрения, состав которых очень разнообразен (Кураченко и др., 2008). В настоящее время при складывающемся дефиците органических удобрений (Хасанова и др., 2015) рассматривается возможность применение биопрепаратов на основе культуры микроводорослей с целью регулирования органического вещества и гумусного состояния почв.

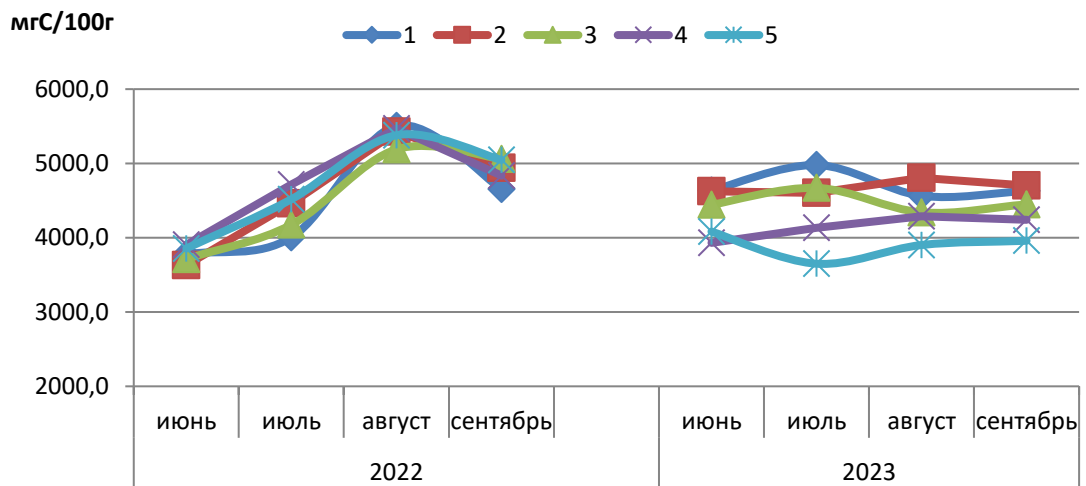
Сезонная и многолетняя динамика содержания гумуса и его подвижных компонентов определяет цикличность процессов гумусообразования (Кураченко, Бопп, 2016) и является одним из самых очевидных показателей жизнедеятельности экосистемы. По мнению В.М. Семёнова, Б.М. Когута (2015), сезонная изменчивость содержания органического углерода в почвах является одним из самых дискуссионных вопросов. В современной научной литературе показан различный характер сезонной динамики органического углерода в почвах (Пономарева, 1974; Носко и др., 2006; Орлова и др., 2006; Когут и др., 2011; Куприченков, 2013; Громовик, 2014; Власенко, 2015; Матюгин, Безуглова, 2023), что затрудняет представление о собственно сезонной изменчивости углерода органического вещества. Многообразие экологических условий функционирования почв, характера их использования, особенностей культур и применяемых технологий являются факторами сезонной динамики углерода органического вещества почв.

Исследованиями установлено, что распределение углерода гумуса в толще агрочернозема указывает на значительную его аккумуляцию в 0-40 см слое. Анализ сезонной динамики Сгумуса в агрочерноземе в период от всходов до уборки яровой

пшеницы показывает его схожую направленность по вариантам опыта, но некоторые отличия в интенсивности динамики по годам исследований (рисунок 45).



А



Б

Рисунок 45 - Динамика содержания Сгумуса (мгС/100г) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C.a vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

В верхней 0-20 см толще почвы отмечено постепенное нарастание гумусовых веществ от всходов до созревания пшеницы. Выявлено, что поступление в почву гранул с микроводорослями при посеве к периоду всходов и цветения пшеницы определяет снижение содержания Сгумуса. Опрыскивание посевов яровой пшеницы суспензией *Chlorella vulgaris* приводит к существенному пополнению содержания гумусовых веществ в течение всего периода вегетации пшеницы.

Ход сезонной динамики углерода гумусовых веществ в подпахотном 20-40 см слое почвы в вегетационный сезон 2022 года несколько иной. Здесь отмечено нарастание Сгумуса от периода всходов до молочной спелости пшеницы по всем вариантам опыта при близких значениях показателя. В послеуборочный период в сентябре выявлен спад содержания углерода гумуса. В вегетационный сезон 2023 года в подпахотном 20-40 см слое агрочернозема при схожей динамике Сгумуса с верхним 0-20 см слоем, установлен более широких размах значения содержания углерода между вариантами опыта.

Таким образом, агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный, функционирующий в посевах яровой пшеницы характеризуется высоким содержанием углерода гумуса в 0-40 см слое. В почве контрольных вариантов содержание общего углерода в 0-20 см слое по годам наблюдений составляет 4674-4634 мгС/100г, что соответствует 8 % гумуса.

Исследованиями установлено, что однократное поступление в почву гранул с микроводорослями при посеве яровой пшеницы определяет снижение содержания Сгумуса в агрочерноземе (таблица 16). Эта тенденция проявляется в слое 0-20 см на вариантах опыта с применением гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в течение двух вегетационных сезонов. Разница в значениях содержания углерода гумуса, определенная в среднем за 2 года исследований составила для этих вариантов опыта по сравнению с контролем 151-460 мгС/100 г

почвы. Это обусловлено усилением биологической активности почвы и процессов минерализации под влиянием биопрепаратов, внесенных в почву.

Таблица 16 – Статистические параметры содержания Сгумуса в агрочерноземе, мгС/100

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	<i>Xcp</i>	<i>Cv</i> , %	<i>Xcp</i>	<i>Cv</i> , %
0-20 см				
Контроль	4673,5	12	4635,9	5
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	4903,3	16	4724,0	8
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	4345,0	20	4498,6	6
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	4178,3	19	4828,3	3
<i>A. platensis</i> (гранулы)	4308,7	18	4080,1	8
$p A = 0,0007^*$; $p B = 0,1100$; $p AB = 0,0006^*$				
20-40 см				
Контроль	4485,5	17	4701,0	4
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	4609,5	17	4684,5	2
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	4480,8	16	4476,0	3
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	4613,8	14	4148,3	4
<i>A. platensis</i> (гранулы)	4700,1	14	3898,6	5
$p A = 0,0005^*$; $p B = 0,0004^*$; $p AB = 0,0000^*$				

Двукратное опрыскивание посевов яровой пшеницы 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* в баковых смесях со средствами защиты растений приводит к существенному пополнению содержания гумусовых веществ. Максимальное накопление, достигающее 4903-4724 мг/100г, отмечено в 2022 и 2023 гг. Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что содержание Сгумуса в слое 0-20 см за период наблюдений достоверно определялось фактором «вариант» опыта ($p = 0,0007$). Этот результат сохраняется и в слое почвы 20-40 см ($p = 0,0005$). На варианте с применением суспензии хлореллы по вегетирующим растениям содержание Сгумуса в среднем за 2 года исследований было на 53,7 мг/100 г больше по сравнению с контрольным вариантом (рисунок 46).

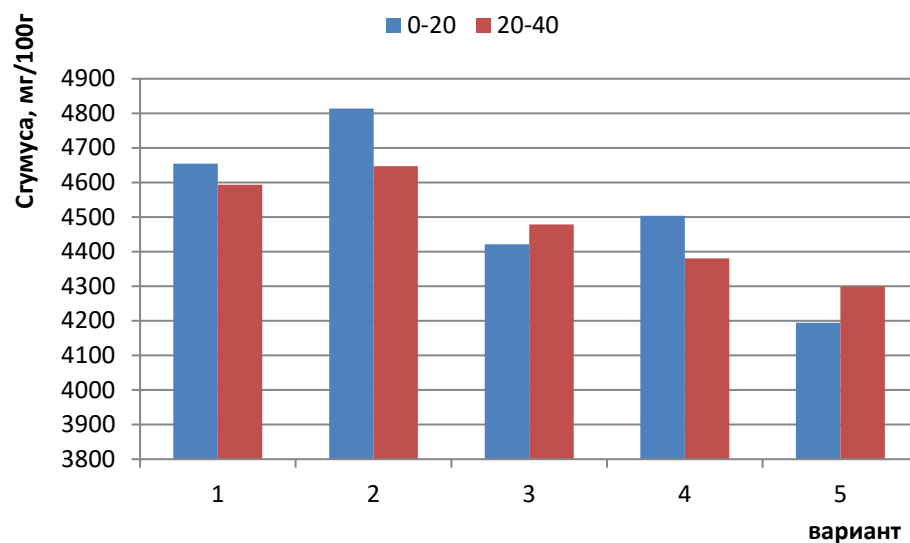
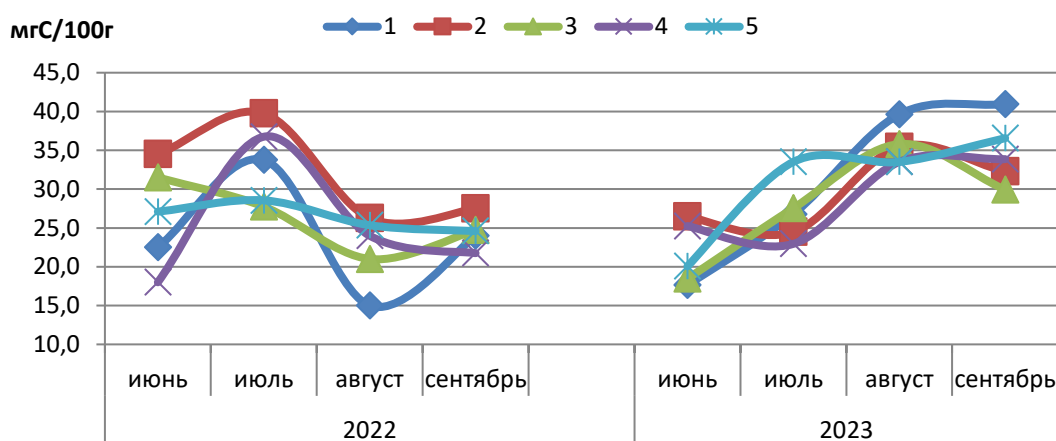


Рисунок 46 - Содержание Сгумуса (мг/100г) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы); 2022-2023гг.

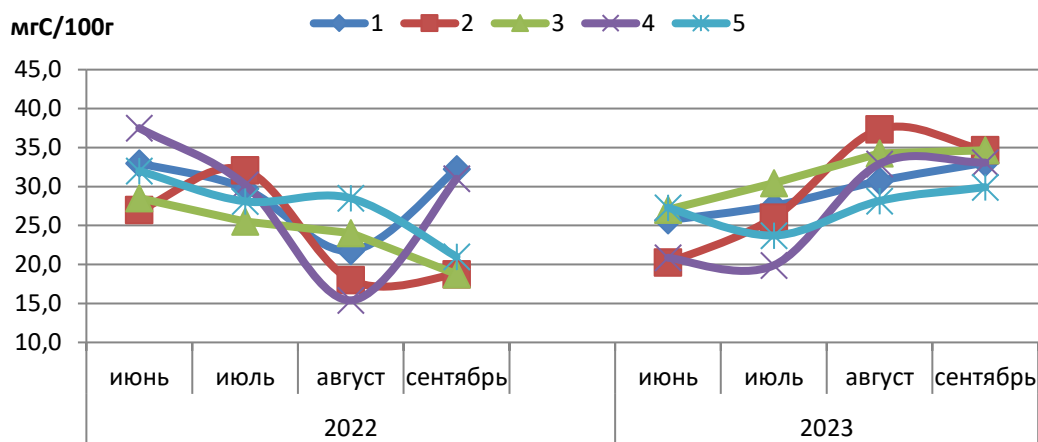
Положительное влияние суспензии *Chlorella vulgaris* на накопление углерода гумуса, по-видимому, связано с более активной формой препарата по сравнению с гранулами. Кроме этого известно, что наибольшую активность *Chlorella vulgaris* проявляет на поверхности почвы. Это обусловлено основной биологической особенностью фотосинтезирующих организмов, им в первую очередь необходим солнечный свет.

Известно, что в условиях нарастающей интенсификации сельскохозяйственного производства потери гумуса и его подвижных соединений приводят к деградации почв и значительной утрате их производительной функции (Mann, 1986; Woods, 1988). Водорастворимые соединения, выщелачиваемые из растительных остатков в процессе разложения, представляют собой смесь органических кислот, аминокислот и углеводов. Они представляют собой периферическую часть гумуса, довольно быстро подвергаются минерализации и служат источником для синтеза гумусовых веществ (Кураченко, Бопп, 2016). Изменение содержания подвижного гумуса в почве связано, прежде всего, с процессами прироста и деструкции растительного вещества, интенсивностью его

разложения. Сезонная динамика процессов трансформации водорастворимого гумуса имеет различный характер и протекает с переменной интенсивностью в зависимости от формы применения биопрепаратов и гидротермических условий вегетационных сезонов (рисунок 47).



А



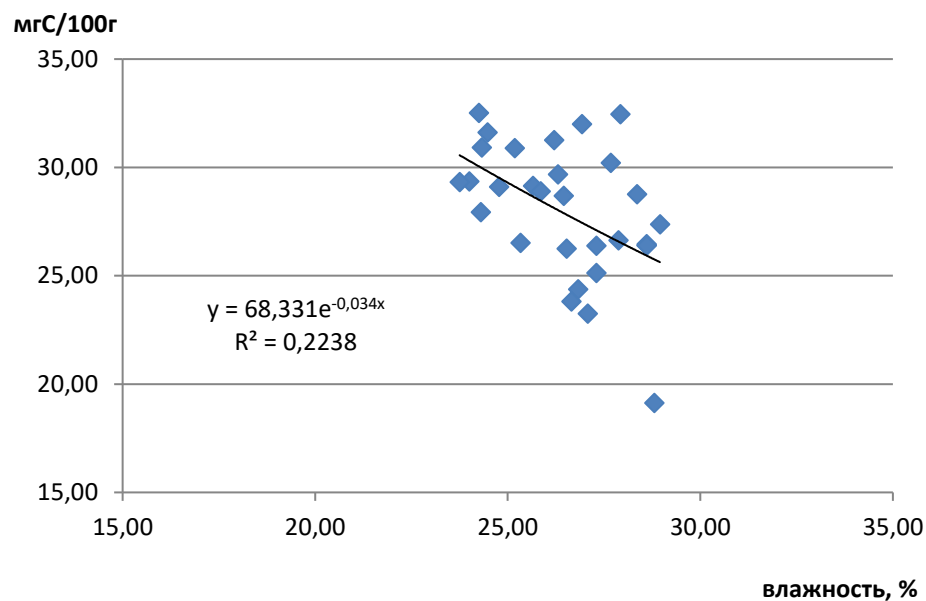
Б

Рисунок 47 - Динамика содержания CH_2O (мгС/100г) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. a platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

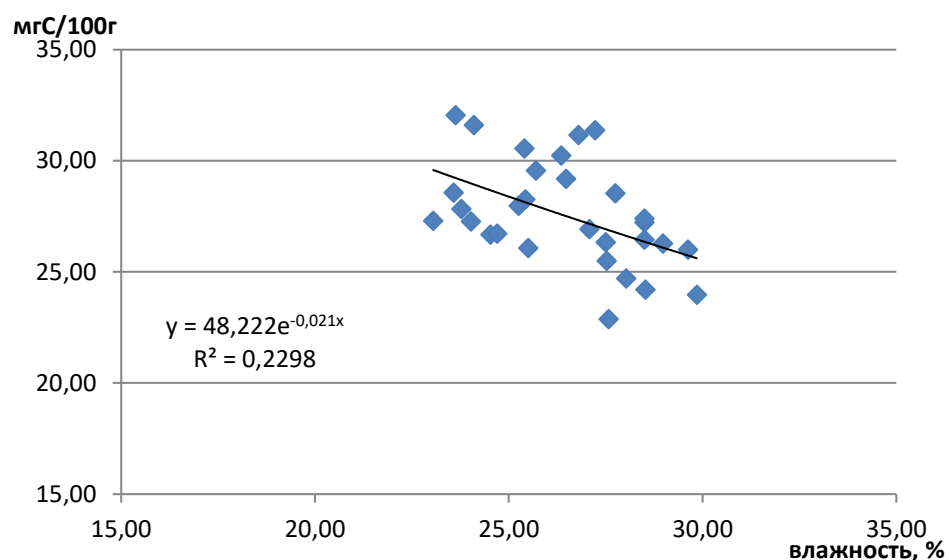
Водорастворимые соединения углерода варьируют в 0-40 см толще почвы в течение вегетационного сезона от незначительной до средней степени ($\text{Cv} = 7\text{-}35\%$) (таблица 16). По мнению В.В. Чупровой (2003), содержание CH_2O в почвах Средней Сибири невелико, но достаточно динамично. Общей закономерностью

динамических изменений $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$ в 0-20 см слое агрочернозема во влажный и тёплый вегетационный сезон 2022 года является увеличение его концентрации в почвенном растворе к периоду цветения яровой пшеницы и постепенное снижение к августу. Увеличение содержания углерода водорастворимого гумуса в июле связано с увеличением интенсивности пополнения блока почвенной мортмассы в эти периоды за счет частичного отмирания корней и надземных частей растений. В подпахотном 20-40 см слое агрочернозема ход сезонной динамики углерода водорастворимого органического вещества несколько иной. Пополнение почвенного раствора водорастворимой фракцией углерода в июльский период не было выявлено. В засушливые летние месяцы 2023 года, особенно в начале роста и развития яровой пшеницы не отмечается существенного обновления пула водорастворимого углерода в почве. Значительное увеличение концентрации $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$ до 37-40 мгС/100г почвы отмечается в пахотном и подпахотном слое только в период созревания яровой пшеницы.

Пополнение запасов влаги в агрочерноземе способствует усилению минерализации водорастворимого углерода и снижению его количества в почве ($r = -0,47 \dots -0,48$; рисунок 48), что согласуется с исследованиями Н.Л. Кураченко и В.Л. Бопп (2022). Авторами установлено, что ход сезонной динамики водорастворимого углерода гумуса в агрочерноземе под одновидовыми и бинарными посевами эспарцета был на 53–66 % сопряжен с влажностью почвы. О.А. Власенко (2017) различия в запасах водорастворимого органического вещества в агроценозах кукурузы и подсолнечника связывает с влажностью почвы и предполагает, что часть водорастворимых гумусовых веществ может вымываться из почвы и участвовать в процессах дальнейшей трансформации органического вещества при активном участии микроорганизмов. В конце вегетации запасы углерода водорастворимого гумуса, как правило, снижаются в агроэкосистемах из-за увеличения количества осадков и снижения активности микрофлоры.



А



Б

Рисунок 48 – Результаты корреляционного анализа влияния влажности на динамику водорастворимого углерода в агрочерноземе: А – 0-20 см; Б – 20-40 см ($r_{05}=0,36$; $n=30$)

Среднестатистическое содержание водорастворимого углерода в 0-20 см слое агрочернозема оценивается величиной 27-30 мгС/100г (таблица 17). Наибольшее накопление $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$ выявлено на варианте с суспензией *C. vulgaris* – 30 мг/100 г. Однако вариант с применением гранул *A. platensis* также определяет стабильное достоверное пополнение пула подвижного вещества.

Таблица 17 – Статистические параметры содержания C_{H_2O} в агрочерноземе, мгС/100

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	23,8	32	31,3	35
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	32,1	20	29,7	17
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	26,3	17	27,9	26
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	25,1	32	28,9	19
<i>A. platensis</i> (гранулы)	26,4	7	30,9	24
$p A = 0,0030^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0035^*$				
20-40 см				
Контроль	29,0	17	28,8	11
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	25,5	28	29,6	27
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	24,5	17	31,6	11
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	26,4	33	26,7	27
<i>A. platensis</i> (гранулы)	27,0	17	27,3	10
$p A = 0,0744$; $p B = 0,0002^*$; $p AB = 0,0005^*$				

Содержание водорастворимого углерода на этом варианте опыта стабильно превышает контроль по годам исследований и среднем оценивается на уровне 29 мг/100 г (рисунок 49).

Сильная обратная корреляционная зависимость между содержанием $C_{гумуса}$ и C_{H_2O} ($r = 0,70$) свидетельствует о том, что на этом варианте опыта отмечаются потери углерода гумуса по причине его минерализации и перехода в подвижные соединения. Достоверных отличий по изменению содержания водорастворимого углерода на вариантах опыта с применением микроводорослей по сравнению с контролем на глубине почвы 20-40 см не выявлено. Извлекаемый водной вытяжкой углерод гумуса является одним из показателей биологической доступности почвенного органического вещества. Он составляет небольшую часть от углерода органического вещества, что связано с его легкой миграцией и способностью к минерализации (Don, Kalbitz, 2005; Kalbitz, Kaiser, 2008).

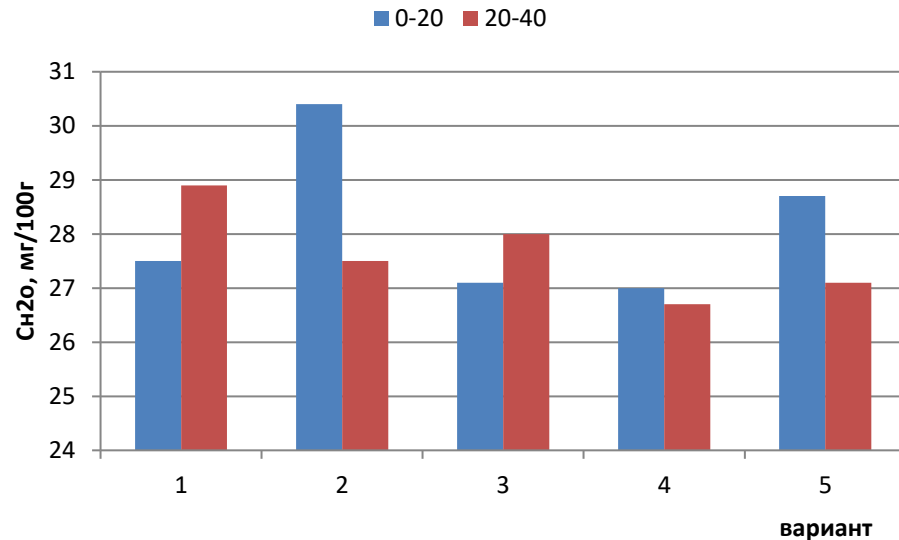


Рисунок 49 - Содержание Cn_2O (мг/100г) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы); 2022-2023гг.

Полученные результаты по оценке доли Cn_2O от $\text{C}_{\text{гумуса}}$ в агрочерноземе свидетельствуют о пополнении пула легкоминерализуемого органического вещества в почве под воздействием микроводорослей (рисунок 50).

В наибольшей степени это происходит в поверхностном 0-20 см слое агрочернозема. Максимальная доля Cn_2O от $\text{C}_{\text{гумуса}}$, достигающая 0,63 и 0,68 % отмечена при применении 1 % раствора *Chlorella vulgaris* и гранулы *Arthrospira platensis* в технологии возделывания яровой пшеницы.

Гумусовые вещества, извлекаемые из почвы 0,1 н раствором NaOH, наиболее подвержены трансформации при агрогенном использовании почв. Щелочегидролизуемые соединения углерода в почве представлены фенольными гидроксилами, амино- и амидогруппами, обогащенными водородом и азотом. Эти соединения, составляющие периферическую часть гумуса, быстро подвергаются минерализации и служат основным источником для образования гумусовых веществ (Кураченко, 2019).

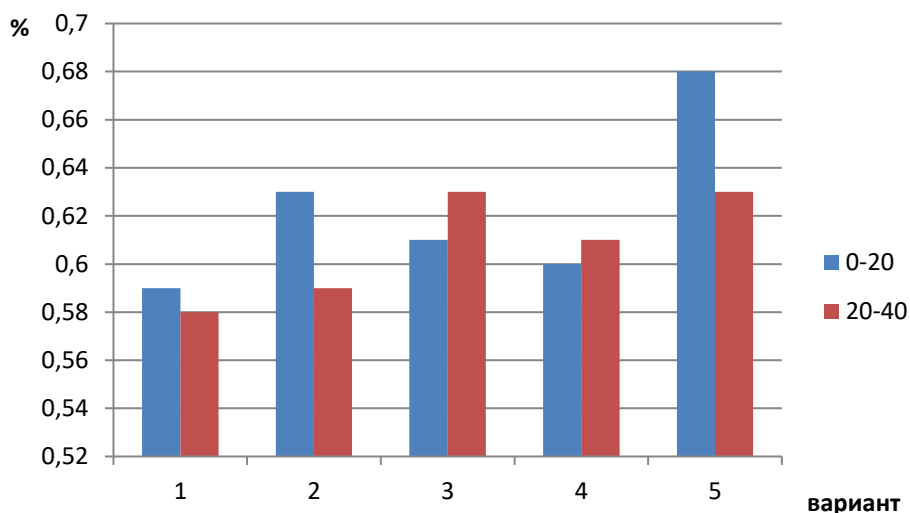
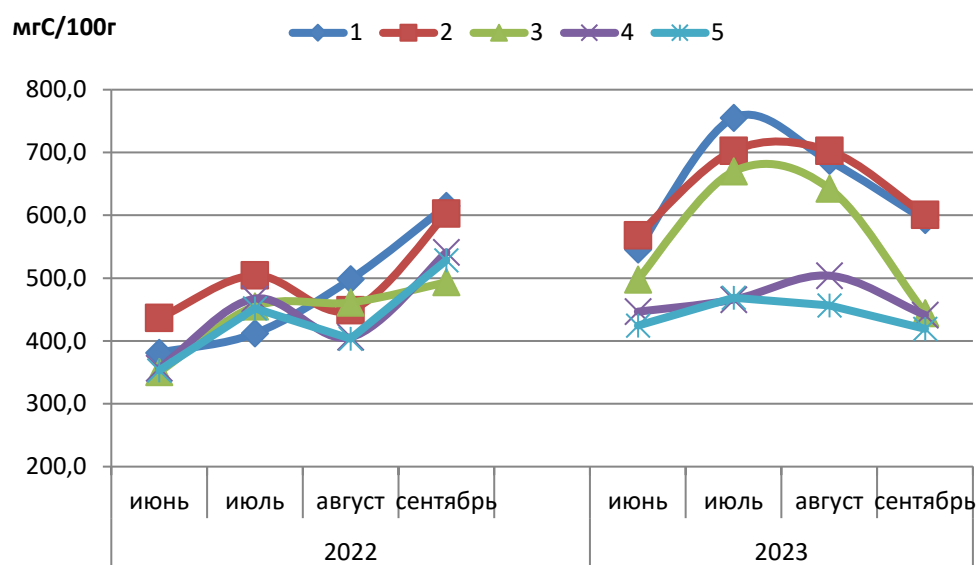


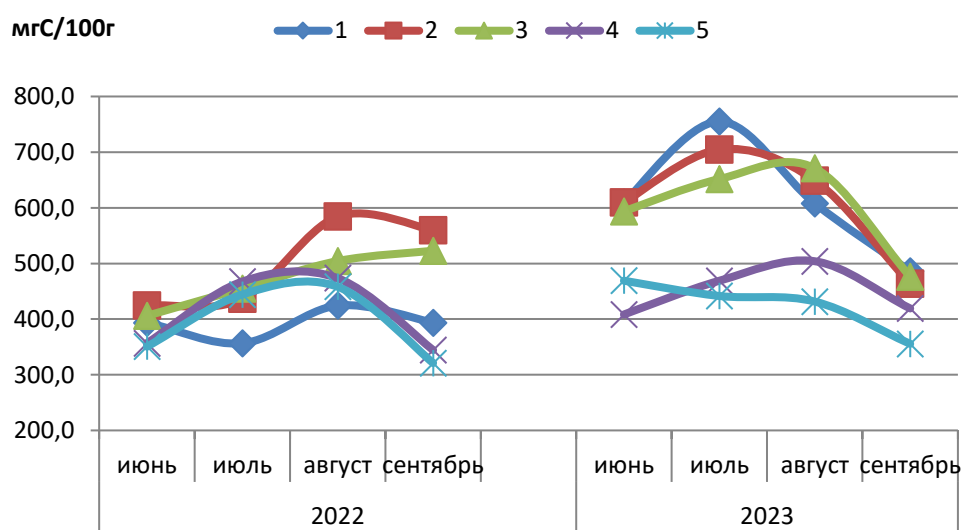
Рисунок 50 - Доля CH_2O в гумусе агрочернозема, % на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Исследованиями установлено, что динамические изменения щелочегидролизуемого углерода в агрочерноземе по годам исследований имеют различную направленность, что обусловлено особенностями погодных условиях и наличием в почве лабильного органического вещества предшествующих культур севооборота (рисунок 51). В вегетационный сезон 2022 года в поверхностном 0-20 см слое почвы отмечается два пика накопления C_{NaOH} (500-603 мгС/100г) на всех вариантах опыта. Они приходятся на июльский и сентябрьский периоды и обусловлены процессами прироста и деструкции растительного вещества. В подпахотном 20-40 см слое почвы значительный прирост щелочегидролизуемого углерода в почве отмечается в период молочной и полной спелости яровой пшеницы. Максимальных значений (523-560 мгС/100г) он достигает при применении *Chlorella vulgaris* в качестве суспензии по вегетирующим растениям и при внесении этой микроводоросли в почву в виде гранул. Особенностью вегетационного сезона 2023 года с превышением среднемноголетней температуры воздуха на 2-3° С и дефицитом осадков в летние месяцы является накопление щелочегидролизуемой фракции углерода в агрочерноземе в период июль-август.

Эта закономерность проявляется в 0-40 см слое почвы на контрольном варианте и на вариантах с применением *Chlorella vulgaris* в виде суспензии и гранул.



А



Б

Рисунок 51 - Динамика содержания C_{NaOH} (мгС/100г) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

По результатам исследований О.А. Власенко (2005), особенно интенсивно пополнение запасов периферической части гумусовых веществ в условиях Красноярской лесостепи протекает в начале и середине лета, когда высока

активность почвенной микрофлоры. Факторами, определяющими процессы трансформации органического вещества, являются количество растительного опада, наличие доступной влаги и кислорода в почве. Исследованиями, выполненными на черноземах Красноярской лесостепи, установлено, что при значительном снижении осадков и возрастании температуры, происходит увеличение концентрации щелочегидролизуемого углерода гумуса за счет увеличения концентрации гуминовых кислот (Власенко, 2015).

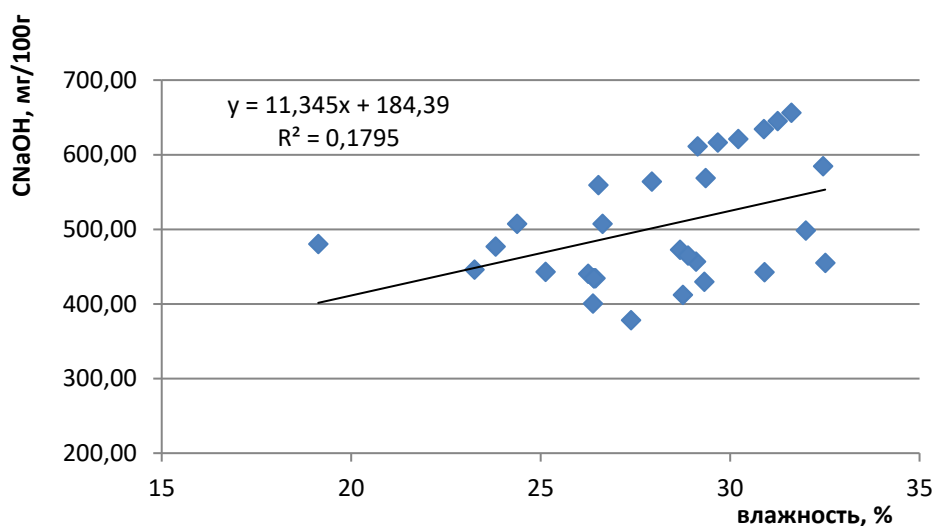
В случае применения гранул *Arthrospira platensis* в чистом виде и в смеси с *Chlorella vulgaris* в условиях полевого опыта отмечается снижение концентрации C_{NaOH} в почвенном растворе до 408-504 мгС/100 г почвы при относительно стабильной динамике показателя в течение периода наблюдений ($C_v = 6-12 \%$). Подобная закономерность, на наш взгляд, обусловлена физиологическими особенностями сине-зеленых водорослей или цианобактерий. Цианобактерии представляют собой группу фотосинтезирующих, фиксирующих азот бактерий, которые живут и активно функционируют преимущественно во влажных местообитаниях (Водоросли..., 2017).

Таким образом, дефицит влаги в почве в вегетационный сезон 2023 года не способствует усилению биологической активности почвы в присутствии микроводорослей *Arthrospira platensis* и пополнению почвенного раствора подвижными компонентами гумуса. В этих условиях возможен и другой механизм влияния цианобактерий *Arthrospira platensis* на гумусное состояние почвы. Он связан с углерод-концентрирующим механизмом, который позволяет им создавать большие концентрации углерода в клетке (Ogawa, Kaplan, 2003).

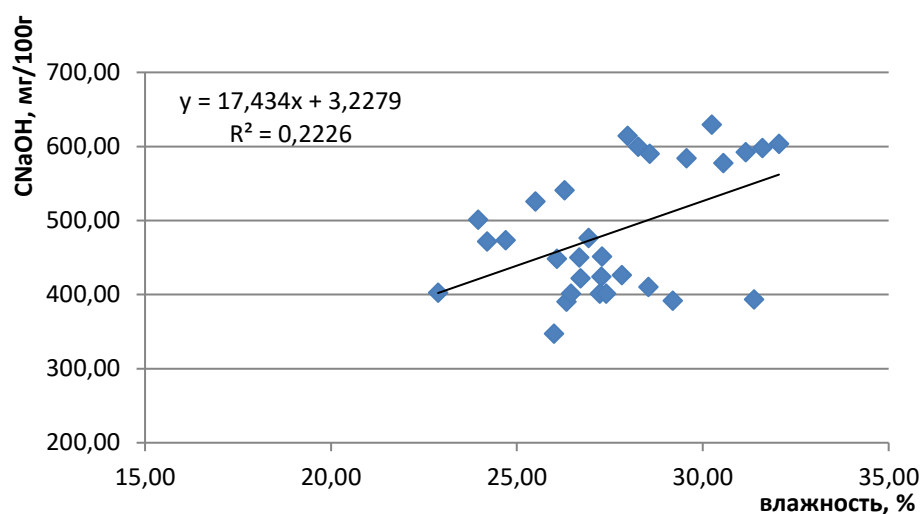
Анализ корреляционной зависимости между содержанием гидролизуемых 0,1 н щелочью гумусовых соединений и влажностью 0-40 см слоя почвы показал, что между изучаемыми параметрами в их сезонной динамике обнаруживается прямая средняя зависимость ($r = 0,42...0,47$; рисунок 52).

При влажности агрочернозема в интервале влажности 30-32 % формируется максимальная обогащенность почвы C_{NaOH} , достигающая 603-656 мгС/100г.

Результатами исследований Б.М. Когута и В.П. Яковченко (1987) показано, что вклад погодных условий вегетационного сезона в общее варьирование содержания подвижных гумусовых веществ может достигать 71 %.



А



Б

Рисунок 52 – Результаты корреляционного анализа влияния влажности на динамику щелочегидролизуемого углерода в агрочерноземе: А – 0-20 см; Б – 20-40 см ($r_{05}=0,36$; $n=30$)

Агроценозы яровой пшеницы функционируют на почве с содержанием щелочегидролизуемых соединений углерода, существенно отличающихся по вариантам опыта и годам исследований ($p = 0,0000$) (таблица 18; прил. 10, 11).

Теплые и влажные условия вегетационного сезона 2022 года способствуют пополнению пула щелочегидролизуемого углерода только при применении 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris* по вегетирующим растениям. По сравнению с контрольным вариантом здесь отмечается увеличение концентрации C_{NaOH} на 5-28 % в слое 0-40 см.

Таблица 18 – Статистические параметры содержания C_{NaOH} в агрочерноземе, мгС/100

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	X_{cp}	$C_v, \%$	X_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	476,6	22	645,0	15
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	498,2	15	636,1	10
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	440,1	14	563,7	19
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	442,8	18	464,5	6
<i>A. platensis</i> (гранулы)	434,3	17	442,3	6
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0058^*$				
20-40 см				
Контроль	392,1	7	614,7	18
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	501,2	16	606,7	11
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	472,0	11	598,1	15
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	410,5	17	450,1	10
<i>A. platensis</i> (гранулы)	393,5	17	424,4	12
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0001^*$				

В наибольшей степени процесс минерализации захватывает щелочегидролизуемые соединения гумуса в вегетационный сезон 2023 года при поступлении микроводорослей в агроценоз пшеницы. Полученные результаты

отразились на значениях содержания C_{NaOH} в среднем за период наблюдений (рисунок 53).

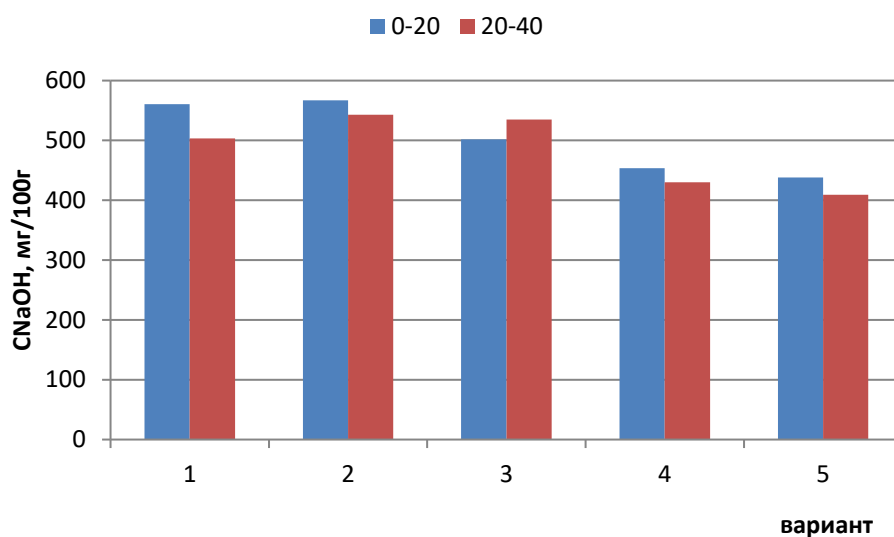


Рисунок 53 - Содержание C_{NaOH} (мг/100г) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы); 2022-2023гг.

Установлено, что опрыскивание растений суспензией *Chlorella vulgaris* определяет близкий уровень содержания щелочегидролизуемого подвижного углерода в почве с контрольным вариантом в слое 0-20 см (561-557 мгС/100г). В слое 20-40 см на вариантах опыта с применением суспензии и гранулы *Chlorella vulgaris* отмечается более активное образование гидролизуемых соединений углерода, что определяет увеличение концентрации показателя на 39-32 мгС/100 г почвы по сравнению с контролем. При внесении гранул в почву максимальная убыль щелочегидролизуемого углерода по сравнению с контрольным вариантом отмечается в верхнем 0-20 см слое агрочернозема (107-123 мгС/100г). Зелёные водоросли и цианобактерии производят большое количество органических веществ, увеличивают содержание органического углерода в почве, выделяя экзополисахариды (EPS) во время разложения клеток водорослей, и становятся легкодоступной формой углерода, необходимой для роста почвенной микробиоты (Tiwari et al., 2019; Redmile-Gordon et al., 2020).

Определение запасов гумусовых веществ с учётом их концентрации и плотности сложения 0-40 см слоя агрочернозема показывает, что запасы стабильного гумуса по вариантам опыта оцениваются на уровне 78-61 т/га или 88-90 % от всех запасов гумусовых веществ (таблица 19). Максимальная доля запасов стабильного гумуса выявлена на вариантах опыта с применением гранул *Arthrospira platensis*. В слое почвы 0-20 см она оценивается величиной 89 % от Сгумуса, в слое 20-40 см достигает 90 %, что обусловлено снижением подвижных соединений гумуса. На этих вариантах опыта запасы Спов снижены до 8-9 т/га или 9-12 % от общих запасов гумусовых веществ. При внесении в почву гранул микроводоросли *Arthrospira platensis* доля C_{NaOH} снижается до 9-10 % от Сгумуса. Доля водорастворимого углерода незначительная и существенно не меняется по вариантам опыта (0,6 %). Незначительный запас подвижных гумусовых веществ обусловлен постоянным его обновлением в почве и вовлечением в процессы минерализации и гумификации. Он обеспечивает отклик на внешние агротехнические и агроэкологические воздействия в виде применения микроводорослей в технологии возделывания яровой пшеницы и формирует эффективное плодородие агрочернозема. По мнению В.М. Семёнова и Б.М. Когула (2015), большое число органических веществ, присутствующих в почве, и разнообразие почвенно-экологических условий обуславливает многовариантность путей стабилизации органических веществ.

Таблица 19 - Запасы гумусовых веществ в агрочерноземе, тС/га (2022-2023 гг.)

Вариант	Компонент гумуса							
	Сгумуса	Спов	С _{H2O}	С _{NaOH}	Сгк	Сфк	Сгк/Сфк	Сстаб. гумуса
0-20 см								
Контроль	80,8	10,1	0,47	9,6	6,4	3,2	2,0	70,7
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	79,8	9,8	0,50	9,4	6,0	3,4	1,8	70,1
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	81,3	9,7	0,50	9,2	5,7	3,5	1,6	71,6
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	80,1	8,6	0,48	8,1	5,2	2,9	1,8	71,5
<i>A. platensis</i> (гранулы)	68,7	7,7	0,47	7,2	4,7	2,5	1,9	61,0
20-40 см								
Контроль	80,8	9,4	0,51	8,9	6,1	2,8	2,2	71,4
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	88,4	10,8	0,52	10,3	6,8	3,5	1,9	77,6
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	86,0	10,8	0,54	10,3	6,6	3,7	1,8	75,2
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	82,3	8,6	0,50	8,1	5,6	2,5	2,2	73,7
<i>A. platensis</i> (гранулы)	82,6	8,3	0,52	7,8	5,5	2,3	2,4	74,3

Оценка вклада агроэкологических факторов в формирование гумусовых веществ доказывает, что наибольший вклад изученные формы препаратов с микроводорослями оказывают на содержание Сгумуса (51-70 %) (рисунок 54). В наименьшей степени их влияние отразилось на содержании водорастворимого углерода (24-12 %).

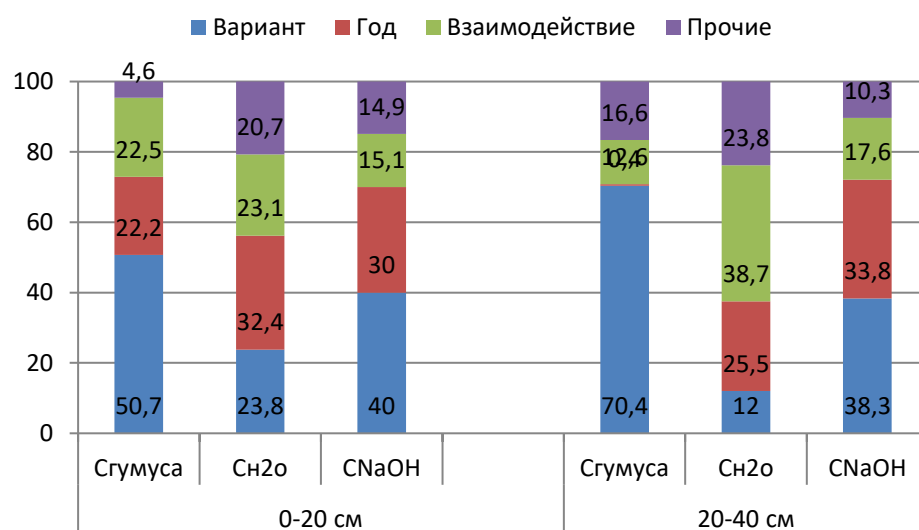


Рисунок 54 - Вклад агроэкологических факторов в формирование гумусного состояния агрочернозема

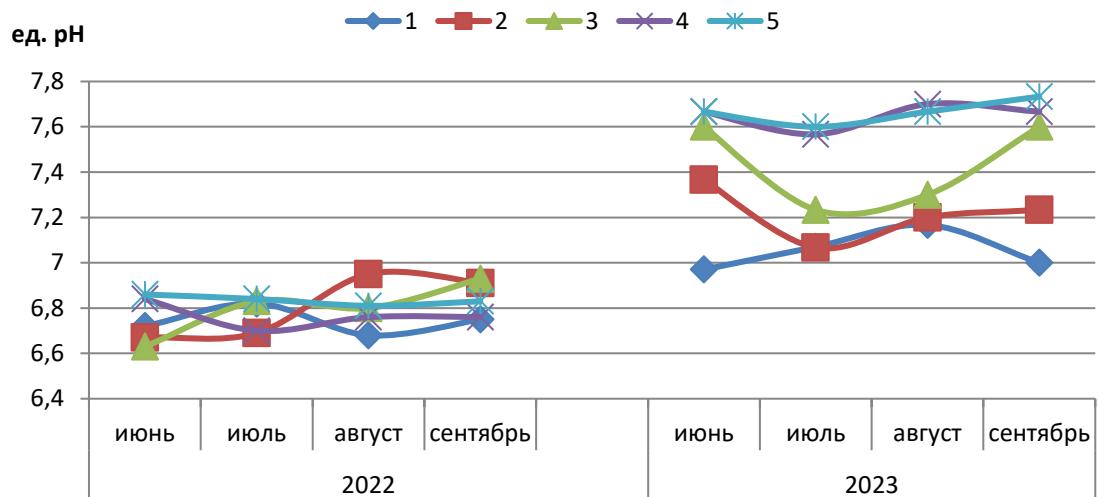
Показатель силы влияния фактора «год» на содержание гумуса и его подвижных компонентов стабильно проявляется для 0-20 см слоя агрочернозема (22-32 %). Для слоя 20-40 см погодные условия вегетационных сезонов на 26-34 % влияют на содержание подвижных гумусовых веществ.

Таким образом, динамические изменения углерода гумуса и его подвижных компонентов определяются формой препаратов с микроводорослями и гидротермическими условиями вегетационных сезонов. Применение 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris* в технологии возделывания яровой пшеницы способствует увеличению по сравнению с контролем содержания углерода гумуса на 159-54 мгС/100 г, щелочегидролизуемого углерода на 6-39 мгС/100 г в 0-40 см слое почвы, максимальному пополнению почвенного раствора 0-20 см слоя

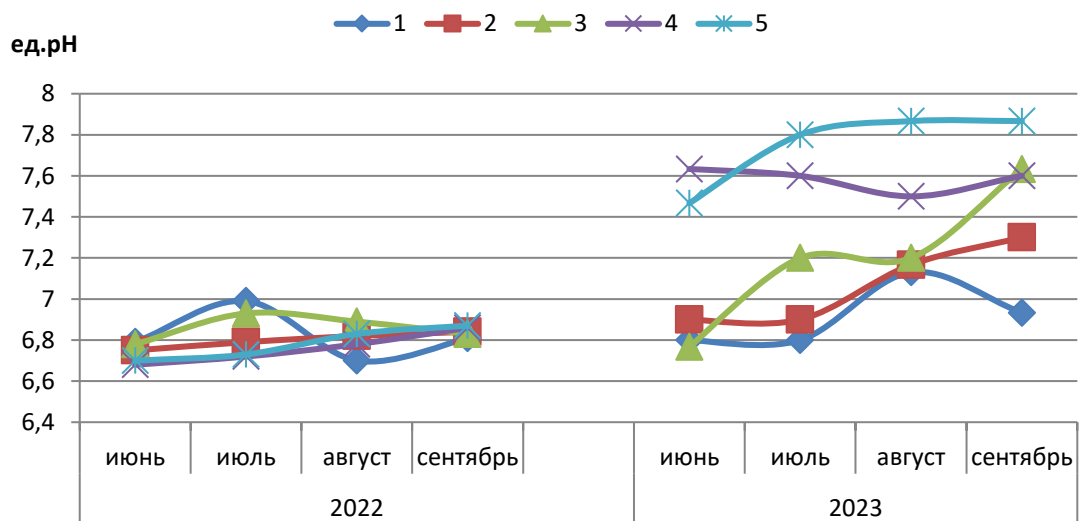
агрочернозема водорастворимым углеродом (30 мг/кг). Микроводоросли *Chlorella vulgaris* в виде суспензии и гранул определяют пополнение запасов Сгумуса на 5-8 т/га и его подвижных соединений на 1 т/га в 20-40 см слое почвы по сравнению с контрольным вариантом. Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности использования этих микроводорослей в качестве регулятора гумусного состояния пахотных почв.

6.3 Агрохимическое состояние агрочернозема

Свойства агрочерноземов и взаимосвязи между ними значительно меняются в сезонной динамике (Савич и др., 2021). Наиболее активной и динамичной в почве является жидкая фаза или почвенный раствор. Его реакция среды, определяемая катионами и анионами, является важнейшим показателем плодородия почв и проявления микробиологических и химических процессов (Гречишкина и др., 2016; Громова и др., 2018). Живые организмы, обитающие в почве, могут изменять состав раствора, извлекая из него питательные элементы, что приводит к изменению реакции почвенного раствора (Кураченко, Колесник, 2024). Реакция среды в почве в то же время влияет на микробиологические процессы и усвоение растениями элементов питания. Она может быть изменена и под воздействием применяемых удобрений (Азизов, 2018). При анализе сезонной динамики реакции почвенного раствора следует учитывать, что она определяется совокупным влиянием таких факторов как химический и минералогический состав минеральной части почвы, наличие свободных солей, содержание и качественный состав органического вещества, состав почвенного воздуха, влажность почвы и жизнедеятельность организмов (Почвоведение..., 1988). Агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный, функционирующий под посевами яровой пшеницы на контрольных вариантах, характеризуется нейтральной реакцией почвенного раствора (рисунок 55).



А



Б

Рисунок 55 - Динамика рН почвенного раствора (ед. рН) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Сезонная динамика показателя не превышает 1-2 % и имеет схожую направленность в пахотном и подпахотном слое, но различную количественную оценку по годам исследований, что обусловлено погодными условиями вегетационных сезонов. Во влажных условиях вегетационного сезона 2022 года рН

почвенного раствора изменяется по фазам развития яровой пшеницы в узких пределах от 6,7 до 6,8 ед. рН. Засушливые условия вегетационного сезона 2023 года определяют повышение рН почвенного раствора до 7,1-7,2 ед. рН с сохранением нейтральной реакции среды.

При опрыскивании вегетирующих растений яровой пшеницы 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* и внесении гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в почву с семенами отмечается изменение характера динамики реакции почвенного раствора по сравнению с контрольным вариантом. Эти изменения касаются повышения рН почвенного раствора в отдельные периоды роста и развития растений яровой пшеницы без определенных закономерностей по вариантам опыта в годы исследований. В наибольшей степени изменения показателя проявляется в 0-40 см слое агрочернозема на вариантах опыта с применением гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* при возделывании яровой пшеницы в 2023 году, когда реакция почвенного раствора достигает 7,5-7,8 ед. рН. Оценка статистических параметров реакции почвенного раствора агрочернозема показывает достоверные различия ($p = 0,000$) в уровне значений показателя по годам исследований (таблица 20). В вегетационный сезон 2022 года при сохранении нейтральной реакции среды по вариантам опыта установлено достоверное повышение показателя до 6,8-6,9 ед. рН на вариантах с применением микроводорослей. Схожие результаты получены в сезон 2023 года с существенным дефицитом влаги в почве. В этих условиях нейтральная реакция среды в 0-20 см слое сохраняется на контроле и на варианте опыта с применением 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris*. Внесение гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в почву, в том числе и их сочетание, определяет *появление* слабощелочной реакции почвенного раствора (7,4-7,7 ед. рН). В подпахотном 20-40 см слое гранулы *Arthrospira platensis* подщелачивают почву до 7,6 ед. рН. Эффект повышения показателя рН ожидаем при внесении культуры этой цианобактерии. Реакция среды зрелой культуры при выращивании *Arthrospira* поднимается от 8 до 18 единиц.

Таблица 20 – Статистические параметры pH почвенного раствора в агрочерноземе, ед. pH

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	X_{cp}	$C_v, \%$	X_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	6,74	1	7,05	1
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	6,81	2	7,22	2
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	6,80	2	7,43	3
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	6,77	1	7,65	1
<i>A. platensis</i> (гранулы)	6,84	1	7,67	1
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0000^*$				
20-40 см				
Контроль	6,82	2	6,92	2
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	6,80	1	7,01	3
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	6,86	1	7,20	5
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	6,76	1	7,58	1
<i>A. platensis</i> (гранулы)	6,78	1	7,75	2
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0000^*$				

В целом за период наблюдений установлено достоверное повышение реакции агрочернозема по сравнению с контролем на 0,1-0,4 ед. pH в слоях почвы 0-20 и 20-40 см (рисунок 56). Максимальный уровень pH с сохранением нейтральной реакции среды установлен при внесении в почву гранул с *Arthrospira platensis*, достигающий в среднем 7,8 ед. pH. По мнению А.В. Якушева, Т.А. Грачевой (2022) и М.Г. Алиева (2024), изменение pH почвы в сторону подщелачивания под влиянием микроводорослей связано с ассимиляцией углекислого газа.

Активное поглощение микроводорослями в почве углекислого газа в процессе фотосинтеза приводит к удалению избытка углекислоты в почвенном

растворе и повышению показателя рН почвы. Кроме того, известно, что *Arthrospira platensis* имеет оптимум рН между 8 и 11, обитает в тропических и субтропических озерах, воды которых обладают высокими значениями рН и концентрацией карбонатов и бикарбонатов (Водоросли..., 2017).

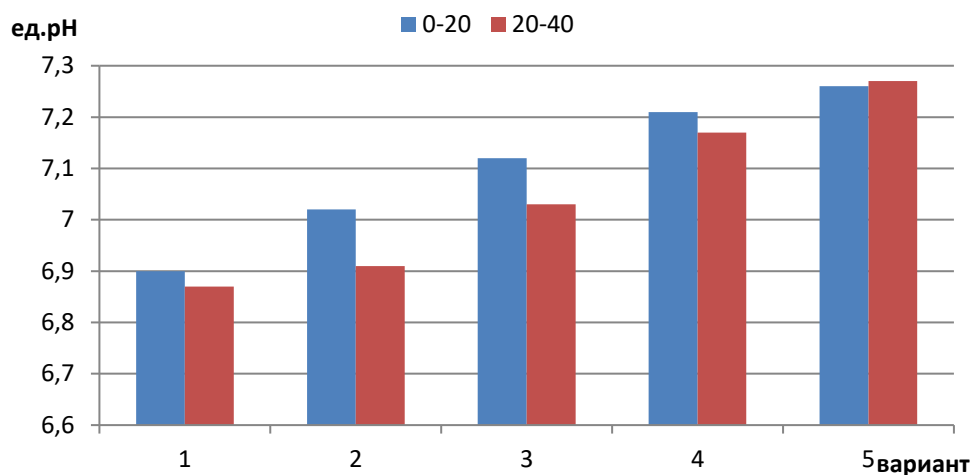


Рисунок 56 - рН почвенного раствора (ед. рН) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023гг.)

Показатель силы влияния факторов на формировании реакции почвенного раствора агрочернозема позволил сделать заключение, что погодные условия вегетационных сезонов на 57-72 % определяют величину изучаемого показателя в слоях 0-20 и 20-40 см (рисунок 57).

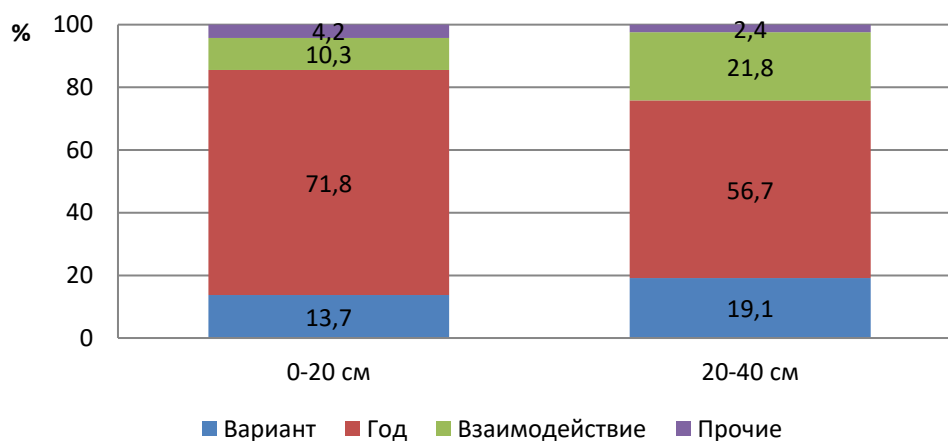


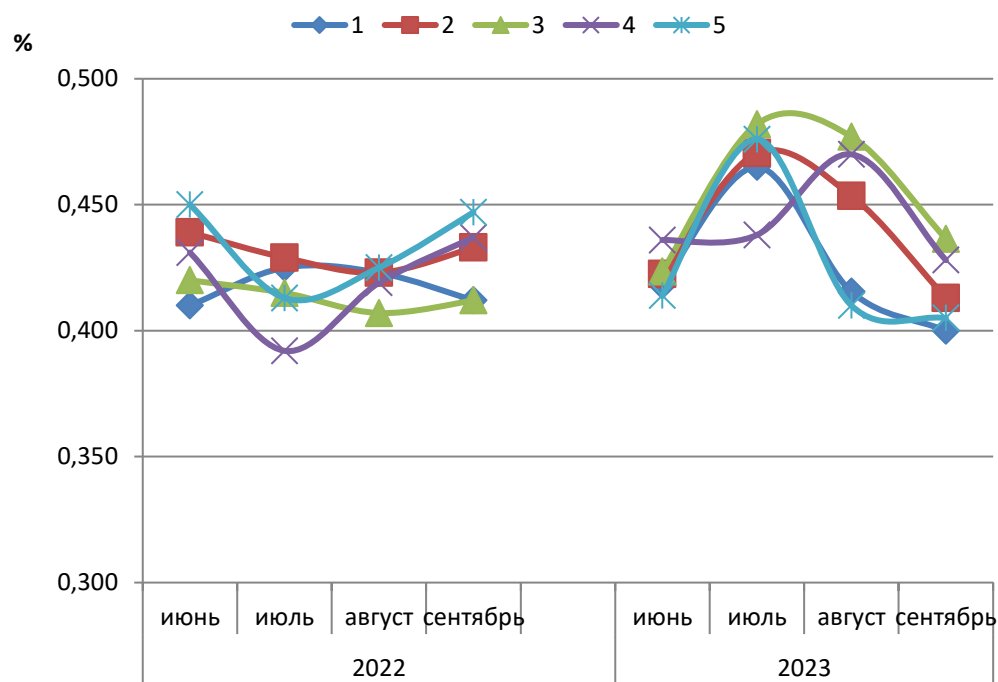
Рисунок 57 - Вклад агроэкологических факторов в формирование реакции почвенного раствора агрочернозема, %

Роль изучаемых препаратов с микроводорослями в слое почвы 0-20 см оценивается на уровне 14 %, в подпахотном слое – на 19 %. На фактор «взаимодействие» приходится по 10-22 %.

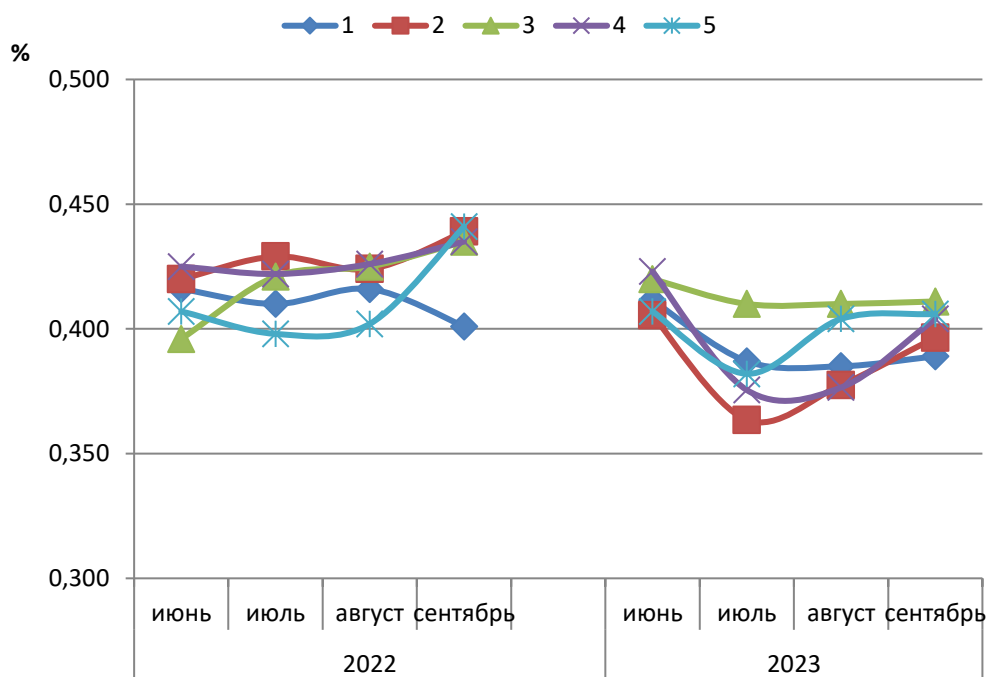
Количественным показателем потенциального плодородия почв является содержание общего азота, зависящее от содержания гумуса. По данным Г.П. Гамзикова (2013), в почвах Западной Сибири значительная доля азота органических соединений (83-90 % от общего азота) входит в состав собственно гумусовых веществ. Обладая достаточной устойчивостью, органический азот в почве поддерживает её плодородие (Чупрова, 1997). Процессы мобилизации азота в почве достаточно сложны и зависят от экологических условий, свойств почвы и характера сельскохозяйственного использования. Известно, что при экстенсивном земледелии снижаются запасы всех фракций почвенного азота. Систематическое применение органических и минеральных удобрений в сочетании с другими агротехническими приёмами позволяет не только созрывать запасы азота в почве, но и постепенно их увеличивать (Гамзиков, 2023).

Наблюдения за динамикой общего азота в агрочерноземе показали, что эта форма органического азота в течение вегетационного сезона изменяется в незначительной степени и подвержена слабым изменениям ($C_v = 1-8 \%$) (рисунок 58; таблица 21). При этом наибольшие сезонные изменения в содержании органического азота происходят в верхнем 0-20 см слое агрочернозема. Характер сезонной динамики общего азота в 0-20 см слое агрочернозема существенно изменяется по годам исследований ($p = 0,0078$). При схожем характере динамики. Но по вариантам опыта наибольшие изменения в содержании общего азота отмечаются в вегетационный сезон 2023 года ($C_v = 4-8 \%$).

Здесь отмечается повышение показателя по сравнению с исходным содержанием до 0,47 % в период июль-август, что обусловлено процессами трансформации органического вещества в почве. В подпахотном 20-40 см слое почвы ход сезонной динамики обратный, т.к. в этот период отмечается снижение концентрации общего азота в почве до 0,41-0,36 %.



А



Б

Рисунок 58 - Динамика общего азота (%) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Таблица 21 – Статистические параметры содержания общего азота в агрочерноземе, %

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	0,42	2	0,42	8
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	0,43	2	0,44	6
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	0,41	1	0,45	6
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	0,42	5	0,44	4
<i>A. platensis</i> (гранулы)	0,43	4	0,43	8
$p A = 0,5566; p B = 0,0078*; p AB = 0,2412$				
20-40 см				
Контроль	0,41	2	0,39	3
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	0,43	3	0,39	5
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	0,42	4	0,41	3
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	0,43	1	0,40	6
<i>A. platensis</i> (гранулы)	0,41	5	0,40	3
$p A = 0,4388; p B = 0,0656; p AB = 0,1278$				

Оценка среднесезонного содержания общего азота за период наблюдений показала, что его содержание в почве контрольного варианта на глубине 0-40 см оценивается величиной 0,42-0,40 % (рисунок 59). Применение в технологии возделывания микроводорослей в виде суспензии и гранул увеличивает в среднем содержание общего азота на 0,01-0,03 %, но эти различия по сравнению с контрольным вариантом являются не достоверными ($p = 0,5566-0,4388$). Математически также не доказывается сочетание факторов «вариант» и «год» исследований ($p = 0,2412-0,1278$). При отсутствии достоверности повышения содержания общего азота по вариантам опыта следует выделить вариант, где

вегетирующие растения яровой пшеницы подвергались двукратной фолларной обработке 1 % раствором *C. vulgaris*.

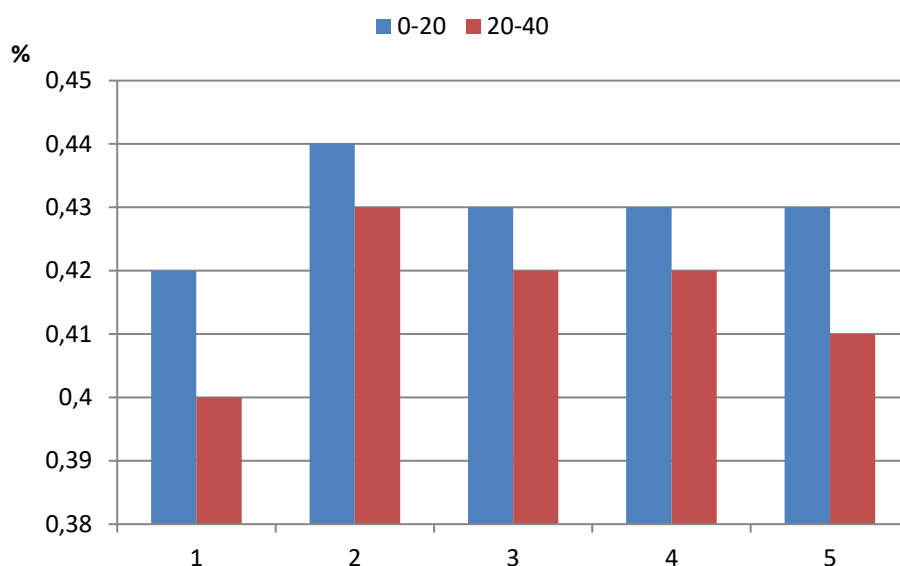
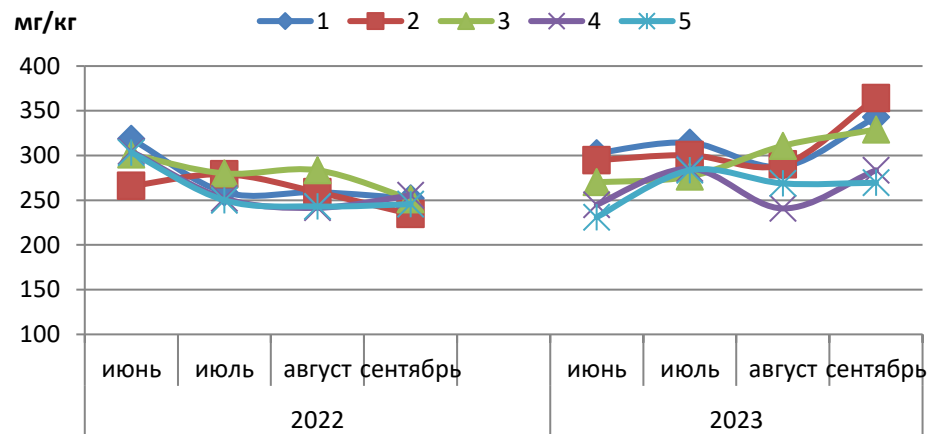


Рисунок 59 - Содержание общего азота (%) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

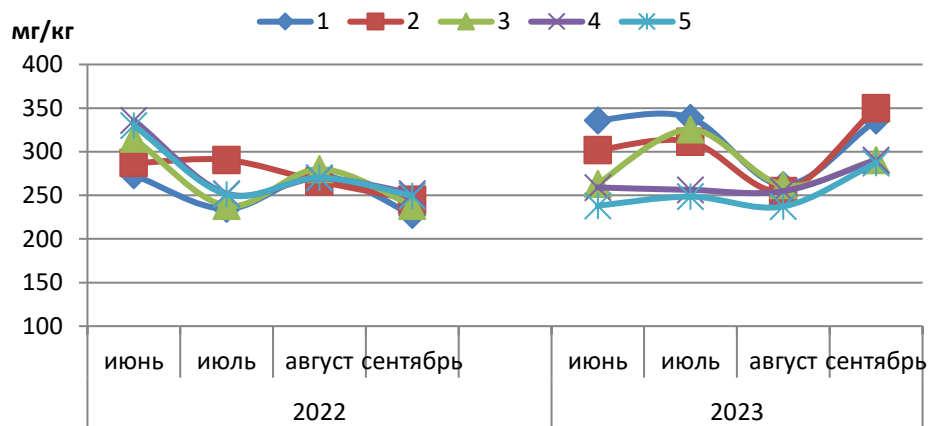
На этом варианте опыта установлено максимальное содержание общего азота в 0-40 см слое почвы (0,44-0,43 %). Исследованиями В.А. Лукьянова и А.И. Стифеева (2016) показано, что весьма эффективным способом применения микроводорослей является обработка ими растений в фазу активного роста их надземной части, в том числе в фазу начала кущения. По мнению авторов, органическое вещество микроводорослей *Chlorella vulgaris* отличается легкой усвояемостью и даёт высокий энергетический эффект, благодаря этому его используют гетеротрофные микроорганизмы.

Трудногидролизуемый азот является резервом для пополнения фонда более подвижных азотных соединений (Пигарева, Пьянкова, 2011). Его количество в почвах земледельческой зоны Красноярского края составляет небольшую долю от общего азота. По результатам исследований Н.Л. Кураченко и Е.Ю. Казановой (2024), на долю трудногидролизуемого азота в черноземах Канской лесостепи приходится всего 7-8 % от запасов общего азота.

В содержании трудногидролизуемого азота по годам исследований отмечается незначительная и небольшая сезонная динамика ($C_v = 7-14\%$), сопровождающаяся снижением этой фракции от стадии всходов яровой пшеницы к периоду её молочной и восковой спелости за счет процессов минерализации (рисунок 60, таблица 21, Кураченко, Абакумова, 2025).



А



Б

Рисунок 60 - Динамика трудногидролизуемого азота (мг/кг) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

В наибольшей степени эта закономерность проявляется в условиях влажного вегетационного сезона 2022 года. В почве контрольного варианта и на

вариантах с применением микроводорослей содержание Нтг в поверхностном 0-20 см слое постепенно снижается от 266-303 до 246 мг/кг. В вегетационный сезон 2023 года пик накопления трудногидролизующего азота в почве на всех вариантах опыта приходится на послеуборочный период (270-364 мг/кг).

Таблица 22 – Статистические параметры содержания трудногидролизующего азота в агрочерноземе, %

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	\bar{X}_{cp}	C_v , %	\bar{X}_{cp}	C_v , %
0-20 см				
Контроль	272,1	11	311,9	8
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	259,6	7	312,2	11
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	278,9	7	296,6	9
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	263,4	11	263,7	9
<i>A. platensis</i> (гранулы)	260,5	11	263,2	9
$p A = 0,0041^*$; $p B = 0,0006^*$; $p AB = 0,0267^*$				
20-40 см				
Контроль	252,0	10	318,2	12
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	272,1	8	304,5	13
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	267,8	14	285,3	10
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	277,4	14	265,1	6
<i>A. platensis</i> (гранулы)	275,2	14	252,7	9
$p A = 0,0623$; $p B = 0,0074^*$; $p AB = 0,0004^*$				

При схожей динамике трудногидролизующего азота с контрольным вариантом установлено, что применение микроводорослей в технологии возделывания яровой пшеницы определяет снижение показателя во все фазы развития культуры. В наибольшей степени это проявляется при непосредственном внесении гранул в почву. Исследованиями установлено достоверное влияние биопрепаратов с микроводорослями на содержание трудногидролизующей формы азота в агрочерноземе только для слоя почвы 0-20 см ($p = 0,041$). Определяющую достоверную роль в формировании пула трудногидролизующего азота сыграл фактор «год» ($p = 0,0006-0,0074$).

В среднем за период наблюдений опрыскивание яровой пшеницы биопрепаратом с 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* и внесение гранул *Chlorella vulgaris* при посеве яровой пшеницы определяет незначительное снижение содержания НТГ в корнеобитаемом слое (рисунок 61). Разница с контролем на этих вариантах опыта составляет 4-6 мг/кг. Поступление в почву цианобактерий *Arthrospira platensis* в чистом виде в смеси с *Chlorella vulgaris* определяет абсолютное уменьшение содержания трудногидролизующего азота на 28-30 мг/кг.

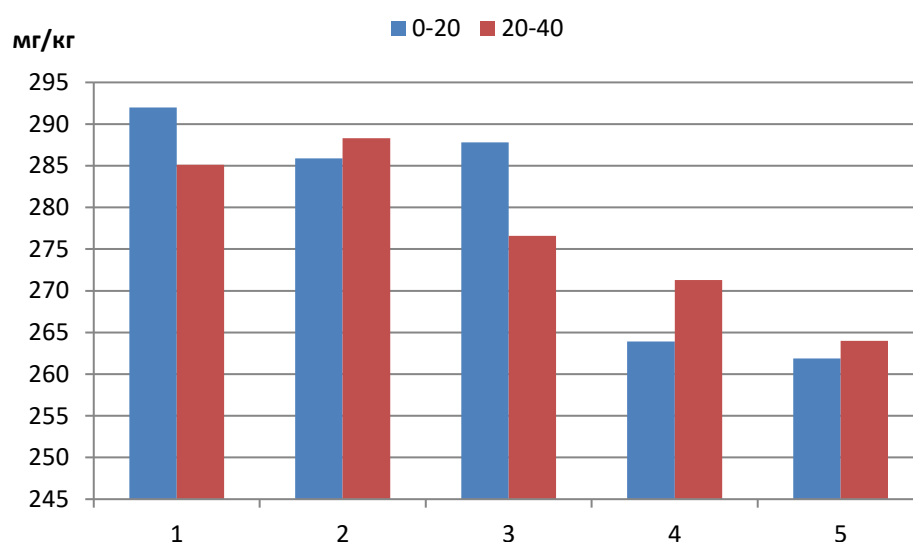
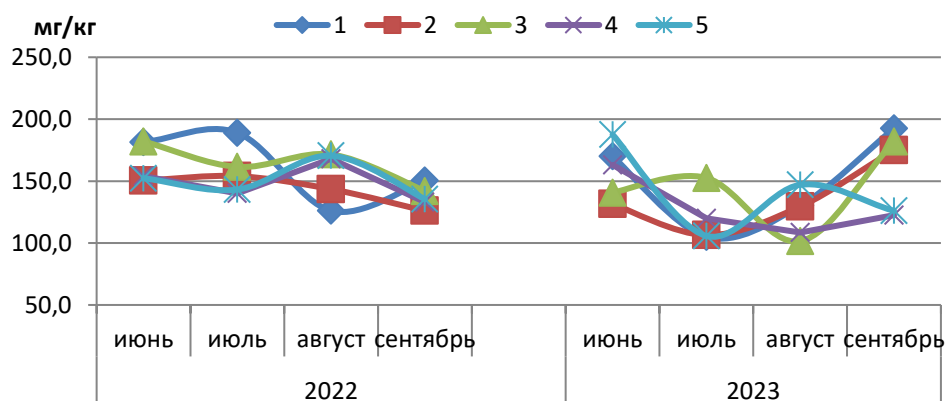
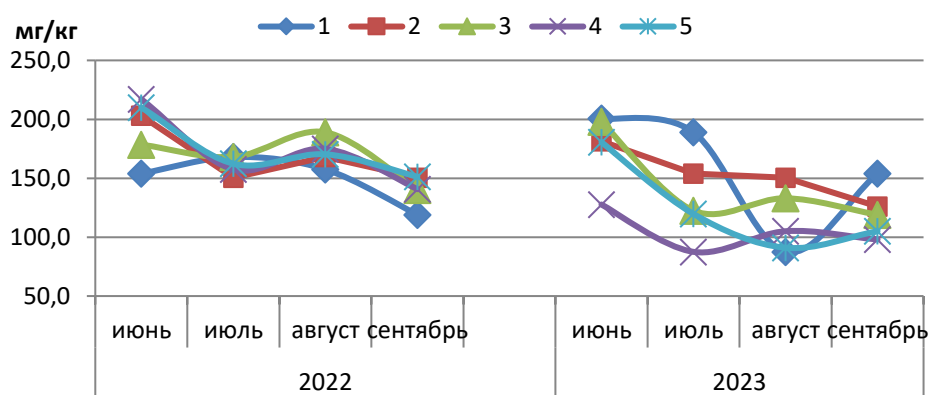


Рисунок 61 - Содержание трудногидролизующего азота (мг/кг) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Непрерывные циклы созидания и разрушения азотистых веществ приводят к накоплению в почве доступных растениям соединений азота. Повышенная и высокая обеспеченность легкогидролизующим азотом 0-40 слоя агрочернозема в посевах яровой пшеницы в период всходов (152-210 мг/кг) постепенно снижается к уборке культуры до средней (119-151 мг/кг) в вегетационный сезон 2022 года (рисунок 62).



А

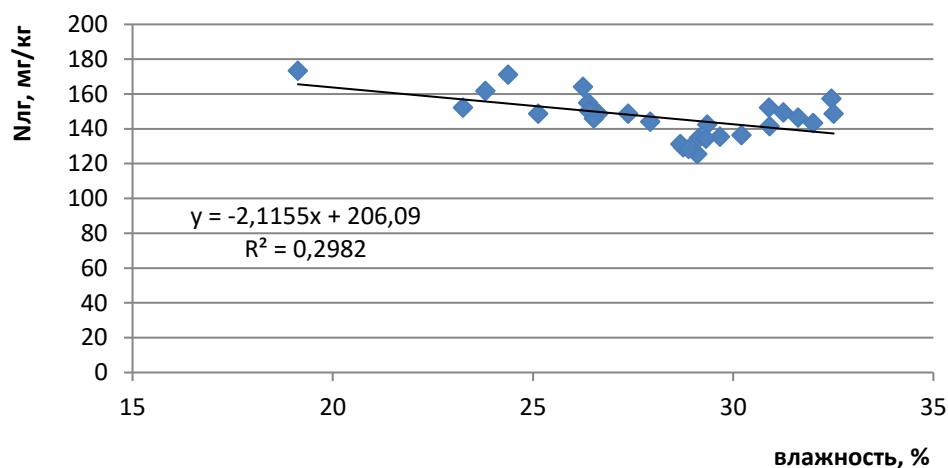


Б

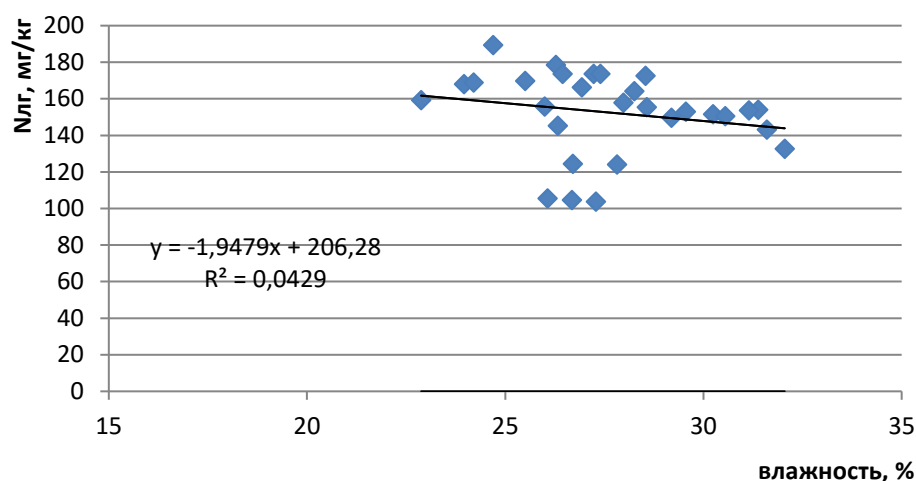
Рисунок 62 - Динамика легкогидролизуемого азота (мг/кг) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Сложные погодные условия вегетационного сезона 2023 года, характеризующиеся периодами дефицита влаги и нормального увлажнения, определяют различный и более выраженный ход динамики Нлг по вариантам опыта от повышенной (198 мг/кг) обеспеченности до низкой (91 мг/кг) ($C_v = 16-32\%$). В динамике гидролизуемого азота под растениями авторами установлено снижение его содержания от весны к лету с последующим небольшим повышением к осени. Резкий спад его содержания в летний период обусловлен интенсивным потреблением этого элемента растениями и ослаблением, вследствие понижения влажности почвы, процессов гидролиза органических соединений.

Исследованиями установлено, что влажность 0-20 см слоя почвы на 30 % влияла на амплитуду сезонной изменчивости содержания легкогидролизуемого азота ($r = -0,55$) (рисунок 63). В подпахотном слое эта оценивается как слабая ($r = -0,20$).



А



Б

Рисунок 63 – Результаты корреляционного анализа влияния влажности на динамику легкогидролизуемого азота в агрочерноземе: А – 0-20 см; Б – 20-40 см ($r_{05} = 0,36$; $n = 30$)

Таким образом, повышение влажности агрочернозема в интервале 26-32 % определяет усиление процессов минерализации легкогидролизуемого азота. Активизация почвенных нитрифицирующих бактерий при альголизации почвы *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* отразилась на оценке содержания легкогидролизуемого азота (таблица 23).

Таблица 23 – Статистические параметры содержания легкогидролизуемого азота в агрочерноземе, %

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г.		2023 г.	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	161,8	18	149,5	26
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	148,8	10	135,6	21
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	143,5	9	144,2	23
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	164,3	10	128,5	19
<i>A. platensis</i> (гранулы)	150,4	10	141,6	25
$p A = 0,0003^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,3378$				
20-40 см				
Контроль	149,6	14	157,8	
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	172,6	19	153,0	15
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	168,0	15	143,2	26
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	168,9	12	104,6	16
<i>A. platensis</i> (гранулы)	173,5	15	124,1	32
$p A = 0,0007^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0000^*$				

Установлено, что в среднем при повышенной обеспеченности легкогидролизуемым азотом в почве отмечается снижение его содержания под действием биопрепаратов (рисунок 64).

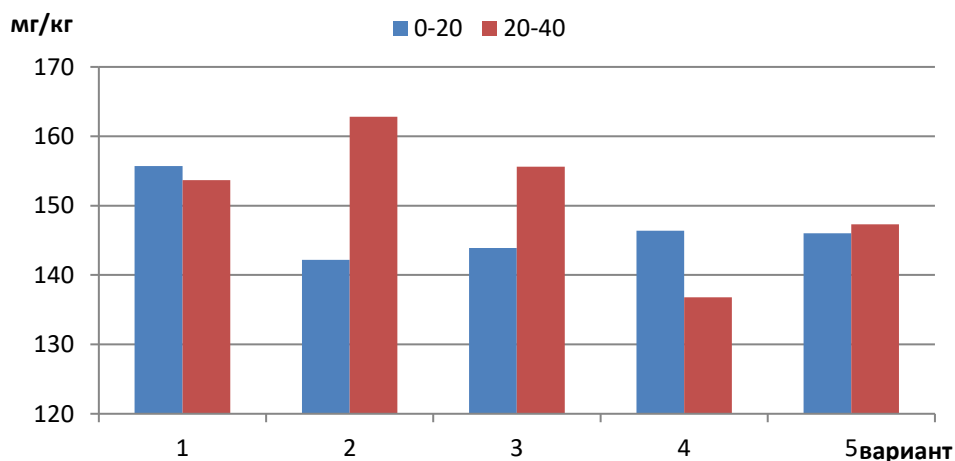


Рисунок 64 - Содержание легкогидролизуемого азота (мг/кг) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита - фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Характер снижения Нлг достоверно определяется формами применяемых в опыте препаратов с микроводорослями ($p = 0,0003-0,0007$) и условиями года ($p = 0,0000$). В среднем за период исследований почва контрольного варианта характеризуется средней обеспеченностью легкогидролизуемым азотом в 0-20 см слое (156 мг/кг). Применение при возделывании яровой пшеницы суспензии *C. vulgaris* и гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* определяет минерализацию Нлг и снижение показателя до 142-146 мг/кг, что соответствует средней обеспеченности. В подпахотном 20-40 см слое агрочернозема тенденция снижения обеспеченности почвы легкогидролизуемым азотом установлена только при применении гранул с цианобактериями *Arthrospira platensis*.

Оценка вклада изученных форм биопрепаратов с микроводорослями позволила установить, что в слоях почвы 0-20 и 20-40 см они оказывают различное влияние на содержание и динамику органических форм азота (рисунок 65).

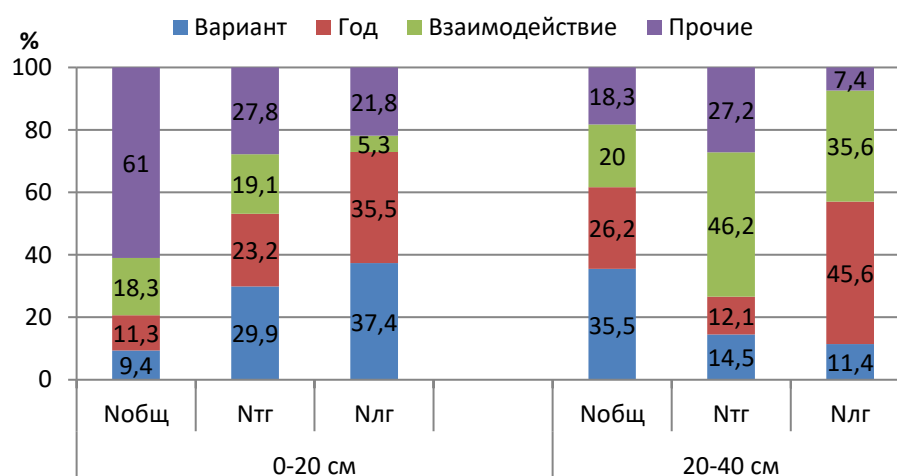


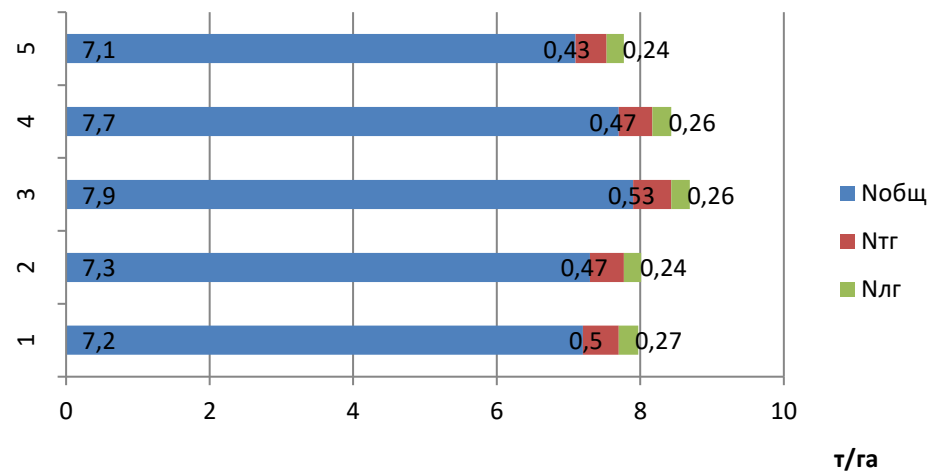
Рисунок 65 - Вклад агроэкологических факторов в содержание органического азота в агрочерноземе, %

В пахотном 20-40 см слое агрочернозема альголизация оказывает наибольшее влияние на содержание гидролизуемых форм азота (30-37 %). Влияние фактора «вариант» на содержание общего азота не превышает 10 %.

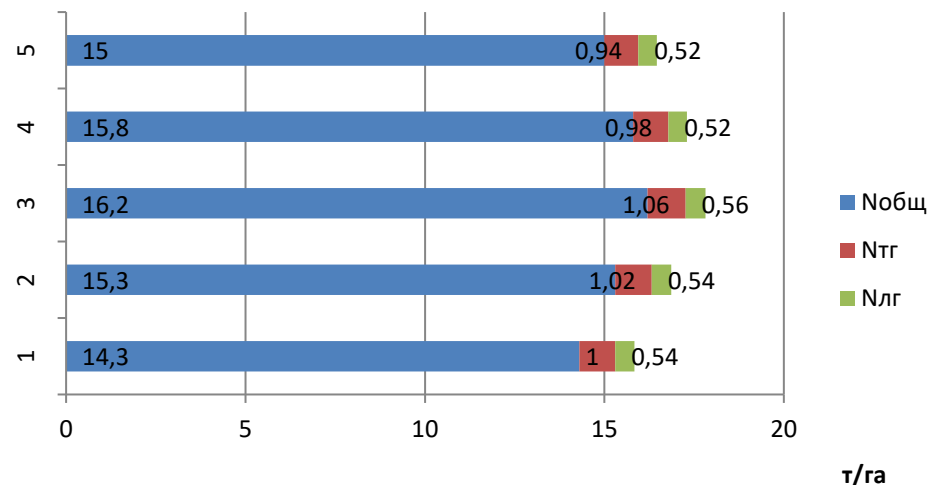
В подпахотном 20-40 см слое почвы оценка влияния изученных препаратов характеризуется минимальным вкладом в содержание трудно-и

легкогидролизуемого азота (15-11 %). В наибольшей степени фактор «год» оказывает влияние на содержание в почве легкогидролизуемого азота (36-46 %).

Запасы органического азота, сформированные в почве под посевами яровой пшеницы, позволили установить различное влияние микроводорослей на его компоненты в почве. Установлено повышение запасов общего азота в 0-20 см слое почвы на 0,1-0,8 т/га на вариантах опыта с микроводорослями по сравнению с контролем (рисунок 66).



А



Б

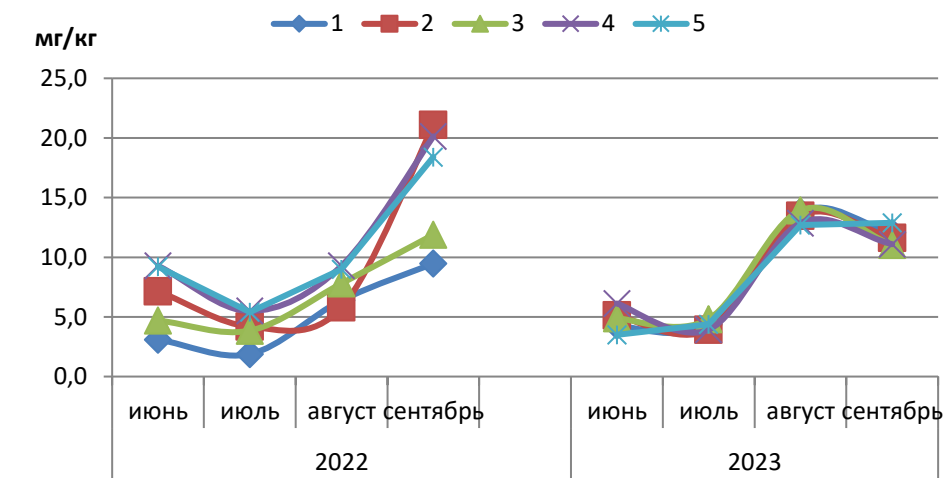
Рисунок 66 - Запасы органического азота (т/га) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 0-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Максимальные запасы общего азота (7,9 т/га) выявлены при применении гранул микроводоросли *C. vulgaris* при возделывании яровой пшеницы. На этом же варианте опыта запасы трудногидролизуемого азота достигали величины 0,53 т/га. На фоне повышения общих запасов азота на 0,1 т/га по сравнению с контролем в случае применения гранул *Arthrospira platensis* отмечается наибольшее (0,5 и 0,27 т/га) увеличение запасов гидролизующихся форм азота, что положительно должно отразиться на содержании минеральных форм азота, доступных для растений.

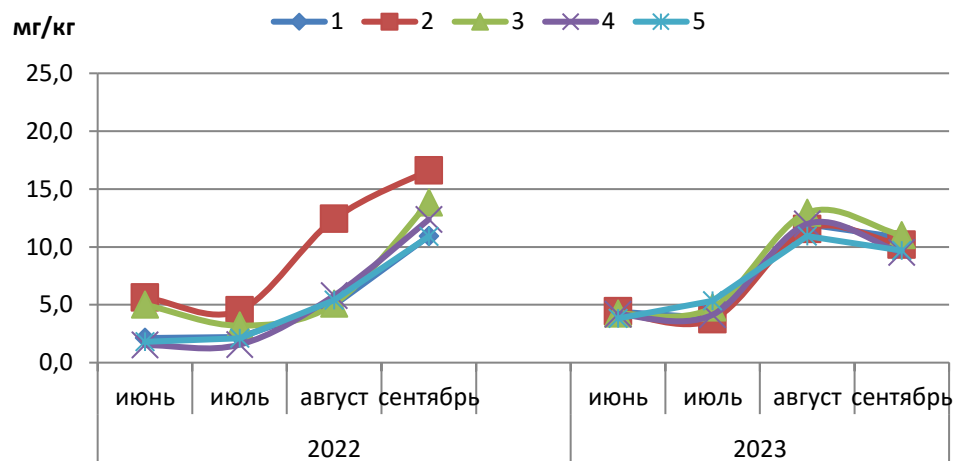
Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что биопрепараты с микроводорослями, используемые в технологии возделывания яровой пшеницы оказывают положительное влияние на накопление в почве органического азота и формируют наибольший пул гидролизующихся форм азота в 0-40 см толще агрочернозема.

Уровни накопления подвижных соединений гумуса и общего азота, включая его гидролизующиеся формы, обуславливают содержание в почве минеральных форм азота. Аммонийный азот почвы является продуктом последовательного ферментативного гидролиза органических веществ, который обуславливается, главным образом, жизнедеятельностью целого ряда различных почвенных микроорганизмов (Robertson, 1997; Zhang et al., 2015; Dejaux et al., 2020). В процессе биохимических превращений и воспроизводства органических веществ почвы аммонийные соединения являются лишь кратковременной стадией. При наличии благоприятных условий в почве аммиачные соединения очень скоро превращаются в нитраты. Известно, что скорость процессов аммонификации и нитрификации зависит от температуры, влажности, реакции среды, содержания органического вещества и от многих других характеристик (Бойцова и др., 2021). Динамические изменения аммонийного азота по годам исследований в 0-40 см слое агрочернозема имеют схожую направленность, выражающуюся в его уменьшении в период активного роста растений. В период колошения пшеницы отмечается снижение содержания $N-NH_4$ в почвенном растворе, к периоду созревания яровой

пшеницы его количество опять повышается (рисунок 67). При этом интенсивность динамики образования и потребления аммонийной формы азота различна.



А



Б

Рисунок 67 - Динамика аммонийного азота (мг/кг) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

В вегетационный сезон 2022 года динамика аммонийного азота более выражена и характеризуется высокой и очень высокой сезонной изменчивостью ($C_v = 51-96\%$). В условиях засушливого 2023 года эти изменения менее выражены

по вариантам опыта ($C_v = 41-58 \%$), что обусловлено не возможностью активизации интенсивности биохимических процессов цикла азота в почве за счет микроводорослей в условиях дефицита воды. По мнению С.И. Новосёлова (2015), жизнедеятельность микроорганизмов, определяющих аммонификационную и нитрификационную способность почв, связана с экологической обстановкой в почве. Оптимальные условия для развития аммонифицирующих и нитрифицирующих бактерий складывались при влажности почвы 75 % от ПВ.

Проведенные исследования свидетельствуют о низкой обеспеченности агрочернозема контрольного варианта в период «всходы – колошение пшеницы» (3-2 мг/кг) в условиях достаточного увлажнения вегетационного сезона 2022 года. Поступление в агроценоз яровой пшеницы микроводорослей в виде суспензии и гранул способствует усилению активизации аммонифицирующих бактерий и появлению в почвенном растворе аммония до 5-20 мг/кг в течение вегетационного сезона.

Таким образом, наиболее интенсивно процессы аммонификации под влиянием микроводорослей были выражены в условиях достаточного увлажнения, что отразилось на величине среднестатистического содержания аммонийного азота (таблица 24). Это связано с тем, что аутохтонные микроорганизмы-аммонификаторы в таких условиях могут быть малоактивны или ограничены другими факторами (например, дефицитом легкоразлагаемого органического вещества). Однако при наличии микроводорослей динамика меняется: их метаболическая активность стимулирует разложение органического азота, а также прямое выделение аммония в процессе отмирания и микробного разложения биомассы.

Исследованиями установлено, что применение 1 % раствора суспензии *Chlorella vulgaris*, гранул *Arthrospira platensis* в чистом виде и при сочетании с гранулами *Chlorella vulgaris* определяет сохранение средней обеспеченности аммонийным азотом в 0-20 см слое почвы (10-11 мг/кг).

Таблица 24 – Статистические параметры содержания аммонийного азота в агрочерноземе, мг/кг

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	5,2	67	8,6	58
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	9,6	81	8,6	55
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	7,1	51	8,7	53
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	11,1	57	8,5	49
<i>A. platensis</i> (гранулы)	10,5	52	8,4	61
$p A = 0,0003^*$; $p B = 0,0250^*$; $p AB = 0,0001^*$				
20-40 см				
Контроль	5,0	82	7,7	55
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	9,8	58	7,5	53
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	6,8	71	8,2	54
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	5,3	96	7,5	52
<i>A. platensis</i> (гранулы)	5,1	82	7,4	41
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0000^*$				

В подпахотном 20-40 см слое средняя обеспеченность аммонийным азотом сохраняется только в случае применения foliarной обработки вегетирующих посевов яровой пшеницы *C. vulgaris* (10 мг/кг). Оценка среднестатистического содержания аммонийного азота в агрочерноземе в условиях 2023 года показала среднюю и низкую обеспеченность им по всем вариантам опыта. В слое 0-20 см содержание аммонийного азота в среднем оценивалось величиной 8-9 мг/кг. На глубине 20-40 см содержание N-NH₄ не превышало 8 мг/кг, что соответствовало низкой обеспеченности показателя.

В целом за период исследований математически доказывается роль микроводорослей в активизации процесса аммонификации в 0-40 см слое агрочернозема ($p = 0,0003-0,0000$) (рисунок 68). В наибольшей степени эта роль выявлена в поверхностном 0-20 см слое почвы, где на всех вариантах опыта установлено увеличение содержания аммонийного азота на 1-3 мг/кг по сравнению с контролем. На глубине 20-40 см увеличение содержания $N-NH_4$ в среднем на 1-2 мг/кг приходится на варианты с *C. vulgaris* в виде суспензии и гранул.

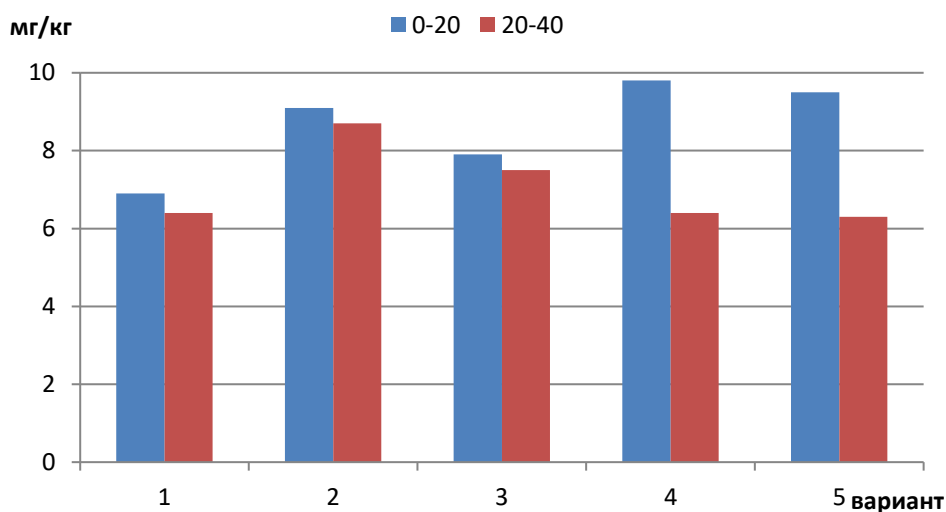
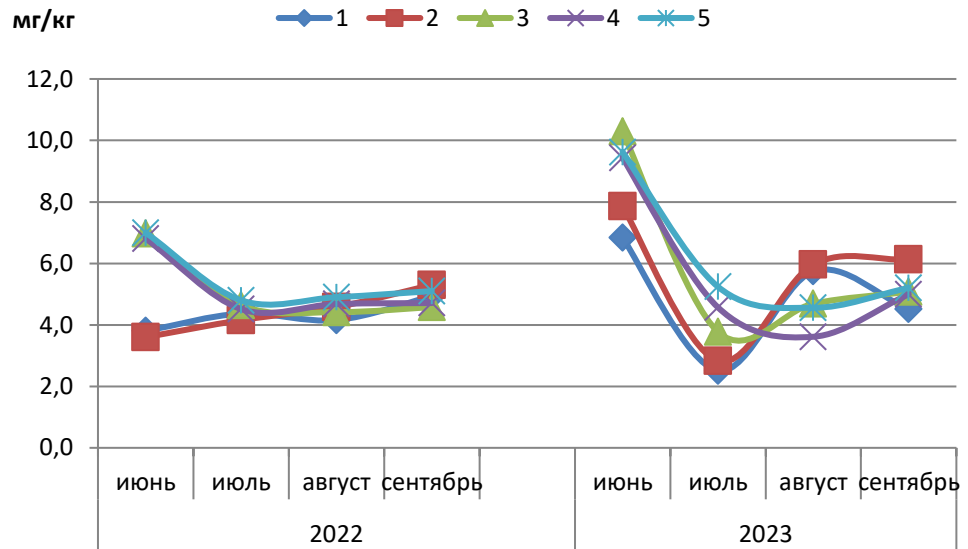


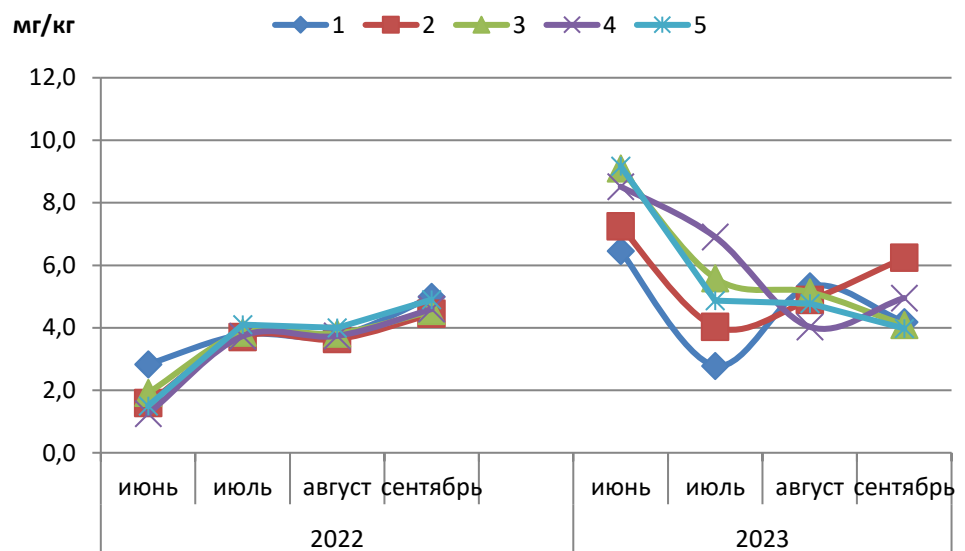
Рисунок 68 - Содержание аммонийного азота (мг/кг) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Нитратная - наиболее лабильная форма почвенного азота. Интенсивность процессов нитрификации дает представление о действительной степени плодородия почв и об общих условиях роста и развития сельскохозяйственных растений (Нестерова, 2003). Ход сезонной динамики нитратного азота представлен на рисунок 69.

Исследованиями установлено, что содержание нитратного азота в почве значительно колеблется по годам исследований. Особенно велико его варьирование в вегетационный сезон 2023 года ($C_v = 25-48 \%$). Колебания в содержании нитратного азота определяется рядом факторов, но прежде всего погодными условиями.



А



Б

Рисунок 69 - Динамика нитратного азота (мг/кг) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

В вегетационный сезон 2022 года в период появления всходов пшеницы почва контрольного варианта и варианта с применением суспензии *C. vulgaris* (обработка в период кущения пшеницы) отличается очень низкой обеспеченностью почвы нитратным азотом (4 мг/кг). Зафиксированное в первой декаде июня существенное похолодание в ночное время, сопровождавшееся заморозками до

минус 5°C, отразилось на накоплении нитратов в почве. Поступление гранул микроводорослей при посеве пшеницы определяет увеличение содержания N-NO₃ до 7 мг/кг. Далее в течение вегетации по всем вариантам опыта сохраняется низкая обеспеченность нитратным азотом (5 мг/кг) на всех вариантах опыта, что обусловлено его выносом культурой.

Ход динамики нитратного азота в вегетационный сезон 2023 года несколько иной (Абакумова, Варганова, 2024). Наблюдения показывают, что в период всходов пшеницы содержание этой формы азота в 0-20 см слое на контрольном варианте и на варианте с применением 1 % суспензии *C. vulgaris* оценивается низкой обеспеченностью (7-8 мг/кг). Поступление в почву гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в чистом виде и в смеси при посеве пшеницы определяет повышение содержания нитратного азота до средней обеспеченности (9-10 мг/кг). Интенсивный рост и развитие пшеницы обуславливают наибольшее потребление минерального азота из почвы в июльский период. Его содержание не превышало в почве 5 мг/кг. Установлено, что на вариантах опыта с применением гранул сохраняется более высокий уровень содержания N-NO₃. В период молочной и полной спелости пшеницы отмечено увеличение содержания нитратного азота за счет отмирания надземного растительного вещества и его минерализации в почве. Ход сезонной динамики нитратного азота в слое 20-40 см агрочернозема имеет несколько иную направленность. Выявлена тенденция постепенного снижения нитратного азота от фазы всходов пшеницы до полной спелости на вариантах опыта с применением гранул микроводорослей при посеве. На контрольном варианте и варианте, где растения пшеницы обрабатывались дважды суспензией *Chlorella vulgaris* и отмечено более заметное снижение нитратного азота в июльский период до 3-4 мг/кг.

При достоверности различий по содержанию нитратного азота в почве по вариантам опыта установлено, что биопрепараты с микроводорослями способствуют повышению концентрации нитратного азота в почвенном растворе ($p = 0,0000$) (таблица 25).

Таблица 25 – Статистические параметры содержания нитратного азота в агрочерноземе, мг/кг

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	4,3	12	4,9	39
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	4,4	16	5,7	37
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	5,2	23	6,0	48
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	5,2	21	5,7	46
<i>A. platensis</i> (гранулы)	5,5	18	6,2	37
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,3414$				
20-40 см				
Контроль	3,8	24	4,7	34
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	3,3	36	5,6	25
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	3,5	31	6,0	37
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	3,3	45	6,1	33
<i>A. platensis</i> (гранулы)	3,6	42	6,0	40
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0000^*$				

Эта закономерность проявляется во все годы исследований, не смотря на несколько отличный уровень накопления N-NO₃ в почве. Фактор «год» имеет достоверную значимость ($p = 0,0000$).

Среднестатистическое содержание нитратного азота в 0-40 см слое агрочернозема контрольного варианта оценивается на уровне 5 мг/кг (рисунок 70). Несмотря на вынос растениями яровой пшеницы элемента и низкую обеспеченность почвы, нитратного азота в агрочерноземе остается больше на вариантах с применением микроводорослей в технологии возделывания культуры. В наибольшей степени накопление нитратного азота отмечается в 0-20 см слое почвы на вариантах опыта с применением гранул *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira*

platensis и их сочетании. На этих вариантах опыта формируется на 1 мг/кг больше нитратного азота, чем на контроле. В подпахотном 20-40 см слое почвы эта тенденция сохраняется, но с меньшим значением содержания N-NO₃ (0,5 мг/кг).

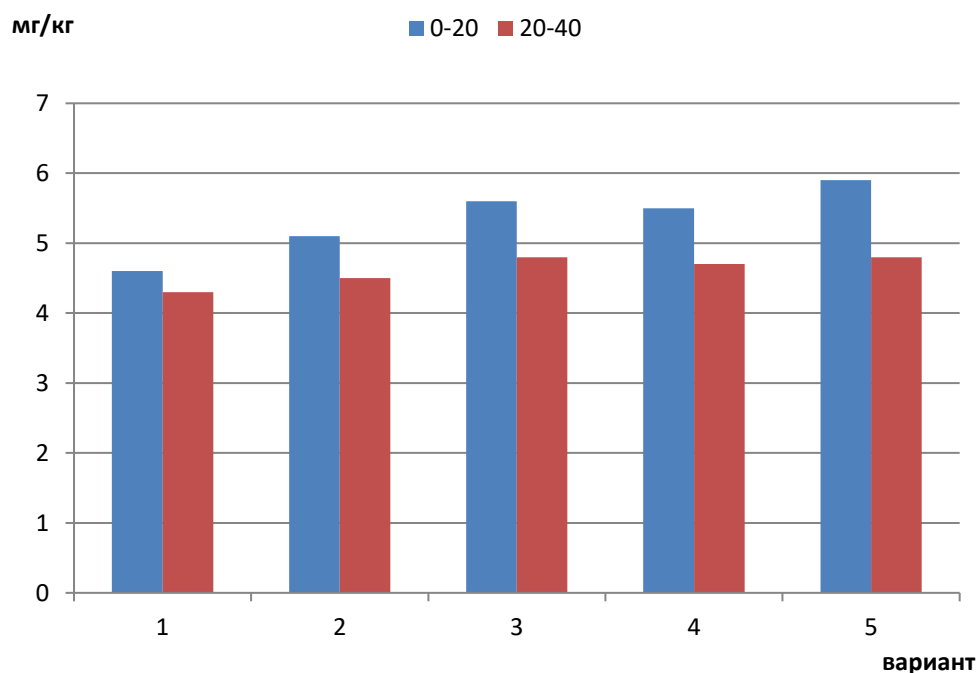
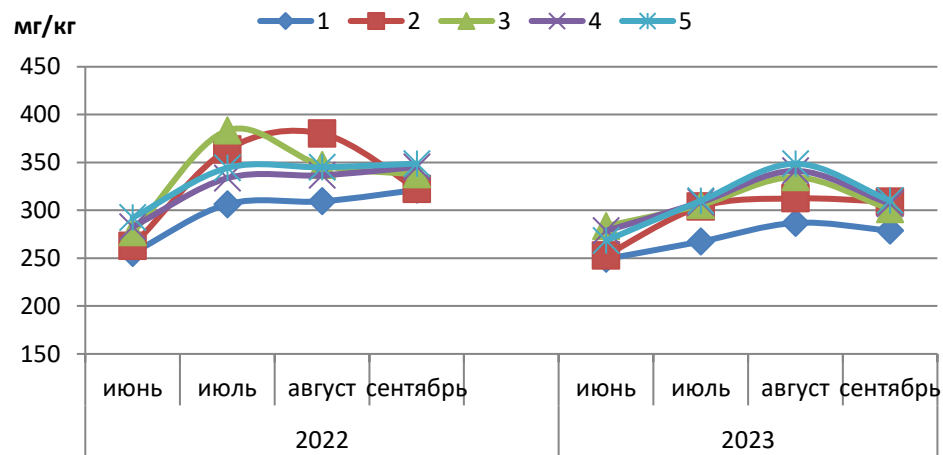
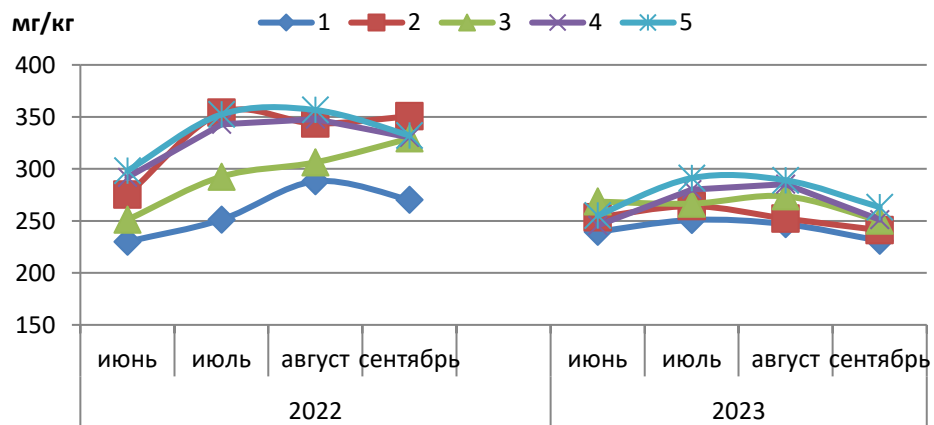


Рисунок 70 - Содержание нитратного азота (мг/кг) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Важнейшим критерием плодородия почв для регулирования их фосфатного режима является содержание в них подвижного фосфора (Берхин и др., 1986). Исследования показали, что агрочернозем опытного поля в период всходов яровой пшеницы в 2022 году отличается высокой (255 мг/кг) обеспеченностью подвижным фосфором в слое 0-20 см (Абакумова, 2023). Его концентрация в почвенном растворе на глубине 20-40 см оценивается как повышенная (230 мг/кг). Припосевное внесение гранул с микроводорослями *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*, а также обработка вегетирующих посевов яровой пшеницы суспензией *C. vulgaris* определяет пополнение почвенного раствора P₂O₅ в 0-40 см слое агрочернозема до очень высокой обеспеченности (рисунок 71).



А



Б

Рисунок 71 - Динамика подвижного фосфора (мг/кг) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Сезонная динамика подвижных фосфатов в 0-20 и 20-40 см слое агрочернозема имеет схожую направленность. Она сопровождается постепенным увеличением содержания подвижного фосфора от периода всходов пшеницы до фазы цветения и молочной спелости, а затем снижение его содержания в почвенном растворе к осени. Незначительная изменчивость подвижного фосфора в 0-40 см толще почвы ($C_v = 8 - 9 \%$) отмечается на варианте совместного внесения гранул при посеве пшеницы *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*. На остальных

вариантах опытах сезонная динамика P_2O_5 имеет небольшую величину, не превышающую 16 % (таблица 26).

Таблица 26 – Статистические параметры содержания подвижного фосфора в агрочерноземе, мг/кг

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	298,1	10	270,6	6
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	332,1	16	294,5	10
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	336,3	13	306,2	7
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	324,6	9	308,8	8
<i>A. platensis</i> (гранулы)	332,6	8	309,3	11
$p A = 0,0203^*$; $p B = 0,0500^*$; $p AB = 0,4411$				
20-40 см				
Контроль	259,9	10	242,0	4
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	330,8	11	252,7	4
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	294,8	11	264,8	4
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	328,2	8	265,5	8
<i>A. platensis</i> (гранулы)	334,8	8	274,6	7
$p A = 0,0055^*$; $p B = 0,0241^*$; $p AB = 0,1234$				

Схожий ход сезонной динамики подвижного фосфора выявлен и в вегетационный сезон 2023 года ($C_v = 4-10 \%$). Высокая обеспеченность агрочернозема P_2O_5 в слое 0-20 см на контрольном варианте сохраняется в течение вегетации яровой пшеницы с тенденцией повышения показателя к августу до 287 мг/кг. Применение микроводорослей в виде суспензии и гранул повышает концентрацию подвижных фосфатов до 310-349 мг/кг в период от цветения пшеницы до уборки культуры. На глубине почвы 20-40 см выявлено схожее

влияние микроводорослей при сохранении высокой обеспеченности элементом (267-291 мг/кг).

В среднем накопление элемента в почвенном растворе под влиянием микроводорослей в 0-20 см слое по годам исследований имеет близкую величину (38-27 мг/кг). В подпахотном 20-40 см слое в 2022 году прирост содержания P_2O_5 в агрочерноземе составляет 75-35 мг/кг, в 2023 году – 33-11 мг/кг по вариантам опыта. Установлено, что сезонное варьирование подвижного фосфора в агрочерноземе в 2022 году имеет более выраженный характер и зависит от формы применяемого для альголизации биопрепарата. Опрыскивание посевов яровой пшеницы 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* вызывает более существенные изменения в ходе сезонной динамики показателя в 0-20 см слое агрочернозема ($C_v = 16-10 \%$).

Обеспеченность агрочернозема подвижным фосфором за период исследований показывает достоверное увеличение показателя на вариантах опыта с микроводорослями ($p = 0,0203-0,0055$) (рисунок 72). В слое почвы 0-20 см прирост P_2O_5 по сравнению с контрольным вариантом составляет 37-29 мг/кг, 20-40 см – 54-29 мг/кг. Максимальное содержание подвижного фосфора установлено в 0-40 см слое агрочернозема на варианте с внесением гранулы *Arthrospira platensis* (321-305 мг/кг).

Почвенный цикл фосфора включает в себя одновременно протекающие разнонаправленные процессы (Рудой, 2004). В почве происходит иммобилизация органическим веществом фосфора почвенного раствора и минерализация органических веществ, которая сопровождается поступлением фосфора в почвенный раствор. Определенный вклад в эти процессы дают микроводоросли, поступившие в агроценоз яровой пшеницы и почву. Известно, что биомасса наиболее продуктивных микроводорослей, таких как *Chlorella vulgaris* и цианобактерия *Arthrospira platensis*, содержит до 60 % высококачественного белка, витаминов и ценных кислот (Базарнова и др., 2018). Фосфор входит в состав нуклеиновых кислот, фосфолипидов и других элементов. Кроме того,

использование микроводорослей повышает доступность для высших растений ряда важных питательных веществ, в том числе фосфора (Goncalves, 2021).

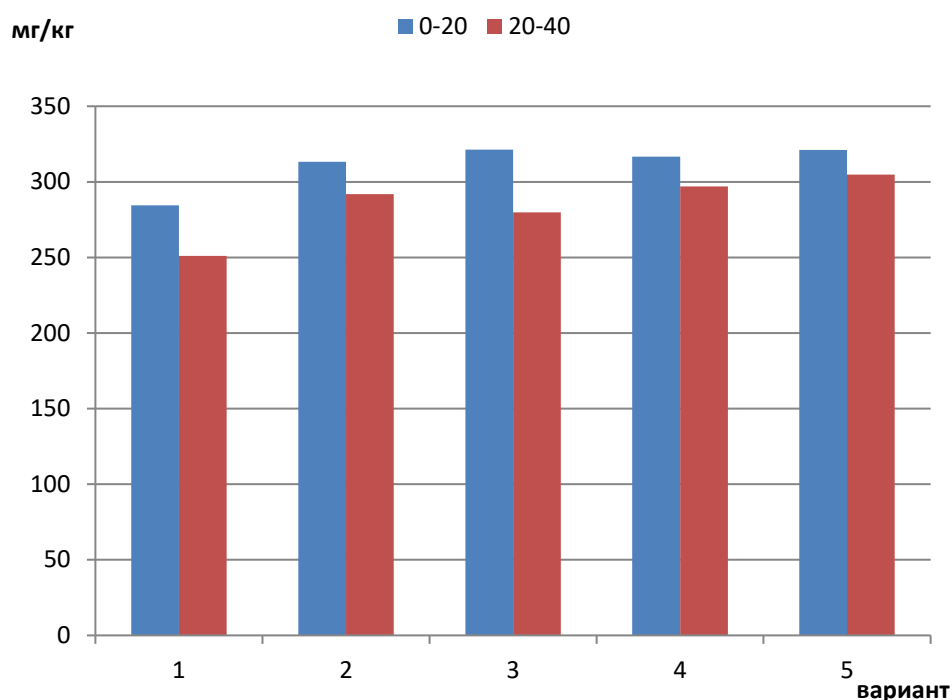
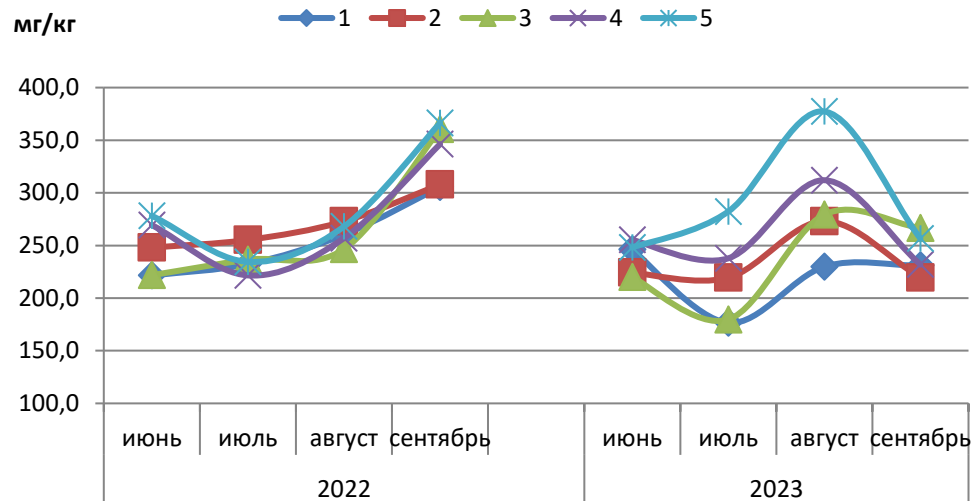


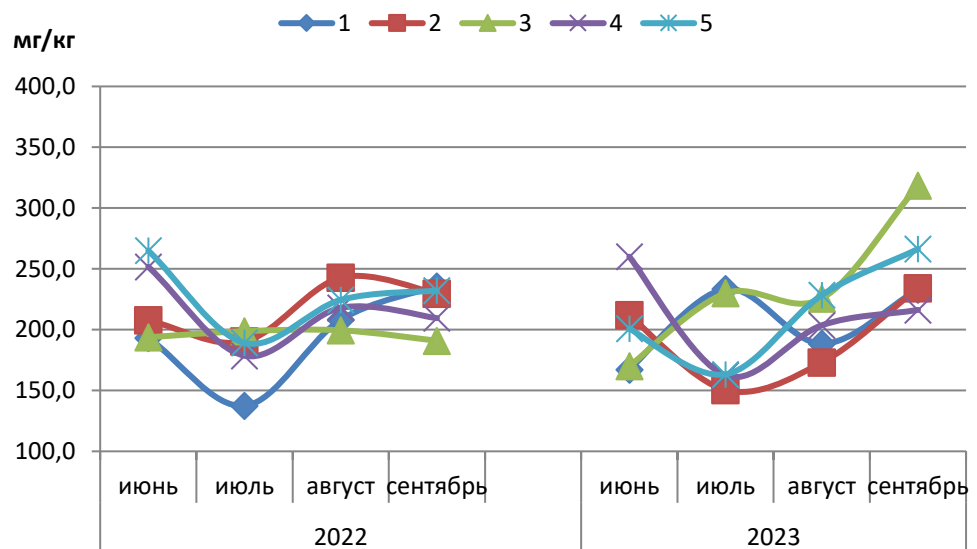
Рисунок 72 - Содержание подвижного фосфора (мг/кг) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Почвенные условия калийного питания растений определяются, прежде всего, минералогическим и гранулометрическим составом. От этого зависит как абсолютное количество калия в почве, так и его относительная доступность растениям. Тяжелый гранулометрический состав агрочерноземов опытного поля определил очень высокую и высокую обеспеченность обменным калием (рисунок 73).

В верхнем 0-20 см слое агрочернозема установлена очень высокая обеспеченность обменным калием, в 20-40 см слое содержание K_2O изменяется от высокого до очень высокого в течение вегетационного сезона.



А



Б

Рисунок 73 - Динамика обменного калия (мг/кг) в агрочерноземе (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

В целом сезонный ритм обменного калия неустойчивый по годам исследований и по слоям почвы ($C_v = 3-26\%$) (таблица 27).

Таблица 27 – Статистические параметры содержания обменного калия в агрочерноземе, мг/кг

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	254,9	15	220,8	14
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	271,1	10	234,1	11
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	266,4	24	236,4	19
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	273,6	19	259,2	14
<i>A. platensis</i> (гранулы)	286,8	20	291,0	20
$p A = 0,0040^*$; $p B = 0,0001^*$; $p AB = 0,0002^*$				
20-40 см				
Контроль	193,6	21	205,6	16
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	217,6	11	192,3	20
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	195,8	3	236,0	26
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	214,5	14	210,6	19
<i>A. platensis</i> (гранулы)	227,7	14	214,7	20
$p A = 0,0500^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0001^*$				

В вегетационный сезон 2022 года в корнеобитаемом слое почвы отмечается постепенное повышение содержания обменного калия к послеуборочному периоду. В засушливый 2023 год отмечается существенное увеличение обменного калия до 377 мг/кг в фазу молочной спелости пшеницы. Особенно это хорошо проявляется на вариантах опыта с применением микроводорослей.

По мнению П.С. Бугакова с соавт. (1981), причинами накопления калия в верхнем слое являются биогенные процессы, влияние механических обработок почвы, действие удобрений, а также отсутствие подвижности этого элемента в тяжелых почвах. Благодаря неравномерности выпадения осадков наблюдается чередование периодов сильного иссушения почвы и ее обильного смачивания. Все

это способствует высвобождению и фиксации калия и, следовательно, сезонной изменчивости содержания его форм.

Исследованиями установлено, что поступление микроводорослей в агроэкосистему в виде суспензии или гранул определяет достоверное повышение в почве обменного калия по сравнению с контролем ($p = 0,0040-0,0500$). При очень высокой обеспеченности агрочернозема обменным калием под влиянием микроудобрений отмечается увеличение содержания K_2O на 14-51 мг/кг в слое 0-20 см и 5-22 мг/кг в слое 20-40 см (рисунок 74). Максимальное содержание обменного калия, достигающее 289-221 мг/кг в 0-40 см слое почвы, приходится на вариант с применением гранул *A. platensis* при возделывании яровой пшеницы. Это соответствует результатам, полученным по действию цианобактерий на содержание подвижного фосфора в почве.

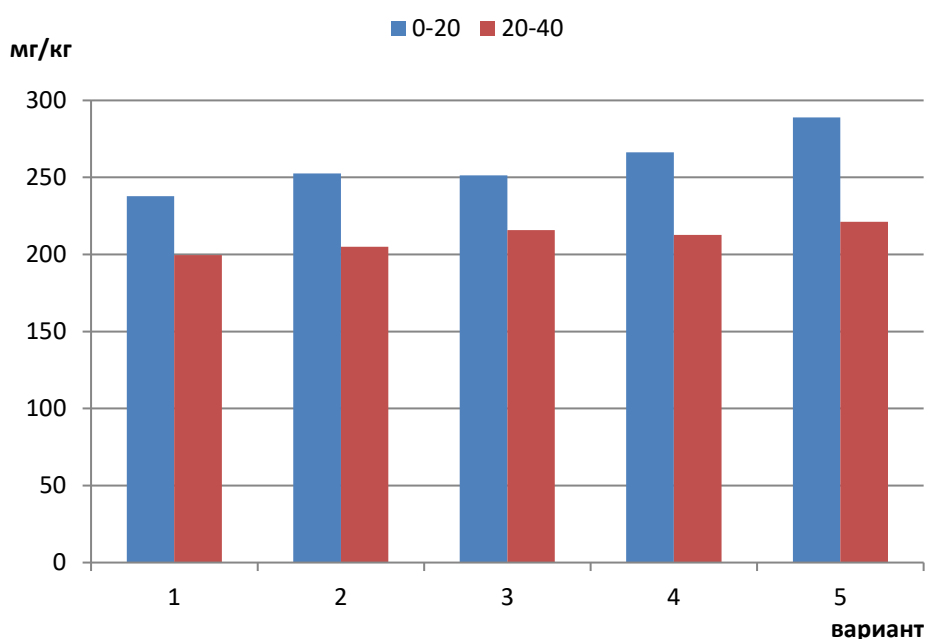


Рисунок 74 - Содержание обменного калия (мг/кг) в агрочерноземе на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

В научной литературе имеются данные о том, что цианобактерии лучше подходят в качестве биологических индикаторов землепользования и могут

улучшить состояние и плодородие почвы (Chamizo et al., 2018). В работах Е.С. Odjadjare et al. (2017), Е. Alobwede et al. (2019) показано, что микроводоросли в качестве биоудобрений обогащают почву азотом, фосфором, калием и значительным количеством микроэлементов.

Анализ вклада биопрепаратов с микроводорослями в регулирование пищевого режима показал, что фактор «вариант» опыта на 37-41 % определяет обеспеченность 0-20 см слоя агрочернозема доступными элементами питания (рисунок 75). Фактор «год» оказывает существенное влияние только на содержание в 0-40 см слое почвы аммонийного азота (35-87 %). Ряд исследований показали, что после полива огурцов, помидоров и перца жидким удобрением из микроводорослей с разной концентрацией значительно увеличивалось содержание щелочегидролизуемого азота, органических веществ в почве, доступного фосфора и калия, а также в разной степени повышалась активность ферментов в почве, таких как протеаза, каталаза и т. д. (Alobwede и др., 2019; Deepika, MubarakAli, 2020).

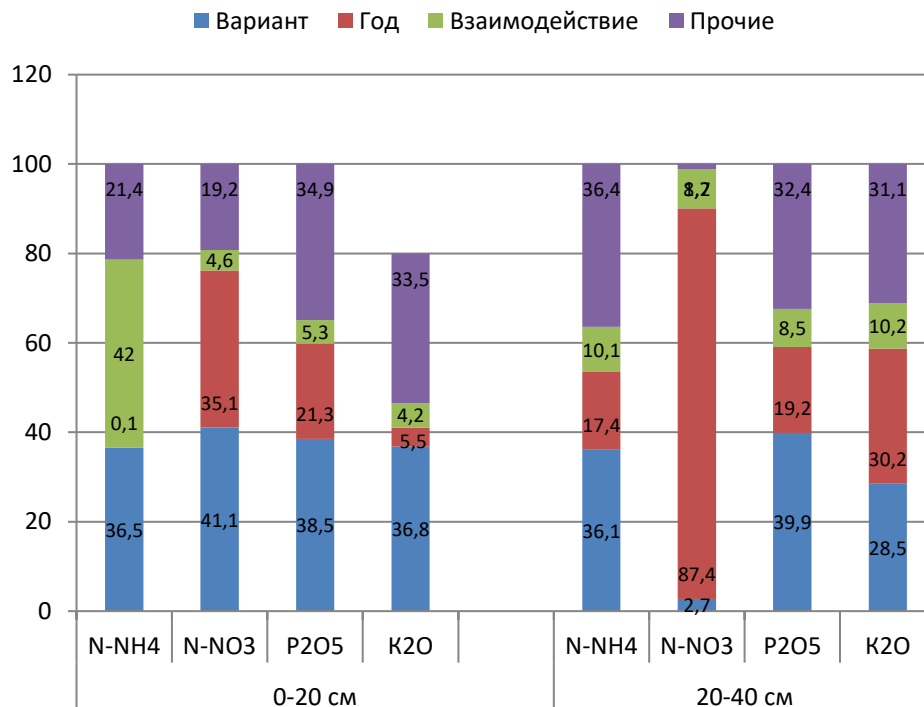


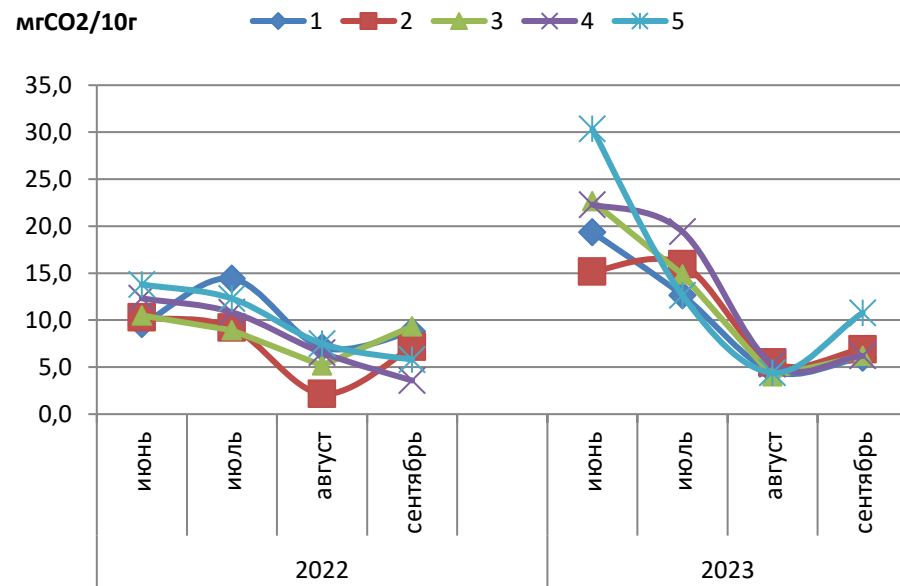
Рисунок 75 - Вклад агроэкологических факторов в содержание доступных элементов питания в агрочерноземе, %

Таким образом, микроводоросли оказывают положительную роль в регулировании пищевого режима агрочерноземов Красноярской лесостепи, в круговороте питательных веществ в почве через продуцирование биологически активных веществ и улучшение их усвоения растениями.

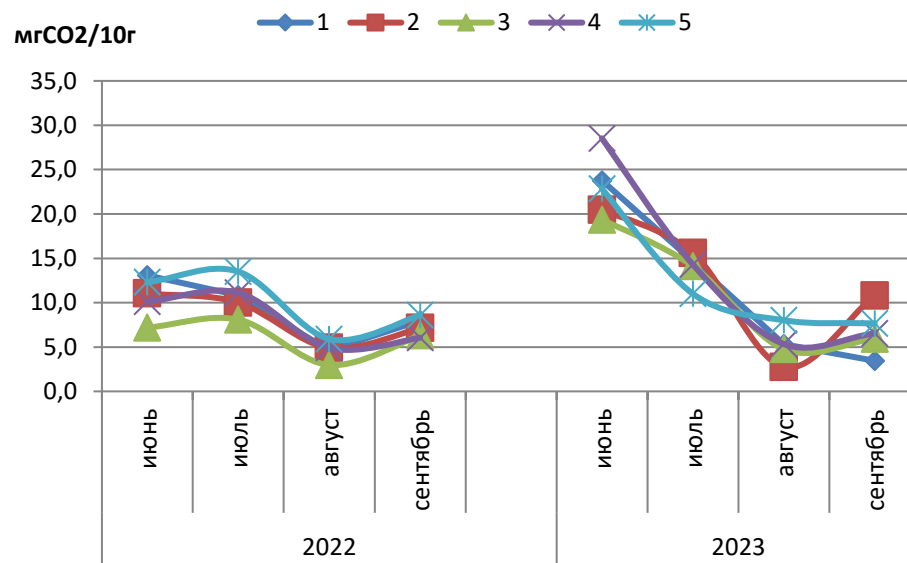
6.4 Биологическая активность почвы

Биохимические процессы, протекающие в почвенном покрове, сопровождаются различными явлениями, в том числе и выделением углекислого газа, который служит показателем минерализации органического вещества и признаком, указывающим на активность микроорганизмов. Количество биомассы в определенный момент времени свидетельствует о степени активности организмов участвующих в ее разложении, а динамика – на направление этих процессов. Образование углекислого газа с поверхности почвы в атмосферу складывается из биохимических и микробиологических процессов, протекающих в почве (Мокроносов, Кудеяров, 1998). На эмиссию диоксида углерода с поверхности почвы активно влияют климатические и агробиоценотические факторы (Кураченко, Бопп, 2016). Наблюдения на режим потенциальной эмиссии CO_2 агрочернозема подтверждают значительную роль погодных условий вегетационных сезонов. Сложившиеся в мае-июне 2022 года аномальные погодные условия, характеризующиеся высокой среднесуточной температурой в мае и существенным похолоданием в первой декаде июня (до минус 5°C) отразились на динамике дыхания почвы (рисунок 76).

В период всходов яровой пшеницы эмиссия CO_2 по вариантам опыта оценивается на близком уровне по слоям почвы (10-14 и 7-13 $\text{mgCO}_2/10\text{г}$ соответственно) и соответствует средней биологической активности. Такой же уровень интенсивности потенциального дыхания почвы сохраняется до фазы цветения пшеницы.



А



Б

Рисунок 76 - Динамика потенциальной интенсивности дыхания (mgCO₂/10г) агрочернозема (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Далее к периоду молочной и полной спелости связи со снижением температуры почвы интенсивность дыхания почвы уменьшается до очень слабой и слабой (2-4 mgCO₂/10г) при средней и высокой сезонной изменчивости показателя ($C_v = 27-50\%$) (таблица 28).

Таблица 28 – Статистические параметры потенциальной активности дыхания агрочернозема, $\text{мгCO}_2/10\text{г}$

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	10,0	31	10,7	64
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	7,2	50	10,9	78
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	8,5	27	11,9	71
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	8,3	48	13,3	66
<i>A. platensis</i> (гранулы)	9,9	38	14,5	77
$p A = 0,0130^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0943$				
20-40 см				
Контроль	9,1	41	11,8	80
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	8,3	34	12,4	60
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	6,1	36	11,0	63
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	8,0	38	13,7	78
<i>A. platensis</i> (гранулы)	10,1	35	12,4	59
$p A = 0,1987$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,5298$				

Более высокая сезонная изменчивость дыхания почвы установлена в вегетационный сезон 2023 года. Высокая и очень высокая биологическая активность 0-40 см слоя почвы по показателю эмиссии CO_2 (15-30 $\text{мгCO}_2/10\text{г}$) к августу сменяется на очень слабую (4-5 $\text{мгCO}_2/10\text{г}$) ($C_v = 59-80 \%$).

Оценка средней интенсивности выделения углекислого газа из почвы, полученная в течение вегетационного сезона позволяет утверждать, что при поступлении микроводорослей в агроценоз яровой пшеницы значение показателя сохраняется на уровне контроля или снижается. В большей степени эта закономерность проявляется при использовании в технологии возделывания яровой пшеницы микроводоросли *Chlorella vulgaris* не зависимо от формы её

применения. Поступление в почву гранул *Arthrospira platensis* способствует небольшому усилению интенсивности дыхания почвы до 10-15 мгСО₂/10г. Установлено, что достоверные изменения в потенциальной активности дыхания почвы проявляются только в верхнем 0-20 см слое ($p = 0,0130$). В большей степени различия по изучаемому параметру определяются фактором «год».

Потенциальная активность дыхания агрочернозема за период исследований подтверждает, что поступление микроводоросли *Chlorella vulgaris* снижает выделение углекислого газа из почвы. В среднем за период наблюдений в 0-20 см слое агрочернозема отмечается снижение выделение СО₂ на 1,3 мг/10г по сравнению с контролем (рисунок 77).

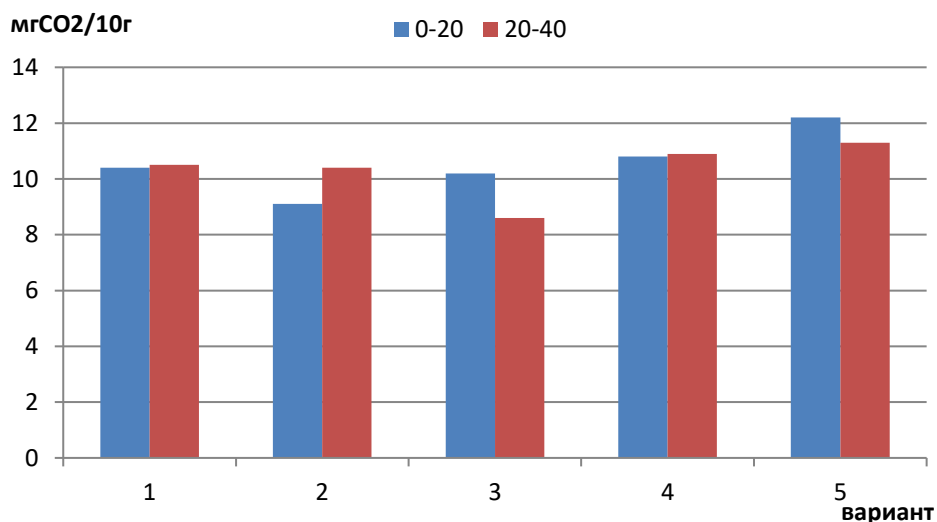


Рисунок 77 - Потенциальная активность дыхания агрочернозема (мгСО₂/10г) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Полученные результаты связаны с тем, что биомасса микроводорослей *C. vulgaris* способна активно поглощать СО₂ в результате фотосинтеза. При этом выделяется кислород и увеличивается их биомасса (Дворецкий и др., 2022; Политаева и др., 2023). Исследованиями N.C. Bhatt et al. (2014) доказано, что 100 т биомассы микроводорослей улавливают порядка 183 т углекислого газа. Поступление в почву гранул с *Arthrospira platensis* увеличивает эмиссию СО₂ на

1,8-0,8 мг/10г. Процесс фиксации углекислого газа микроводорослями высокоэффективен.

Полученные результаты позволяют заключить, что эмиссия CO₂ как индикатор биологической активности почв в случае применения микроводоросли *Chlorella vulgaris* является не надёжным показателем. В отношении цианобактерий исследованиями Б.Ю. Юсуповой и М.С. Аймахановой (2025) было установлено, что цианобактерии оказывают стимулирующее действие на почвенную микрофлору, резко изменяя ход микробиологических процессов в почве. Количество продуцированной CO₂ из почвы повышалось на варианте с цианобактериями во все фазы вегетации хлопчатника.

Ферменты в почве играют основную роль в процессах трансформации органических веществ, они могут реагировать на изменение условий функционирования, как естественных биоценозов, так и агроэкосистем (Алексеева, Фомина, 2014). Особое внимание стоит уделить тому, что ферменты почвенных микроорганизмов способны в течение длительного периода времени сохранять свою активность и, принимать участие в синтезе и распаде гумуса, гидролизе органических соединений, остатков высших растений и микроорганизмов, способствуют переводу элементов питания в доступное состояние (Куликова и др., 2017). Уреаза – фермент, участвующий в трансформации азотных соединений. Изменение её активности указывает на нарушение способности почвы эффективно осуществлять азотный обмен, а, следовательно, и поддерживать экологический баланс в экосистеме. Активность уреазы находится в прямо пропорциональной зависимости от количества органического углерода в почве. Азотфиксация представляет собой последовательность ферментативных реакций с образованием аммиака и последующим превращением аммиака в аминокислоты и белки. Ведущая роль в этом процессе принадлежит зелёной микроводоросли *Chlorella vulgaris* и цианобактерии *Arthrospira platensis*, которые, в отличие от гетеротрофных азотфиксаторов, не требуют для усвоения молекулярного азота готового органического вещества, а сами привносят его в почву (Стифеев, 2014).

Существует мнение о том, что применение биологических препаратов может оказывать влияние на уреазную активность почвы (Матявина, 2020; Кураченко и др., 2023).

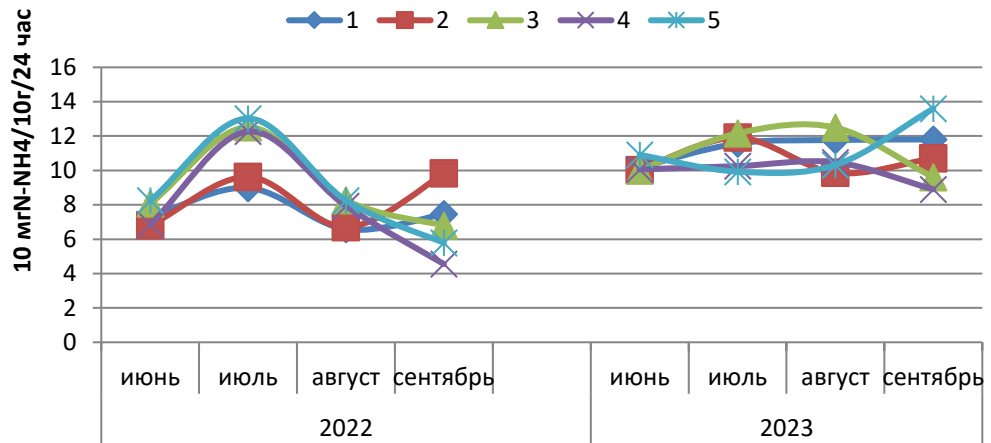
Микроводоросли играют значительную роль в повышении уреазной активности почв. Они способны синтезировать уреазу или стимулировать её выработку ассоциированными бактериями. Метаболиты микроводорослей служат субстратом для уреазообразующих микроорганизмов. При фотосинтетической активности, выделяемый микроводорослями кислород создает благоприятные условия для развития микроорганизмов-амонификаторов в ризосфере.

Наблюдения за активностью уреазы в агрочерноземе при возделывании яровой пшеницы показали различную динамику показателя по годам исследований. Установлено, что наиболее выраженный характер динамики активности уреазы приходится на вегетационный сезон 2022 года, отличающийся теплой и влажной погодой. Коэффициент сезонного варьирования показателя достигает 39-53 % (рисунок 78).

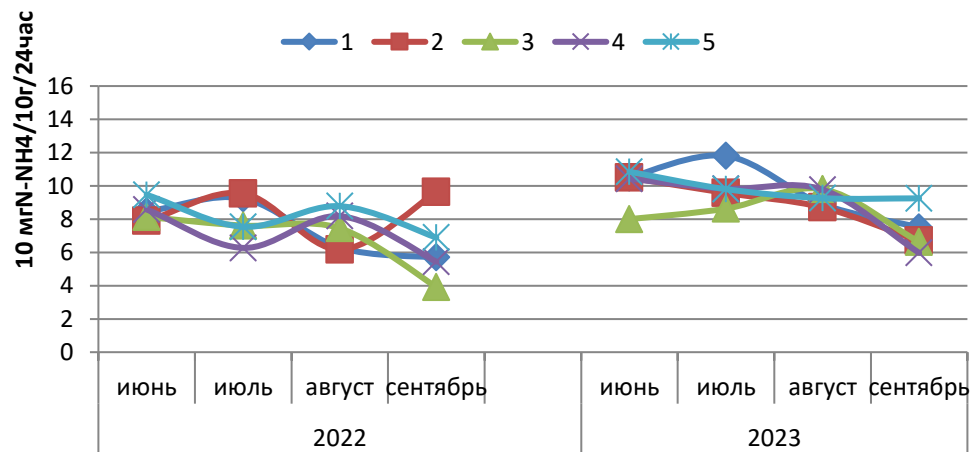
Слабая уреазная активность 0-20 см слоя агрочернозема в период всходов яровой пшеницы отмечается на всех вариантах опыта (7-8 мг N-NH₄/10г/24 час). В июльский период происходит пик уреазной активности. Максимальная активность уреазы, достигающая средней величины, была отмечена на вариантах опыта с внесением гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в почву при посеве яровой пшеницы (12-13 мг N-NH₄/10г/24 час). К периоду молочной и полной спелости пшеницы активность уреазы вновь снижается до 5-10 мг N-NH₄/10г/24 час. В подпахотном 20-40 см слое почвы на фоне слабой уреазной активности (4-10 мг N-NH₄/10г/24 час) отмечается постепенное снижение показателя к сентябрьскому периоду (Cv = 23-53 %).

Засушливые и тёплые условия вегетационного сезона 2023 года определяют иной характер динамики активности уреазы в почве. В этот сезон средняя активность фермента в 0-20 см слое агрочернозема проявляется на всех вариантах опыта и стабильно сохраняется в течение вегетационного сезона (Cv = 15-27 %). В

20-40 см слое агрочернозема отмечен тренд снижения активности уреазы к осеннему периоду.



А



Б

Рисунок 78 - Динамика уреазной активности (10 мг N-NH₄/10г/24 час) агрочернозема (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Результаты дисперсионного анализа (таблица 29) показывают, что применяемые в опыте биопрепараты на основе микроводорослей достоверно влияют на активность уреазы в почве ($p = 0,0381-0,0091$).

Таблица 29 – Статистические параметры активности уреазы в агрочерноземе, N-NH₄/10г/24 час

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	<i>X_{ср}</i>	<i>C_v</i> , %	<i>X_{ср}</i>	<i>C_v</i> , %
0-20 см				
Контроль	7,6	13	11,3	7
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	8,2	21	10,6	8
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	8,9	28	11,1	14
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	7,9	41	9,9	7
<i>A. platensis</i> (гранулы)	8,8	34	11,2	24
$p A = 0,0381^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,2118$				
20-40 см				
Контроль	7,4	23	9,7	20
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	8,3	19	8,9	18
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	6,8	28	8,3	16
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	7,1	21	9,0	22
<i>A. platensis</i> (гранулы)	8,2	15	9,8	8
$p A = 0,0091^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,1722$				

Достоверность влияния фактора «год» на содержание уреазы в почве оценивается на уровне $p = 0,0000$. В наибольшей степени влияние микроводорослей на активность уреазы проявляется в вегетационный сезон 2022 года. На фоне слабой активности уреазы в этот сезон для 0-20 см слоя агрочернозема отмечается увеличение показателя на 1,3-0,3 N-NH₄/10г/24 час по сравнению с контрольным вариантом. Исследованиями А.С. Соловьева и Э.Х. Сакаева (2020) по влиянию микроводоросли *Chlorella vulgaris* на уреазную активность почвы при различном уровне загрязнения смазочно-охлаждающей жидкостью было доказано различное действие на активность фермента. Использование субстрата микроводоросли *Chlorella vulgaris* стимулирует выработку уреазы при низких (10 г/кг) и

экстремально высоких (100 г/кг) концентрациях загрязнителя, но снижает её активность при средней (30 г/кг) и значительной (50 г/кг) концентрации.

Оценка среднестатистической величины активности уреазы за период наблюдений показала её максимальное значение, достигающее средней величины биологической активности почвы на вариантах опыта с внесением в почву гранул *C. vulgaris* и *A. platensis* (10 мг N-NH₄/10г/24 час). Эта закономерность проявляется только для слоя почвы 0-20 см (рисунок 79).

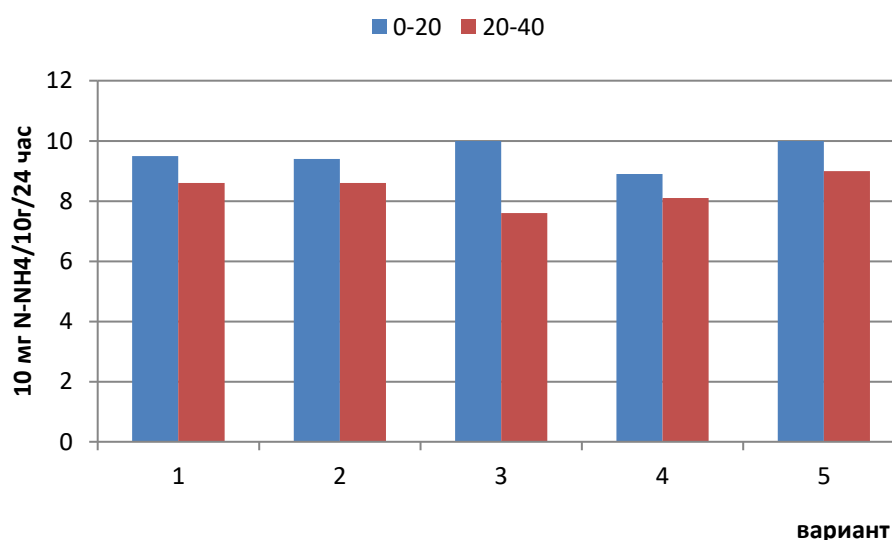


Рисунок 79 - Активность уреазы в агрочерноземе (N-NH₄/10г/24 час) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Таким образом, активность уреазы в слоях агрочернозема 0-20 и 20-40 см и характер её динамики определяется погодными условиями вегетационных сезонов. Внесение в почву при посеве гранул с микроводорослями *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* определяют повышение активности уреазы до 10 мг N-NH₄/10г/24 час.

Активность в почве каталазы, так же, как и инвертазы является индикатором интенсивности процессов минерализации органического вещества и его доступности (Воронин, 2006). По мнению Ф.Х. Хазиева (2018), ферментативный потенциал почвы и его динамику следует рассматривать как совокупность

процессов поступления ферментов в почву, из стабилизации (иммобилизации) и действия (активности) в почве. Автором показано, что динамика ферментативной активности почв весьма различна как по направлению, так и по амплитудам колебаний во времени, в основном в зависимости от гидротермического режима в почве. Вышесказанное в полной мере согласуется с результатами исследований (рисунок 80).

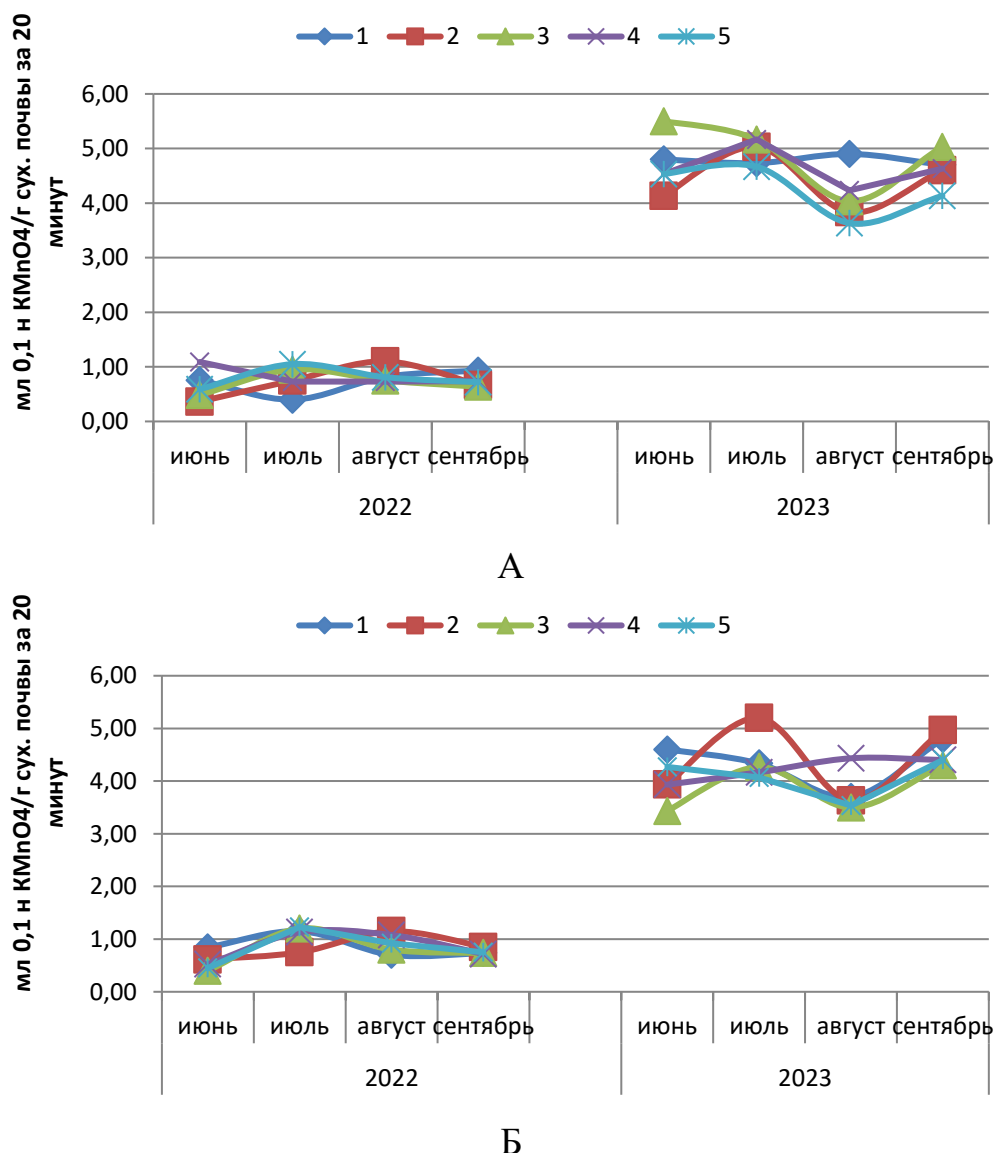


Рисунок 80 - Динамика каталитической активности (мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут) агрочернозема (А – 0-20 см; Б – 20-40 см) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы)

Установлено, что активность каталазы в агрочерноземе существенно различается по годам при схожей динамике показателя по вариантам опыта ($p =$

0,0000). В вегетационный сезон 2022 года проявляется очень слабая и слабая активность каталазы в 0-40 см слое агрочернозема (1,23-0,40 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут) при средней вариабельности сезонной динамики показателя ($C_v = 22-42\%$) и тенденцией увеличения каталитической активности почвы в июле и в августе (таблица 30). В условиях 2023 года уровень активности каталазы значительно выше и оценивается на среднем уровне (3,43-5,50 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут). Пик активности фермента приходится на период цветения яровой пшеницы и после её уборки. При наличии статистически достоверных различий по величине активности каталазы в 0-20 см слое агрочернозема ($p = 0,020$) выявить стабильно, проявляющихся закономерностей в изменении показателя под влиянием микроводорослей по годам исследований не получилось (таблица 30).

Таблица 30 – Статистические параметры активности каталазы в агрочерноземе, мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)			
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)	
	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$	\bar{X}_{cp}	$C_v, \%$
0-20 см				
Контроль	0,73	32	4,78	2
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	0,72	42	4,40	12
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	0,71	28	4,93	13
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	0,82	22	4,64	8
<i>A. platensis</i> (гранулы)	0,79	24	4,24	11
$p A = 0,0020^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0003^*$				
20-40 см				
Контроль	0,86	23	4,36	20
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	0,84	27	4,43	17
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	0,78	41	3,88	12
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	0,86	34	4,23	5
<i>A. platensis</i> (гранулы)	0,84	39	4,07	9
$p A = 0,2140$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,3055$				

Так, в вегетационный сезон 2022 года внесение в почву гранул микроводорослей *Arthrospira platensis* и *Chlorella vulgaris* + *Arthrospira platensis* определяет повышение каталитической активности в 0-20 см слое в среднем за сезон до 0,79-0,82 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут, что на 0,06-0,09 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут больше по сравнению с контролем. Полученные результаты в 2023 году не подтвердились. Здесь максимальная активность каталазы была отмечена на варианте с внесением в почву гранул *C. vulgaris* (4,93 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут). В среднем за период наблюдений на этом варианте опыта в 0-20 см слое агрочернозема формировалась максимальная активность каталазы (2,82 мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут) (рисунок 81). На остальных вариантах опыта каталитическая активность почвы была на уровне контрольного варианта опыта.

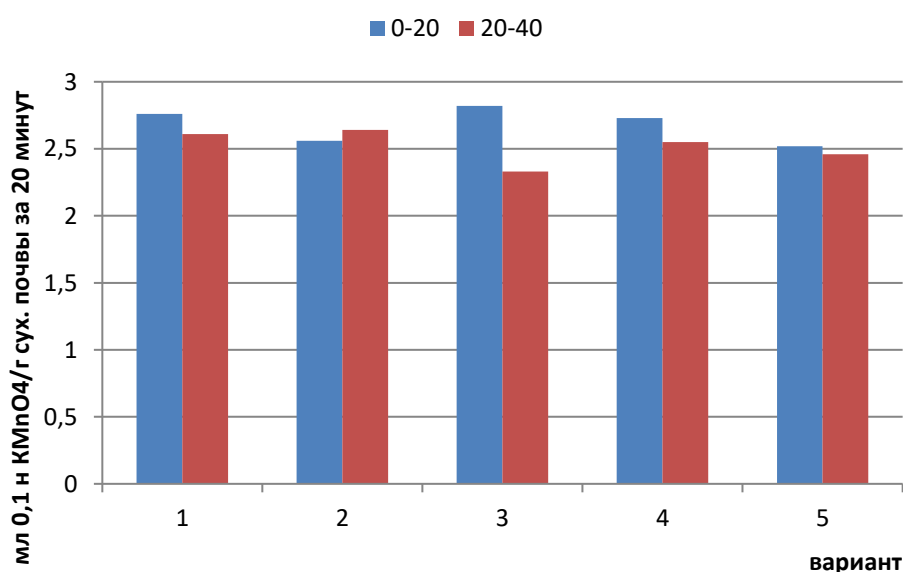


Рисунок 81 - Активность каталазы в агрочерноземе (мл 0,1 н KMnO_4 /г сух. почвы за 20 минут) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы) (2022-2023 гг.)

Оценка агроэкологических факторов в формирование биологической активности агрочернозема показывает, что она в большей степени зависит от погодных условий года исследований (51-99 %) (рисунок 82).

Применяемые в опыте биопрепараты с микроводорослями по-разному влияют на показатели биологической активности почвы. Для показателя потенциальной интенсивности дыхания почвы наибольший вклад от биопрепаратов выявлен для слоя почвы 0-20 см (18 %).

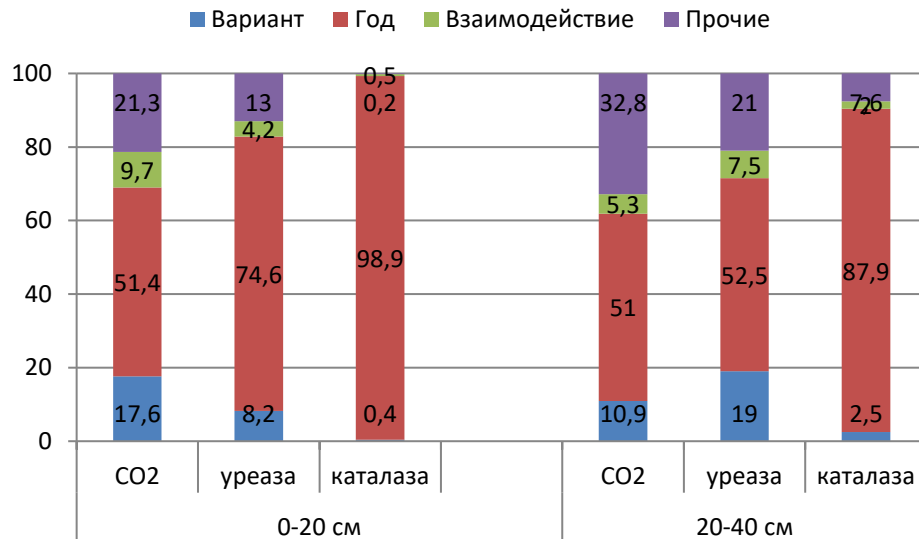


Рисунок 82 - Вклад агроэкологических факторов в формирование биологической активности агрочернозема, %

Микроводоросли в виде суспензии и гранул на 19 % влияли на активность уреазы в 20-40 см слое агрочернозема. Показатель силы влияния фактора «вариант» опыта для каталазы оценивается на уровне, не превышающем 3 %.

6.5 Продуктивность яровой пшеницы

Урожайность как окончательная оценочная категория агротехнических приемов, удобрений и препаратов подводит черту в определении эффективности. Как показали результаты различных исследований, она в значительной мере зависит от погодных условий (Прядкина и др., 2014; Тимаков и др., 2019). Анализ структуры урожая пшеницы (таблица 31) в двухлетнем опыте привлекает внимание неожиданностью результатов. Все показатели структуры урожая имеют максимальное значение на варианте опыта с внесением в почву гранул *Arthrospira*

platensis. Значительное влияние на структуру урожая яровой пшеницы оказало применение гранул *Chlorella vulgaris*. Для всех без исключения вариантов с применением альгопрепаратов показатели числа продуктивных стеблей, количества колосков и массы 1000 зерен демонстрировали достоверно превышения по сравнению с контролем.

Под влиянием биопрепаратов, применяемых в полевом опыте, отмечается достоверное увеличение числа продуктивных стеблей. По сравнению с контрольным вариантом прирост продуктивных стеблей оценивается на уровне 214-145 шт./м². Формирование максимального числа стеблей зависит от многих факторов с момента начала развития растения. Рост показателя для всех форм препаратов характеризует хорошую обеспеченность почвы элементами питания. Наиболее высокий прирост при применении гранул *Arthrospira platensis* вероятно связан с двумя главными факторами. Первый – высокая питательная ценность самой биомассы микроводоросли в грануле, вещества которой стали доступны растению на стадии прорастания зерна. Второй – азотфиксация сопутствующей *Arthrospira platensis* микрофлоры.

Таблица 31 – Структура урожая яровой пшеницы, 2022-2023г.

Вариант	Число продуктивных стеблей, шт./м ²	Высота растений, см	Длина главного колоса, см	Количество колосков, шт.	Масса 1000 зерен, гр.
Контроль	408,8	103,2	7,9	14,1	38,1
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	553,3	103,5	8,3	14,9	41,2
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	598,7	104,6	7,7	14,9	41,9
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	581,2	103,4	7,6	15,6	41,8
<i>A. platensis</i> (гранулы)	622,7	104,9	8,2	15,9	42,6
НСР ₀₅	132,1	1,6	0,2	1,2	2,5

Вариант опыта с внесение гранул *Arthrospira platensis* определяет максимальную высоту растений (104,9 см), количество колосков в колосе (15,9 шт.) и массу 1000 зерен (42,6 гр). Полученные результаты отразились на величине урожайности яровой пшеницы (прил. 12). В среднем за два года исследований она составила 3,78 т/га, что на 0,87 т/га больше по сравнению с контролем (рисунок 83). Схожие результаты по уровню урожайности культуры отмечаются на варианте опыта с фолитарной обработкой вегетирующих посевов 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* (3,67 т/га).

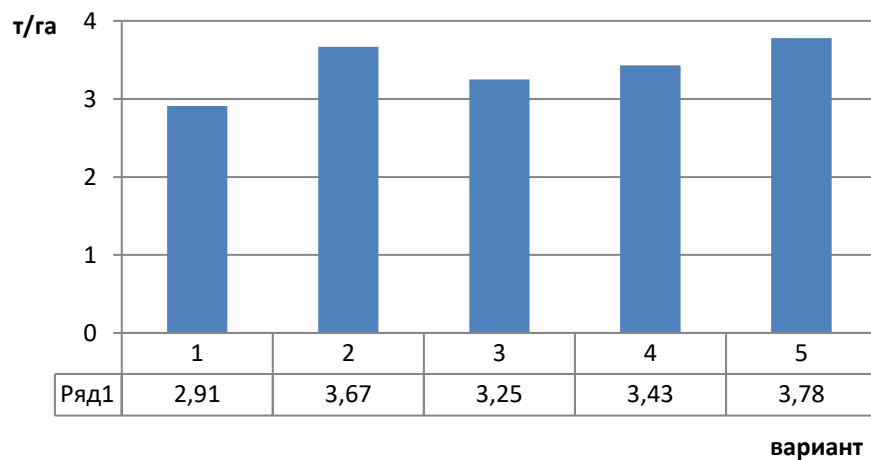


Рисунок 83 - Урожайность яровой пшеницы (т/га) на вариантах опыта: 1. Контроль (химическая защита – фон); 2. *C. vulgaris* (1 % раствор); 3. *C. vulgaris* (гранулы); 4. *C. vulgaris* + *A. platensis* (гранулы); 5. *A. platensis* (гранулы); 2022-2023гг. ($HC_{05} = 0,27$)

Анализ влияния абиотических факторов на урожайность яровой пшеницы показывает сильную связь между продуктивностью культуры в полевом опыте и показателями потенциального и эффективного плодородия агрочернозема (таблица 32). Урожайность яровой пшеницы в сильной степени зависит от содержания в почве агрономически ценных агрегатов размером 10-0,25 мм ($r = 0,95$); запасов продуктивной влаги ($r = 0,66$); водорастворимого углерода ($r = 0,63$); реакции почвенного раствора ($r = 0,62$); содержания общего ($r = 0,78$); аммонийного ($r = 0,86$), нитратного ($r = 0,68$) азота; подвижного фосфора ($r = 0,75$) и обменного калия ($r = 0,79$).

Таблица 32 - Матрица парных коэффициентов корреляции абиотических факторов и урожайности яровой пшеницы
($n = 24$; $r_{05} = 0,388$)

Урожайность	ЗПВ	d	АЦФ	Сгумуса	Сн2о	СNaOH	pH	Нобщ	Nmg	Nлг	N-NH4	N-NO3	P2O5	K2O	CO2	Уреаза	Каталаза	
Урожайность	1																	
ЗПВ	0,663066	1																
d	-0,54645	0,091819	1															
АЦФ	0,950197	0,835335	-0,43828	1														
Сгумуса	-0,29539	-0,62804	-0,00543	-0,48873	1													
Сн2о	0,633515	-0,11959	-0,83623	0,416717	0,38391	1												
СNaOH	-0,44606	-0,91194	-0,17366	-0,67186	0,874439	0,383282	1											
pH	0,68208	0,949733	0,056991	0,824745	-0,77924	-0,13135	-0,94171	1										
Нобщ	0,775284	0,281184	-0,31235	0,573746	0,239532	0,715581	0,041601	0,291937	1									
Nmg	-0,64239	-0,96505	0,062061	-0,84562	0,649165	0,074327	0,898189	-0,88851	-0,15056	1								
Nлг	-0,75603	-0,44544	0,092838	-0,60478	0,08146	-0,43565	0,233451	-0,53982	-0,91195	0,261543	1							
N-NH4	0,862894	0,887938	-0,15039	0,917908	-0,28662	0,299822	-0,63435	0,797365	0,64197	-0,84308	-0,65475	1						
N-NO3	0,683194	0,820045	4,57E-16	0,766246	-0,80627	-0,07215	-0,85841	0,956247	0,351451	-0,72964	-0,64082	0,677683	1					
P2O5	0,751712	0,724182	0,037603	0,730371	-0,50202	0,120093	-0,6353	0,844131	0,662714	-0,56235	-0,89082	0,73515	0,913014	1				
K2O	0,796253	0,873944	-0,33539	0,930573	-0,76284	0,137802	-0,85504	0,906259	0,269127	-0,91182	-0,40386	0,787376	0,851959	0,679018	1			
CO2	0,237569	0,614321	-0,128	0,489099	-0,90534	-0,33882	-0,82906	0,66043	-0,40979	-0,7335	0,21004	0,287354	0,59026	0,216737	0,765379	1		
Уреаза	0,105655	-0,18094	-0,37088	0,040131	-0,53208	0,082416	-0,09273	0,11704	-0,07661	0,175014	-0,12026	-0,30491	0,364004	0,224785	0,202466	0,312957	1	
Каталаза	-0,83697	-0,34204	0,881977	-0,78123	0,106008	-0,81957	0,147444	-0,31133	-0,54042	0,45384	0,352797	-0,59547	-0,28718	-0,28176	-0,63258	-0,23611	-0,11344	1

Сильная обратная зависимость между урожайностью яровой пшеницы и гидролизуемыми формами азота ($r = -0,64 \dots 0,75$) и активность каталазы ($r = -0,84$) свидетельствует об усилении процессов минерализации органического вещества в агрочерноземе под влиянием биопрепаратов с микроводорослями. Таким образом, корреляционный анализ выявил наиболее сильные параметры, управляющие урожайностью. Эта статистически выделенная группа показателей, очевидно, связана именно с ролью микроводорослей в почвенном микробиоценозе. Благодаря миксотрофии, микроводоросли становятся поставщиком пищевых ресурсов для бактерий, тем самым стимулируя их развитие. Повышают устойчивость сообщества, предоставляя возможность развиваться под защитой слизистых чехлов экзополисахаридов и создавая благоприятный гормональный и ферментативный фон. Ингибируют патогенов специфическими метаболитами и др. Двухлетний полевой опыт по изучению влияния разных форм препаратов на продукционные показатели пшеницы показал новые, не очевидные ранее возможности. Прежде всего, это высокая эффективность приема с внесением в почву гранул *A. platensis*. Не очевидным положительный эффект применения в условиях резко континентального климата Красноярской лесостепи был главным образом из-за физиологических особенностей цианобактерии, культивируемой при температурах выше 30°C. Не очевидной была эффективность гранулированного препарата для открытого грунта с сельскохозяйственной нагрузкой. Важным фактом стала сравнимая или большая эффективность сухих гранул в сравнении с жидким препаратом, где содержание живых метаболизирующих клеток значительно на момент обработки. Совмещение альгологических препаратов с полной химической защитой растений снимает ограничения при масштабировании и внедрении технологии в сельскохозяйственное производство. Значимое изменение параметров почвы, обеспечивающих плодородие, говорит о потенциальной возможности замены минеральных удобрений или их части на экологичные и дешевые альгопрепараты. Вероятно, многолетнее применение препаратов позволит увеличить темпы восстановления плодородия и производит ремедиацию

техногенно нарушенных земель даже в суровых климатических зонах. Динамика легкогидролизуемого азота при использовании альгопрепаратов косвенно свидетельствует, в том числе о повышении микробиологической активности почв агроценоза. Восстановление микробиома в сложных природно-климатических условиях земледельческой зоны Красноярского края указывает на значительный экологический потенциал технологии. От стандартного набора приемов в растениеводстве, проведенный полевой опыт отличался внесением препаратов на основе микроводорослей. Фактически, в агроэкосистему был добавлен один или несколько компонентов микробиоты в незначительной численности. Его влияние проявилось как в изменении основных почвенных показателей, так и в повышении продуктивности агроэкосистемы. Важным стало понимание, что инокуляция *A. platensis* и *C. vulgaris* как в жидкой, так и в гранулированной форме является достаточной для повышения эффективности трофосистемы почва - растения в агроэкосистеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны экспериментальные формы биопрепарата в виде суспензии *Chlorella vulgaris* с пониженной седиментацией клеток и сухая форма (гранула) *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*, обеспечивающая экологическую безопасность, биоразлагаемость носителя и сохранение жизнеспособности клеток микроорганизмов в течение длительного времени.

2. Применение нативной культуры *Chlorella vulgaris* для обработки семян способствовало повышению энергии прорастания семян яровой пшеницы, редиса и кресс-салата на 1-6 %, лабораторной всхожести на 5-15 %; увеличению длины стебля кабачка на 16 %, приросту площади листьев огурца и кабачка на 6-8 % и обеспечивало прирост общего хлорофилла на 17-34 %, суммы пигментов на 24-45 %.

3. В лабораторных условиях на культуре огурца доказано стимулирующее действие жидкой и сухих форм биопрепарата для замачивания семян, опрыскивания растений и внесения гранул в субстрат, а также возможность совместного применения гранул *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis*. Ростостимулирующее действие биопрепаратов проявилось в достоверном увеличении длины стебля и площади листовой пластинки огурца. Замачивание семян и дополнительное внесение в субстрат гранул *Chlorella vulgaris* и их совмещение с *Arthrospira platensis* определяли максимальную чистую продуктивность фотосинтеза (17-18 г/м²).

4. При возделывании томатов в условиях открытого грунта с замачиванием семян, последующим опрыскиванием рассады жидкой формой *Chlorella vulgaris*, а также с внесением гранул микроводоросли в субстрат при пикировке растений увеличивалась надземная фитомасса культуры на 59-120 гр., количество листьев на 4-7 шт. и масса листьев на 50-71 гр. на одно растение по сравнению с контролем, формируя максимальную урожайность томатов (6 кг/м²).

5. Оценка действия сроков применения биопрепаратов микроводоросли *Chlorella vulgaris* в полевых условиях показала преимущество двукратной обработки вегетирующих растений яровой пшеницы в фазу кущения и колошения в баковых смесях с пестицидами и более высокую эффективность нативной формы по сравнению с термически обработанным аналогом. Этот приём определил максимальный структурообразующий эффект (64 %), снижение плотности сложения до 0,79 г/см³, увеличение содержания общего азота в гумусе (C: N = 8,7), накопление подвижного фосфора (182 мг/кг) и обменного калия (291 мг/кг) в агрочерноземе и формирование максимальной урожайности культуры (3,6 т/га).

6. Агроэкологическая оценка влияния форм биопрепаратов на систему почва-растение выявила высокую эффективность жидких и сухих форм. Применение в технологии возделывания яровой пшеницы суспензии *Chlorella vulgaris* и гранулы *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* в чистом виде и в смеси способствовало сохранению запасов продуктивной влаги, повышению содержания агрономически ценных фракций, запасов общего азота, пула гидролизуемых форм азота, увеличению содержания минерального азота, подвижного фосфора и обменного калия в агрочерноземе.

7. Применение в технологии возделывания яровой пшеницы в условиях Красноярской лесостепи двукратного опрыскивания растений 1 % раствором суспензии *Chlorella vulgaris* и гранул *Arthrospira platensis* при посеве определило урожайность культуры до 3,7-3,8 т/га, обусловленную влиянием структурного состава почвы ($r = 0,95$); запасов продуктивной влаги ($r = 0,66$); водорастворимого углерода ($r = 0,63$); реакции почвенного раствора ($r = 0,62$); содержанием общего ($r = 0,78$); аммонийного ($r = 0,86$), нитратного ($r = 0,68$) азота; подвижного фосфора ($r = 0,75$) и обменного калия ($r = 0,79$).

8. Близкая биологическая и агроэкологическая эффективность гранулированных препаратов *Chlorella vulgaris* и *Arthrospira platensis* с жидкой формой, обладающей более высоким содержанием метаболизирующих клеток,

а также доказанное совмещение альгологических препаратов при возделывании сельскохозяйственных культур определяет их потенциальную возможность и перспективу применения в сельском хозяйстве для регулирования системы почва - растение.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ

Для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и сохранения плодородия почв Красноярской лесостепи рекомендуется:

- применение суспензии *C. vulgaris* и гранул *C.vulgaris* и *A. platensis* самостоятельно и в комбинации в технологии возделывания яровой пшеницы, способствующих оптимизации агрофизических и агрохимических свойств агрочернозема;

- замачивание семян в 1 % растворе биопрепарата *C. vulgaris* с последующим опрыскиванием рассады, а также внесением гранул в почву при пикировке растений томатов, обеспечивающих максимальную урожайность культуры в условиях открытого грунта;

- применение нативной культуры *C. vulgaris* для обработки семян редиса, кресс-салата, кабачка и огурца, определяющей улучшение биометрических и физиологических параметров растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумова Н. В. Влияние биостимулирующих препаратов на физиологические и биометрические показатели растений огурца // Устойчивость почвенного покрова и продуктивность экосистем: Материалы всероссийской научной конференции VII Докучаевские молодежные чтения посвященной 70-летию Красноярского государственного аграрного университета, Красноярск, 22 декабря 2022 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. – С. 67-72
2. Абакумова Н. В., Бурак Д. Д., Кураченко Н. Л. Влияние биопрепаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* на гумусное состояние агрочернозема Красноярской лесостепи// Актуальные вопросы развития отраслей сельского хозяйства: теория и практика: Материалы IV всероссийской конференции молодых ученых АПК, п. Рассвет, 19–20 мая 2022 года. – п. Рассвет: Общество с ограниченной ответственностью "АзовПринт", 2022. – С. 13-18
3. Абакумова Н. В., Коваль А. М. Влияние биопрепаратов на основе культуры *Chlorella vulgaris* на реакцию почвенного раствора и интенсивность дыхания агрочернозема// Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых, Красноярск, 23–25 марта 2022 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. – С. 12-16
4. Абакумова Н. В., Назаренко Т. А. Влияние микроводоросли *Chlorella vulgaris* на содержание гидролизуемых форм органического азота в агрочерноземе // Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых, Красноярск, 23–25 марта 2022 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. – С. 8-12
5. Абакумова Н.В. Влияние биопрепаратов на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* и цианобактерии *Arthrospira platensis* на содержание подвижных форм фосфора в агрочерноземе Красноярской лесостепи // Инновационные тенденции

развития российской науки: Материалы XVI международной научно-практической конференции молодых ученых, Красноярск, 29–31 марта 2023 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – С. 3-6

6. Абакумова Н. В. , Варганова Д. А. Особенности режима нитратного азота в агрочерноземе при применении биопрепаратов с микроводорослями. /Н.В. Абакумова, Д.А. Варганова // Студенческая наука – взгляд в будущее: Материалы XIX всероссийской студенческой научной конференции, Красноярск, 27–29 февраля 2024 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2024. – Часть 1. – С.43-45

7. Абакумова Н. В., Варганова Д. А., Дымченко Е. И. Изменение структурного состояния агрочернозема под действием биопрепаратов с микроводорослями //Устойчивость почвенного покрова и продуктивность экосистем: мат-лы межрегиональной научной конференции. – Красноярск. – 2024. – С. 3-8.

8. Абакумова Н. В., Кураченко Н. Л. Влияние суспензии *Chlorella vulgaris* на урожайность яровой пшеницы в условиях Красноярской лесостепи // Актуальные проблемы почвоведения, экологии, земледелия: Материалы XX международной научно-практической конференции , г. Курск, 24-25 апреля 2025 года. – Курск: Курский федеральный аграрный научный центр, 2025– С. 6-9

9. Абросимова Е. Б., Колесникова Т. В. Продукционные показатели *Chlorella vulgaris* на различных питательных средах // 63-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, посвященная 25-летию Астраханского государственного технического университета. – 2019. – С.199.

10. Александрова Л. Н. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. – Л.: Колос. – 1967. – 350 с.

11. Алексахина Т. И. Группировки водорослей лесных насаждений в условиях комплексного воздействия автомобильного транспорта /в книге: Структура и функции лесов Европейской части России// Отв. Ред. Уткина И.А.; Ин-т

лесоведения РАН. – Москва.: Товарищество научных изданий КМК. – 2009. – С.127-150.

12. Алексеева А. А., Фомина Н. В. Ферментативная активность почв лесных питомников лесостепной зоны Красноярского края //Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 12. – С. 70-75.

13. Аллагуватова Р. З., Гайсина Л. А. Исследование влияния суспензии водоросли *Chlorella vulgaris* на рост и развитие растений огурца в условиях закрытого грунта // Современные проблемы и перспективы развития естествознания: Материалы национальной научно-практической конференции 8-9 июня 2020 г., Уфа, 08–09 июня 2020 года. Том 1. – Уфа: Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы. – 2020. – С. 14-16.

14. Андреева В. М. Почвенные и аэрофильные зелёные водоросли (Chlorophyta: Tetrasporales, Chlorococcales, Chlorosarcinales). — СПб.: Наука, 1998. — С. 202—203. — 241 с. — ISBN 5-02-026094-0.

15. Антипина Г. С., Тищенко Г. А. Продукция водорослей в почвах суходольных лугов Карелии// Бот. Журн. –1991. – Т.76. – №9. – С.1303-1308.

16. Анциферова О. А. Запасы продуктивной влаги в пахотных почвах приморского агроландшафта с развитием эрозии // Известия КГТУ. – 2017. – № 44. – С. 159-173.

17. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.

18. Аристовская Т. В. Биологические механизмы формирования эффективного и потенциального плодородия и биодиагностика почв//Микроорганизмы в сельском хозяйстве. Кишнев. – 1988. – С.9-10.

19. Артамонова В. С. Структурно-функциональная организация сообщества фототрофных микроорганизмов в целинных почвах Сибири// Почвоведение. – 1994. —№12– С. 57-64.

20. Асеева И. В., Бабьева И. П., Звягинцев Д. Г., Мирчинк Т. Г., Худякова Ю. А. Методы изучения почвенных микроорганизмов и их метаболитов (учебное пособие). – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. – 35 с.
21. Асякина Л. К., Еремеева Н. И., Дышлюк Л. С. Подбор оптимальных параметров экстрагирования комплекса биологически активных соединений из суспензионных культур лекарственных растений Сибирского федерального округа// Вестник КрасГАУ. 2021. №8 (173). URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/podbor-optimalnyh-parametrov-kstragirovaniya-kompleksa-biologicheskii-aktivnyh-soedineniy-iz-suspensionnyh-kultur-lekarstvennyh> (дата обращения: 22.03.2025).
22. Ахтариев Р. Р. Агрофизические свойства при возделывании гибридов кукурузы по приёмам основной обработки почвы в Западной Сибири // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 5(79). – С. 100-102.
23. Бабаджанов Д. Д., Сатторов Х. Х., Каримов Р. А., Хасанов М. М. Необходимость развития органического сельского хозяйства // Вестник ТГУПБП. –2009. – №4. – С.60-64.
24. Базарнова Ю. Г., Политаева П. А., Кузнецова Т. А. Выделение ценных компонентов из биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana* //Вестник технологического университета. – 2018. – № 2. – С. 176-179.
25. Балезина Л. С. Влияние некоторых удобрений и пестицидов на развитие почвенных водорослей // Современное состояние и перспективы изучения почвенных водорослей в СССР: Тр. межвуз. конф. – Киров. – 1967. – С. 208–214
26. Бачура Ю. М., Храмченкова, О. М., Цуриков А. Г. Особенности заселения почвенными водорослями отвалов фосфогипса // Наука и инновации. – 2009. – № 11 (81). – С.39–43.
27. Бачура Ю. М., Храмченкова О. М. Выбор индикаторных видов почвенных водорослей на основании анализа приуроченности альгосообществ к различным

видам антропогенной нагрузки // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины.– 2013. – № 2 (77). – С. 3–10.

28. Бачура Ю. М., Матвеевкова Т. Д. Влияние культуральной жидкости микроводорослей на рост и развитие семян редиса // Бюллетень науки и практики. – 2018. – Т. 4. – №11. – С. 220-227.

29. Бачура Ю. М. Влияние культуральной жидкости микроводорослей и цианобактерий на рост и развитие семян томатов //Наука и инновации, 2020. – № 9. – С. 72-77.

30. Безлер Н. В., Петюренко М. Ю, Хуссейн А. С. Внесение в почву азотфиксирующей бактерии *Pseudomonas fluorescens* 116 и динамика доступных форм азота в посевах сахарной свёклы // Плодородие. – 2016. – № 6(93). – С. 9-11.

31. Берхин Ю. И., Чагина Е. Г., Янцен Е. Д. Плодородие почв и питание растений // Научные труды СО ВАСХНИЛ. – Новосибирск, 1986. – С.65-75.

32. Бжеумыхов В. С. Формирование и активность симбиотического аппарата люцерны в зависимости от орошения, внесения макро- и микроудобрений на обыкновенном черноземе // Агрохимические проблемы биологической интенсификации земледелия: сборник докладов Международной научно-практической конференции, Владимир, 05–07 июля 2005 года / Редколлегия: А. И. Еськов, С. М. Лукин, М. Н. Новиков. – Владимир: ГНУ ВНИПТИОУ. – 2005. – С. 267-271.

33. Богданова А. А., Флерова Е. А., Паюта А. А. Влияние условий культивирования на качественные и количественные показатели *Chlorella vulgaris* // Химия растительного сырья. – 2019. – № 4. – С. 293-304.

34. Богданова А. В., Гайсина Л. А., Фазлутдинова А. И., Суханова Н. В. Флора почвенных водорослей и цианобактерий техногенно-засоленных территорий башкирского предуралья// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – N. 1-4. – С. 989-992

35. Богуславская Н. В. Полимерная упаковка: качество и безопасность [Для пищевых продуктов] // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2006. – № 3. – С. 666.
36. Богуславская Н. В. Проблемы экологии в растениеводстве Сибири и пути их решения // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. – 2006. – № 4. – С. 907.
37. Боинчан Б. П. Альтернативные системы земледелия // Плодородие. – 2013. - №5 (74). - С. 2-6.
38. Бойцова Л. В., Рижия Е. Я., Москвин М. А. Содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности при внесении в неё биоугля //Агрохимия, 2021.- № 11. – С. 25-32.
39. Большев Н. Н. Водоросли и их роль в образовании почв. – М.: Изд-во моск. унив-та, 1968. – 83с.
40. Бочарникова Е. А., Касацкий А. А., Матыченков В. В. Влияние аморфного кремнезема на продуктивность и качество томатов // Агрохимия. – 2023. – № 10. – С. 61-65.
41. Брянцева Ю. В., Дробецкая И. В., Харчук И. А. Характеристика цианобактерии *Spirulina (Arthrospira) platensis* // Экология моря. – 2005. – Т. 70. – С. 24-30.
42. Бугаков П. С. Почвы Красноярского края / П. С. Бугаков, С. М. Горбачева, В. В. Чупрова. – Красноярск, 1981. – 128 с.
43. Велижанов Н. М. Агробιοлогическая характеристика и качественная оценка детерминантных сортов томата // Горное сельское хозяйство, 2019. – № 3. – С. 98-101.
44. Веретенников А. В. Водоросли – пионеры лесных гарей // Природа, 1963.- №2. - С.105.
45. Владимирова М. Г., Семененко В. Е. Интенсивная культура одноклеточных водорослей. – Москва: АН СССР, 1962. – 60 с.

46. Воробьев В. Н., Невмержицкая Ю. Ю., Хуснетдинова Л. З., Якушенкова Т. П. Практикум по физиологии растений: учебно-методическое пособие– Казань: Казанский университет. – 2013. – 80 с.
47. Воронин А. А., Протасова Н. А., Беспалова Н. С. Динамика ферментативной активности чернозема обыкновенного в условиях полевого стационарного опыта федерального полигона " Каменная степь" //Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2006. – №. – 2. – С. 122-127.
48. Воронкова Н. А. Влияние приемов биологизации на запасы продуктивной влаги в почве //Земледелие. – 2009. – № 1. – С. 11-12.
49. Вяль Ю. А., Шиленков А. В. Ферментативная активность и агрохимические свойства почв Пензенского ботанического сада //Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского, 2008. – № 10 (14). – С. 26-32.
50. Гайсина Л. А., Фазлутдинова А. И., Кабиров Р. Р. Современные методы выделения и культивирования водорослей: учебное пособие //У: Изд-во БГПУ – 2008. – 152с.
51. Гамалей Ю. В., Попов А. И., Гамалей А. В. Анализ слагаемых продукционного процесса высших растений и потенциальных возможностей его оптимизации // Управление продукционным процессом растений в регулируемых условиях: Всерос. конф.: 7–11 октября 1996 г.: тез. докл. – СПб.: АФИ, 1996. – С. 21–23.
52. Гамзиков Г. П. Агрохимия азота в агроценозах. - Новосибирск, 2013. - 790с.
53. Ганжара Ф. М., Мироненко С. Ю., Родионова Л. П. Легкоразлагаемое органическое вещество как источник гумуса и минерального азота // Известия ТСХА. – 2001. – Вып. 6. – С. 69 – 80.
54. Гармашов В. М., Корнилов И. М., Нужная Н. А., Гаврилова С. А. Влияние обработки, минеральных удобрений, гербицидов и регуляторов роста на агрофизические свойства почвы и продуктивность озимой пшеницы//

Теоретические и прикладные аспекты современной науки. – 2014. – № 5-1. – С. 175-179.

55. Гасанов З. М., Омаров Ф. С. Применение биоорганических удобрений нового поколения на основе хлореллы при выращивании декоративных растений в Азербайджане // Субтропическое и декоративное садоводство. – 2013. – № 49. – С. 314-320.

56. Геворгиз Р. Г., Алисиевич А. В., Шматок М. Г. Оценка биомассы *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. По оптической плотности культуры // Экология моря. – 2005. – Т. 70. – С. 96-106.

57. Гладова Я. А., Пихтелева В. Е. Бактерии-спутники цианобактерий // Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки: сб. ст. по мат. ХС междунар. студ. науч.-практ. конф. № 7(89). – г. Новосибирск. – 2020.

58. Голлербах М. М., Зауер Л. М. Методы изучения водорослей в растительных сообществах. Полевая геоботаника. - Москва.: Л. Издательство АН СССР, 1959. – Т.1. – С. 399-411.

59. Голлербах М. М., Штина Э. А., Почвенные водоросли, Л., 1969. – 144 с.

60. Голов В. И. Перспективы биологизации земледелия Дальнего Востока. Проблемы и возможности. /Современные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии. Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Благовещенск. – 2019. – С. 37-46.

61. Горбунова С. Ю., Жондарева Я. Д. Об эффективности использования микроводорослей в промышленной биотехнологии с целью мелиорации водной среды и получения кормов для различных отраслей сельского хозяйства // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона. – Керчь: Юг НИРО. – 2012. – Т. 2. – 114-119 с.

62. Горбунова С. Ю. Культивирование *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitler на минерально-органической питательной среде// Бюллетень Никитского ботанического сада. – 2013. – Вып. 109. – С. 8–13.

63. Горбунова С. Ю., Жондарева Я. Д. Использование сточных вод птицефабрик для увеличения продуктивности *Arthrospira platensis* (Nordst.) Geitler // Вестник СПбГУ. – Сер. 3. – 2015. – №1. С. 70–77.
64. Горбунова С. Ю., Лукьянов В. А. Потенциальная продуктивность микроводоросли *Chlorella vulgaris* на темно-серых лесных почвах Центрального Черноземья // «PontusEuxinus 2015». – 2015. – С. 48-49.
65. Горбунова С. Ю., Жондарева Я. Д. Миксотрофное питание как пример экологически приемлемой технологии для культивирования цианобактерии *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Nordst) Geitler // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 2 (14). _URL: <http://algology.ru/1176>
66. ГОСТ 26204-91. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 8 с.
67. ГОСТ 26423-85. Методы определения удельной электрической проводимости, р. и плотного остатка водной вытяжки. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2011. – 8 с.
68. ГОСТ 26488-85. Определение нитратов по методу ЦИНАО. Государственный стандарт Союза ССР. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 5 с.
69. ГОСТ 26489-85. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО. Государственный стандарт Союза ССР. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
70. ГОСТ 26951-86 Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 8 с.
71. ГОСТ 27821-88. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. Государственный стандарт Союза ССР. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 7 с.
72. ГОСТ 28561-90 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги. – М.: Стандартинформ, 2011. – 10 с.

73. ГОСТ 53876-2010 Крахмал картофельный. Технические условия. . – М.: Стандартинформ, 2019. – 8 с
74. Гоффман Г., Тейхер Х. Комбинированный метод определения почвенного дыхания // *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*. –1957. –Т. 78. – № 2. – С. 164-169.
75. Гребенников А. М. Повышение эффективности использования почвенных ресурсов сельскохозяйственных земель при восстановлении агрофизических свойств почв сидерацией смешанными агрообществами // *Academy*. – 2020. – № 1(52). – С. 21-26.
76. Грибовская И. В., Калачева Г. С., Тирранен Л. С., Колмакова А. А., Баянова Ю. И. Использование урины в питании С. Красноярск: *Journal of Siberian Federal University. Biology*. – 3. – 2011. – С. 243-256.
77. Гущина В. А., Володькин А. А. Биопрепараты и регуляторы роста в ресурсосберегающем земледелии: учебное пособие. – Пенза: ПГАУ, 2016. – 206 с.
78. Данилова А. А. Реакция микробного комплекса чернозема выщелоченного на воздействие гербицида дифезан // *Сиб. вестн. с.-х. науки*. – 2010. – № 1. – С. 7–13.
79. Дворецкий Д. С., Темнов М. С., Устинская Я. В., Еськова М. А. Перспективные биотехнологии микроводорослей: учебное пособие. Тамбов: Издательский центр ТГТУ, 2022. –128 с.
80. Джуманиязов И. Д., Аллаберганов Ш. и др. Влияние протококковых водорослей на содержание гидролизуемых форм гумуса орошаемых почвах//Материалы республиканского совещания «Култивирование и применение микроводорослей в народном хозяйстве». –Ташкент. –1977. –136 с.
81. Джуманиязов И. Д. Биологические основы альгализации орошаемых почв Узбекистана в условиях интенсивного земледелия: автореф. дисс. ... доктора биологических наук. – Ташкент. – 1990. – 51 с.

82. Дидович С. В., Москаленко С. В., Темралеева А. Д., Хапчаева С. А. Биотехнологический потенциал почвенных цианобактерий (обзор) // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 2 (14).
83. Доброжан С. Н., Шалару В. В., Шалару В. М., Стратулат И. И., Семенюк Е. Н. Использование некоторых видов синезеленых азотфиксирующих водорослей в качестве биологического удобрения // Альгология. – 2014. – Т. 24. – №3. – С. 426–429.
84. Домрачева Л. И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. - Сыктывкар.: Коми научный центр Уро РАН. – 2005. – 336 с.
85. Домрачева Л. И., Кондакова Л. В., Попов Л. Б., Зыкова Ю. Н. Биоремедиационные возможности почвенных цианобактерий// Теоретическая и прикладная экология. – 2009. – №1. – С.8-17.
86. Дорогостайская Е. В., Новичкова-Иванова Л. Н. Об изменении альгофлоры тундровых почв в результате их освоения // Бот. журн. – 1967. – Т. 52. – № 4. – С. 461–468.
87. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта /Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351с.
88. Доценко К. А., Федулов Ю. П. Видовой состав альгофлоры агроценозов Кубани //Научный журнал Куб ГАУ. – 2017. – №134. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vidovoy-sostav-algoflory-agrotsenozov-kubani> (дата обращения: 19.01.2025).
89. Доценко К. А. Влияние систем защиты растений и агротехнических приемов на почвенную альгофлору в зернотравянопропашном севообороте: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Краснодар, 2000. – 152 с.
90. Дубас В. В., Алексашкин И. В., Калягина В. О. [и др.] Содержание углерода и азота в почвах долины «безымянного» ручья, Предгорный Крым // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 45-58

91. Еремина Д. В., Котченко С. Г. Влияние многолетней вспашки на агрофизические свойства темно-серых лесных почв лесостепной зоны Зауралья // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 12(165). – С. 3-11.
92. Еремин Д. И. Изменение содержания и качества гумуса при сельскохозяйственном использовании чернозема, выщелоченного лесостепной зоны Зауралья // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 584-592.
93. Ерофеев С. А. Биологизация земеделия - основа эколого-ландшафтного земледелия // Евразийский Союз Ученых. – 2018. – №8-4 (53). – С.8-11.
94. Ефремов И. В. Исследование экологического статуса систем «почва-растение» степной зоны при антропогенном воздействии / автореф. дисс. ... доктора биологических наук. – Оренбург, 2011. – 352 с.
95. Заварзин Г. А. Эволюция геосферно-биосферной системы // Природа. – 2003. – Т. 1. – С. 27–35.
96. Зайцев В. В., Петряков В. В., Зайцева Л. М., Махимова Ж. Н. Влияние питательной среды на морфологические особенности и жизнеспособность клеток микроводоросли *Chlorella vulgaris* Beijer. // Самарский научный вестник. – 2022. – Т. 11. – № 2. – С. 52–56. DOI: 10.55355/snv2022112107.
97. Зарипов Э. З. Физиологические особенности и культивирование сине-зелёной водоросли *Spirulina platensis* Geitl. в связи с возможностью её практического использования в Узбекистане: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Л., 1982. – 16 с.
98. Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–54.
99. Зенова Г. М., Штина Э. А. Почвенные водоросли: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ. – 1990. – 80с.
100. Зенова Г. М., Штина Э. А., Дедыш С. Н., Глаголева О. Б., Лихачева А. А., Грачева Т. А. Экологические связи водорослей в биоценозах // Микробиология. – 1995. – Т.64. – №2. – С.149 - 164.

101. Зинченко М. К., Зинченко С. И., Борин А. А., Камнева О. П. Ферментативная активность аграрных почв Верхневолжья // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 3. – С. 143.
102. Илялетдинов А. Н. Биологическая мобилизация минеральных соединений. – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1966. – 331 с.
103. Кабиров Р. Р. Роль почвенных водорослей в антропогенных системах // Фундаментальные исследования. – 2004. – № 6. – С. 22-24; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6145> (дата обращения: 15.10.2021).
104. Кабиров Р. Р., Пурина Е. С., Сафиуллина Л. М. Почвенные водоросли: качественный состав, количественные характеристики, использование при проведении экологического мониторинга // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 5. – С. 38-39.
105. Кабиров Р. Р., Гайсина Л. А. Показатели продуктивности почвенных водорослей в наземных экосистемах // Почвоведение. – 2009. – Т. 12. – С. 1475-1480.
106. Киреева Н. А. Микробиологические процессы в нефтезагрязненных почвах. – Уфа: Гилем, 1994. – 159 с.
107. Ковалец А. А., Мозгова М. Г., Иванушкина Т. С. Изменение физико-химических и агрофизических свойств тёмно-серых лесных почв под влиянием водной эрозии // Научный журнал молодых ученых. – 2023. – № 1(31). – С. 21-26.
108. Коваль Е. В., Огородникова С. Ю. Влияние цианобактерии *Nostoc linckia* на показатели жизнедеятельности растений ячменя, выращенных в модельных опытах в присутствии метилфосфоновой кислоты // Агрохимия. – 2014. – №12. – С. 55-60.
109. Козлова И. В., Грушанин А. И., Бут Н. Н. Продуктивность фотосинтеза консервных сортов и гибридов томата // Рисоводство. – 2019. – № 1(42). – С. 73-77.

110. Коломиец М. Ю. Бионический способ выращивания растений// Патент RU 2638326 C1 РФ, МПК A01C 21/00 C12N 1/00. № 2016143704; Заявл. 07.11.2016; Оpubл. 13.12.17, Бюл. № 34.
111. Косенко А. А, Первушкин С. В., Желонкин Н. Н., Куркина А. В. Актуальные аспекты стандартизации биомассы *Spirulina platensis* // Аспирантский вестник Поволжья. – 2021. – №5. – 6. – С. 112 - 117.
112. Косолапова А. В. Особенности трансформации азотсодержащих соединений в почве в опыте с дефекатом //Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). – 2016. – № 2. – С. 102-106.
113. Краткий обзор. Положение дел в области продовольственной безопасности и питания в мире Преобразование продовольственных систем для обеспечения финансовой доступности здорового питания. — 2020. — Текст: электронный // FAO: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.4060/ca9699ru> (дата обращения: 12.03.2025).
114. Креславский В. Д., Зорина А. А., Лось Д. А., Аллахвердиев С. И. Молекулярные механизмы адаптации фотосинтетического аппарата к стрессу// Фотосинтез: открытые вопросы и что мы знаем сегодня / Ред. Рубин А. Б. Аллахвердиев С. И., Шувалов В. А. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2013. – 832 с.
115. Крылов И. Б., Будников А. С., Гайсина Л. А., Глинушкин А. П., Терентьев А. О. Перспективы применения продуцируемых почвенными водорослями и цианобактериями веществ в растениеводстве// Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30. – N. 11. – С. 97-98.
116. Кузин Е. Н., Арефьев А. Н., Кузина Е. Е. Изменение плодородия почв: монография. – ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА». – 2013. – 266 с.
117. Куликова А. Х., Антонова С. А., Козлов А. В. Ферментативная активность почвы в зависимости от системы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – №5. – С. 36-43.

118. Кураченко Н. Л., Ульянова О. А., Чупрова В. В. Влияние систем удобрения на изменение агрофизических свойств темно-серой лесной почвы // Агрохимия. – 2011. – № 4. – С. 22-29.
119. Кураченко Н. Л. Агрофизическое состояние почв Красноярской лесостепи. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет. – 2013. – 194 с.
120. Кураченко Н. Л., Бопп В. Л. Динамика углерода водорастворимого гумуса в черноземе обыкновенном под чистыми и бинарными посевами донника // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки, 2016. – № 5. – С. 14-20.
121. Кураченко Н. Л., Коваленко О. В., Казюлин Л. Ф. Влияние микроводорослей на посевные качества семян гороха и яровой пшеницы // Экологический Вестник Северного Кавказа, 2020. – Т. 16. - № 1. – С. 35-39.
122. Кураченко Н. Л., Колесник А. А. Содержание и пространственное распределение подвижных элементов питания агрочерноземов в зависимости от способов основной обработки почвы // Агрохимия. – 2020. – № 7. – С. 11-16.
123. Кураченко Н. Л., Ульянова О. А., Власенко О. А. [и др.] Влагообеспеченность посевов ярового рапса на агрочерноземах Канской лесостепи // Вестник аграрной науки. – 2020. – № 5(86). – С. 39-44.
124. Кураченко Н. Л. Действие биологического стимулятора Гипергрин на пищевой режим агрочернозема Красноярской лесостепи // Агрохимический вестник, 2021. – №2. – С. 41-45.
125. Кураченко Н. Л., Абакумова Н. В., Фомина Н. В. Уреазная активность агрочернозёма при использовании биопротекторных препаратов с *Chlorella vulgaris* на яровой пшенице АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 1(55).
126. Кураченко Н. Л., Колесников А. С. Плодородие агрочернозема Красноярской лесостепи в условиях основной обработки. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – 144 с.

127. Кураченко Н. Л., Абакумова Н. В. Действие биопрепаратов на основе культуры микроводоросли *Chlorella vulgaris* на продуктивность томата // Плодородие. – 2024. – № 2(137). – С. 65-70
128. Кураченко Н. Л., Казанова Е. Ю. Азотный фонд агрочерноземов Канской лесостепи // Вестник Дагестанского научного центра, 2024. – № 94. – С. 52-58.
129. Кураченко Н. Л., Абакумова Н. В. Влияние препаратов с микроводорослями на содержание органического азота и его гидролизуемых фракций в агрочерноземе // Экологический Вестник Северного Кавказа. — 2025.— Т.21 . — №3. – С. 36-41;
130. Ларионова А. А., Золотарева Б. Н., Евдокимов И. В. Идентификация лабильного и устойчивого пулов органического вещества в агросерой почве // Почвоведение, 2011. – № 6. – С. 658–698.
131. Лелеков А. С., Тренкеншу Р. П. Простейшая модель роста микроводорослей. Экспоненциальная и линейная фазы роста//Экология моря. – 2007. – №74. – С.47-49.
132. Лелеков А. С., Геворгиз Р. Г. Моделирование динамики роста *Arthrospira (Spirulina) platensis* и pH среды в закрытой по углероду системе // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 1 (13).
133. Леушкина В. В., Молибога Е. А., Полякова А. Н. Анализ мировых трендов на рынке инновационной продукции на примере спироулиносодержащих продуктов // Вопросы инновационной экономики. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 1513-1526.
134. Лукин С. М. Эмиссия углекислого газа в агроценозах картофеля на дерново – подзолистой супесчаной почве // Владимирский земледелец, 2015. – №3 4 (74). – С. 22 –23.
135. Лукьянов В. А. Экологически безопасная продукция на основе микроводоросли хлореллы // Агропромышленный комплекс: контуры будущего (материалы Международной научно-практической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых). – Курск: Изд-во Курская ГСХА. – 2012. – ч.1. – С.162-164.

136. Лукьянов В. А., Стифсев А. И. Роль микроводорослей в растениеводстве // Экологическая безопасность. Брянск: Изд-во «РИО БГУ». – 2012. – С. 219

137. Лукьянов В. А. Плодородная почва - самое ценное достояние нашего времени // Экологическая безопасность региона. Брянск: Изд-во «РИО БГУ». – 2013. – С. 101.

138. Лукьянов В. А., Горбунова С. Ю. Микроводоросль *Chlorella vulgaris* в утилизации сточных вод птицефабрик // Молодежь и инновации – 2013: сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых. В 4-х ч. / Гл. ред. А. П. Курдеко. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2013. – Ч.2. – С. 159–162.

139. Лукьянов В. А., Стифеев А. И., Горбунова С. Ю. Научно обоснованное культивирование микроводорослей // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – №9. – С. 55-57.

140. Лукьянов В. А., Стифеев А. И. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия, 2014. – 181 с.

141. Лукьянов В. А., Стифеев А. И., Горбунова С. Ю. Микроводоросль *Chlorella vulgaris* Beijer – высокопродуктивный штамм для сельского хозяйства [Электронный ресурс] // Концепт: научно-методический электронный журнал. – 2015. – Т. 13. – С. 1576- 1580. – Режим доступа: <http://www.elibrary.ru>, свободный.

142. Лукьянов В. А. Агроэкологическая оценка применения одноклеточных фотосинтезирующих организмов на темно-серых лесных почвах Центрального Черноземья: автореф. дис. ... канд. биологических наук. – Москва, 2016. – 136 с.

143. Лукьянов В. А., Стифеев А. И. Агроэкологические особенности одноклеточных фотосинтезирующих организмов в условиях Центрального Черноземья// Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2016. – № 1(9). – С. 60-68.

144. Лукьянов В. А., С. Ю. Горбунова А. И. Стифеев Рост и развитие озимой пшеницы с применением культуральной среды от микроводорослей //Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – - № 1. – С. 98-103.
145. Лукьянов В. А. Прущик И. А. Плотность и твёрдость чернозёма типичного на фоне разных агротехнологий и способов обработки // Пермский аграрный вестник. – 2022. – № 4(40). – С. 29-37.
146. Мазо В. К., Бирюлина Н. А., Сидорова Ю. С. *Arthrospira platensis*: антиоксидантные, гипогликемические и гиполипидемические эффекты in vitro и in vivo (краткий обзор) // Вопросы питания. – 2022. – Т. 91, № 4(542). – С. 19-25
147. Макаров М. В., Воскобойников Г. М. Влияние освещения и температуры на макроводоросли Баренцева моря // Вопросы современной альгологии. – 2017. – №3(15). URL: <http://algology.ru/1183>
148. Макарова Е. И., Отурина И. П., Сидякин А. И. Прикладные аспекты применения микроводорослей – обитателей водных экосистем // Экосистемы, их оптимизация и охрана. – 2009. – Вып. 20. – С. 120–133.
149. Мамедова Ф. Т. Различные подходы к накоплению биомассы микроводорослей *Chlorella vulgaris* и к ее процессам биокаталитической трансформации: автореф. дис. ... кандидата химических наук. – М: 2015. – 176 с.
150. Маслов В. Н., Березина Н. А., Червонова И. В. Состояние зернового хозяйства России, роль зерновых в кормлении сельскохозяйственных животных и питании человека / // Вестник аграрной науки, 2021 – №2. – С. 3-15.
151. Масютенко Н. П. Энергетический потенциал органического вещества черноземов и управление его воспроизводством: автореф. дисс. ...доктора сельскохозяйственных наук. – Курск, 2003. – 12 с.
152. Матявина Е. О. Изменение уреазной активности почвы при применении гуминовых препаратов как антидепрессантов // МНСК-2020. Сельскохозяйственные науки: Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2020. – С. 13.

153. Мачнева Н. Л., Плутахин Г. А. Перспективы использования хлореллы в сельском хозяйстве //Тезисы Третьей Всероссийской научнопрактической конференции молодых ученых «Научное обеспечение агропромышленного комплекса», 18–20 ноября 2009. – Краснодар. – С. 225
154. Медовик А. Н., Власенко В. П., Твердохлебов С. А., Цымбал А. А. Техногенная деградация почвы и орудие для оптимизации ее агрофизических свойств // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2011. – № 4. – С. 27-29.
155. Мезенцева Г. В. Возможные пути трансформации органического вещества азотфиксирующих цианобактерий в почве: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. – Л., 1987. – 17с.
156. Мелихов В. В., Медведева Л. Н., Фролов М. В. Экологический императив в развитии национальной экономики: повышение потенциала микроводорослей //Юг России: экология, развитие. – 2020. – Т.15. – № 3. – С. 117-131.
157. Мельников А. С., Масленникова Д. Р., Безрукова М. В. Ростостимулирующий эффект культуральной жидкости почвенных микроводорослей на растения мягкой пшеницы // Вестник Башкирского университета. – № 4. – 2014. – С. 1193-1195.
158. Мельников С. С., Мананкина Е. Е.: Хлорелла Физиологически активные вещества и их использование – Минск. – Навука: Техника. – 1991. – 79с.
159. Минюк Г. С., Дробецкая И. В. Одноклеточные водоросли как возобновляемый ресурс: обзор //Морской экологический журнал. –Севастополь, 2008. – №2. – Т.VII. – 19 с.
160. Митишев А. В., Семенова Е. Ф., Курдюков Е. Е., Моисеев Я. П., Полубояринов П. А., Моисеева И. Я., Лабес А. Влияние источников азота на накопление и белковость биомассы *Chlorella vulgaris* IPPAS C-2019 // Вестник ПензГУ. – 2021. – №4 – с. 36.
161. Митишев А. В., Курдюков Е. Е., Семенова Е. Ф., Фадеева Т. М., Моисеева И. Я., Моисеев Я. П. Фармакотехнологические исследования биомассы *Chlorella vulgaris* C-2019 как перспективного источника получения антибактериальных

веществ. Разработка и регистрация лекарственных средств. –2022. – 11(2). – С.53-58.

162. Михеева Т. М. Перспективы использования культивируемых и планктонных микроскопических водорослей //Наука и инновации. – 2018. – №2 (180). – С. 15–19.

163. Мишустин Е. Н. Ценозы почвенных микроорганизмов // Почвенные организмы как компоненты биогеоценоза // – М.: Наука, 1984. – 248 с.

164. Мокроносов А. Т., Кудеяров В. Н. Баланс углекислого газа на территории России // Экология и почвы. Пушкино, 1998. – С.153-171.

165. Молекулярные механизмы устойчивости фотосинтетического аппарата к стрессу / В. Д. Креславский, Р. Карпентьер, В. В. Климов [и др.] // Биологические мембраны. – 2007. – Т. 24, № 3. – С. 195-217.

166. Мудрых Н. М. Биологизация земледелия – основа сохранения плодородия почв Нечерноземной зоны //Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2017. - № 9. – С. 28-34.

167. Музафаров А. М., Таубаев Т. Т., Джуманиязов И. Д. Альголизация орошаемых земель протококковыми водорослями и ее влияние повышение плодородия почв и урожайность хлопчатника //Культивирование и применение микроводорослей в народном хозяйстве. – Ташкент, 1977. – 136 с.

168. Наими О. И. Закономерности профильного распределения уреазы в черноземе обыкновенном в агроценозе //International Journal Sciences, 2019. – P. 12-14.

169. Наими О. И. О методе определения активности уреазы в почве // Высокие технологии и инновации в науке: Сборник избранных статей Международной научной конференции. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ». – 2019. – С. 17-20.

170. Наумова Г. В., Макарова Н. Л., Жмакова Н. А., Овчинникова Т. Ф. Влияние гуминовых препаратов на ферментативную активность почвы при выращивании отдельных культур //Экологический Вестник Кавказа, 2019. – Т. 15. – № 2. – С. 19-23.
171. Нестерова Л. Б. Минеральные формы азота почв Алтайского // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2003. – № 2(10). – С. 211-213.
172. Никитина Э. С., Лямин М. Я., Залиханов А. М. Анализ бактерий-ассоциантов цианобактерии *Spirulina platensis*, культивируемых в фотокультураторах - "Диалог" МГУ, Москва. – 2006. – с. 69-70
173. Новикова Е. О., Гибадуллина Н. Б., Резванова Е. Р., Гайсина Л. А. Изучение влияния BIN *Chlorella vulgaris* на рост *Anabaena spiroides* - агента цветения воды //Материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Серия «Фундаментальные и прикладные исследования» Естественные науки. – 2021. – С. 51-58
174. Новичкова-Иванова Л. Н. О роли почвенных водорослей в биогеоценозах // Развитие и значение водорослей в почвах Нечерноземной зоны: Материалы межвуз. конф. – Пермь. – 1977. – С.62-65.
175. Новоселов С. И. Влияние агроэкологических условий на аммонифицирующую и нитрифицирующую способность почвы // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2015. – Т. 1, № 4(4). – С. 42-47.
176. Овчинников Ю. А. Перспективы направления использования хлореллы в сельском хозяйстве //Аллея науки, 2017. – № 3. – С.328-331.
177. Овсянникова В. С., Фуфаева М. С., Ким Е., Алтунина Л. К. Биоразложение в почве материалов на основе криогелей поливинилового спирта и крахмала. Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2023. – Т. 66. – Вып. 11. – С. 126–134.
178. Омаров Ф. С., Омарова М. Ф. Аквакультура – фундамент биотехнологии от кормов до топлива //Фундаментальные и прикладные исследования. Разработка и

применение высоких технологий в промышленности. – С.-Петербург, 2011. – Т.2. – С. 277-279.

179. Панова Е. Н. Стифеев А. И. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова" Способ биологической рекультивации ландшафта тепловой электроцентрали с использованием микроводоросли хлорелла. Патент RU2677983C1 РФ, МПК A01B79/02. № 2018100872; Заявл.10.01.2018; Опубл. 22.01.19, Бюл. № 2.

180. Панкратова Е. М. Роль азотфиксирующих синезеленых водорослей в накоплении азота и повышении плодородия почвы: автореф. дис. ...доктора биол. наук. – М., 1981. – 39с.

181. Панкратова Е. М. Участие синезеленых водорослей в азотном балансе почв // Минеральный и биологический азот в земледелии СССР. – М.: Наука, 1985. – С.221–228.

182. Панкратова Е. М., Зяблых Р. Ю., Калинин А. А., Ковина А. Л. и др. Конструирование микробных культур на основе синезеленой водоросли *Nostoc paludosum* // Альгология. – 2014. –Т. 14. – №4. – С. 445–458.

183. Паринкина О. М., Ключева Н. В. Микробиологические аспекты уменьшения естественного плодородия почв при их сельскохозяйственном использовании// Почвоведение. – 1995. – № 5. – С. 573-581.

184. Первушкин С. В., Воронин А. В., Сохина А. А. Биомасса спироулины: исследования и перспективы использования. Самара: Самарский государственный медицинский университет. – 2004. – 100 с.

185. Перминова Г. Н., Ефремов В. Ф., Анисимова Н. Н. Зависимость численности и биомассы водорослей в почвах пшеничного поля от минеральных удобрений // Альгология. – 1992. – Т. 2. –. № 3. – С. 53–56.

186. Перт С. Д. Основы культивирования микроорганизмов. – М.: Мир, 1978. – 331 с.

187. Пигорев И. Я., Ишков И. В. Влияние паровых предшественников озимой пшеницы на плотность чернозема и серой лесной почвы в условиях лесостепи России // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2021. – № 3. – С. 6-12.
188. Пигарева, Н. Н., Пьянкова Н. А. Особенности азотного фонда почв Бурятии // Агрохимия. – 2011. – № 11. – С. 3-10.
189. Пименова М. Н., Гречушкина Н. Н., Азова Л. Г., Нетрусов А. И., Семенова Е. В., Колотилова Н. Н., Захарчук Л. М., Зинченко В. В., Мыльникова С. И., Нефедова М. В., Ботвинко И. В. Руководство к практическим занятиям по микробиологии // Под ред. Егорова Н.С. – М.: Изд. МГУ. – 1995. – 224 с.
190. Пиневиц Г. Д., Верзилин Н. Н., Михайлов А. А. Изучение *Spirulina platensis* – нового объекта высокоинтенсивного культивирования // Физиология растений. – 1970. – Т.17. – Вып. 5. – С. 1037 – 1046.
191. Полипропилен: виды, свойства и преимущества. Сферы применения и перечень производителей и продавцов. — Текст: электронный // Plastinfo: [сайт]. — URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/618/#4> (дата обращения: 15.02.2025).
192. Политаева Н. А., Жажков В. В., Зибарев Н. В., Вельможина К. А., Шинкевич П. С. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ») «Способ утилизации углекислого газа с применением микроводоросли рода *C.*». Патент. RU 2 797 838 С1 РФ, МПК. B01D 53/62 B01D 53/84; №2022119015; Заявл. 12.07.2022; Оpubл. 08.06.2023, Бюл. №16.
193. Полонская Д. Е. Микробиологические процессы и эффективное плодородие почв в агроценозах Красноярской лесостепи: монография. – Красноярск: КрасГАУ, 2002. – 101 с.
194. Пономарева В. В., Плотникова Т. А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 1980. – С.119-121.

195. Попов А. И., Чертов О. Г., Гамалей А. В. и др. Восстановление функционирования системы «почва-растение» – основа биологической рекультивации антропогенно нарушенных территорий Севера// Освоение Севера и проблемы рекультивации: III Междунар. конф.: 27–31 мая 1996 г.: матер. – Сыктывкар. – 1997. – С. 281–286.
196. Попов А. И. Органическое вещество почв агроценозов и его роль в функционировании системы почва-растение: автореф. дис. ... доктора сельскохозяйственных наук. – СПб. –Пушкин: СПб гос. Университет, 2006. – 46 с.
197. Попов А. И. Трофосистема почвы - растения - основа экосистемы// Экосистемы, их оптимизация и охрана. – No. 7(26). – 2012. – р. 251–260.
198. Попова Э. П., Лубите Я. И. Биологическая активность и азотный режим почв Красноярской лесостепи. – Красноярск, 1975. – 271с.
199. Попкова А. В., Багмет В. Б., Егупова Е. Ю., Зволинский В. П. Взаимодействие между фототрофами и микромицетами из пещерных сообществ обрастаний // Современная микология в России. Том 6. Материалы 4-го Съезда микологов России. М.: Национальная академия микологии. – 2017. – С. 393-394
200. Попков А. П., Сорокина О. А. Влияние направления использования залежей на некоторые агрофизические свойства почв // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 1(55).
201. Попкова А. В. Экология сообществ обрастаний фототрофов в подземных полостях: автореф. дисс. ... канд. биологических наук. — Москва. — 2021. — 25 с.
202. Почвы находятся под угрозой, но деградацию можно остановить. — 2021. — Текст: электронный// Цифровая платформа знаний Агроэкокомиссия: [сайт]. — URL: <https://agriecomission.com/news/pochvy-nahodyatsya-pod-ugrozoi-no-degradaciu-mojno-ostanovit> (дата обращения: 12.03.2025).

203. Прогноз научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года // Минсельхоз России; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: НИУ ВШЭ, 2017. — 140 с.
204. Прядкина Г. А., Стасик О. О., Михальская Л. Н., Швартау В. В. Связь между величиной хлорофилльного фотосинтетического потенциала и урожайностью озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при повышенных температурах // Сельскохозяйственная биология. — 2014. — Т. 49. — № 5. — С. 88-95.
205. Пути сохранения и повышения плодородия почв Красноярского края: науч.-практ. рекомендации. — Красноярск, 2020. — 48 с. С. 584-592.
206. Рабинович Г. Ю., Ковалев Н. Г., Сульман Э. М., Котлярова О. Г., Турьяский А. В., Котлярова Е. Г., Малинин Б. М.// Торетические и практические аспекты биоконверсии органических отходов. - Белгород: БелГСХА, 2004. — 80 с.
207. Рахимов А. В., Якубов Х. Ф. О некоторых биохимических свойствах штаммов хлореллы и сценедесмуса, выращенных в различных условиях питания. — Ташкент.: ФАН, 1971. — С. 47-51.
208. Регламент Таможенного союза ТР ТС 029/2012. Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств: принят Решением Совета ЕЭК от 20 июля 2012 г. № 58 // Официальный сайт Евразийской экономической комиссии. — URL: <http://docs.eaeunion.org/> (дата обращения: 12.10.2024).
209. Рожков В. А., Кузнецов И. В., Рахматуллоев Х. Р. Методы изучения корневых систем в поле и лаборатории. // [Электрон. ресурс] М.: Издательство Московского государственного университета леса. — 2008. —. — Режим доступа: https://mf.bmstu.ru/assets/files/soil_books/uchebnik42.pdf
210. Тимаков А. Г., Мамеев В. В., Павловская Н. Е., Яковлева И. В. Влияние биопрепаратов на фотосинтетическую деятельность растений ярового ячменя и структуру урожая // Агрохимия. — 2019. — № 8. — С. 34-39.
211. Толеутаев К. А. Оптические методы контроля процессов культивирования микроводоросли Хлореллы: магистерская диссертация // Национальный

исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа новых производственных технологий (ИШНПТ), Отделение материаловедения (ОМ) - Томск, 2018. – С. 11.

212. Сайфуллина Л. Б. , Чуб М. П., Пронько В. В. [и др.] Фракционный состав азота на черноземе южном в условиях длительного применения минеральных удобрений // Плодородие. – 2017. – № 5(98). – С. 12-16

213. Сафиуллина Р. Р. Цианобактериально-водорослевые ценозы чернозема обыкновенного под растениями-фитомелиорантами в Зауралье республики Башкортостан: дис. ... кандидата биологических наук. – УФА, 2014. – 187 с.

214. Селиванова М. В., Романенко Е. С., Сосюра Е. А. [и др.] Продуктивность томата при применении микроэлементов и биологически активных веществ // Овощи России. – 2017. – № 4(37). – С. 91-95.

215. Сироткин А. С., Шагинурова Г. И., Ипполитов К. Г. Агрегация микроорганизмов: флокулы, биопленки, микробные гранулы. Казань: Изд-во Фэн, 2007. – 160 с

216. Соловьева А. С., Сакаева Э. Х. Влияние одноклеточной водоросли *Chlorella vulgaris* на ферментативную активность почв при их загрязнении смазочно-охлаждающими // Химия. Экология. Урбанистика. – 2020. – Т. 1. – С. 199-204.

217. Рынок химических средств защиты растений в России 2023: показатели и прогнозы [Электронный ресурс] / Аналитическое агентство. - Электрон. дан. - 2023. - 45 с. - URL: https://example.com/rynok_hszr_v_rossii_2023_pokazateli_i_proгноzy_versiya_dlya_sajta.pdf (дата обращения: 12.10.2024).

218. Роик Б. О., Наумов М. М., Лукьянов В. А., Наумов Н. М. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова "Способ получения нуклеината натрия из сухой биомассы микроводоросли *Chlorella vulgaris* Beijerinck: Патент RU 2 747 120 С1 РФ: МПК С12Р19/34, С12N1/12. № 2020100507; Заявл. 09.01.2020; Оpubл. 28.04.2021, Бюл. № 12. – 8 с.

219. Самсонова Н. Е. Ресурсосберегающее использование удобрений в адаптивно-ландшафтном земледелии: учебное пособие. — Смоленск: Смоленская ГСХА, 2014. — 56 с.
220. Сегодня – Всемирный день почв. – 2015. – Текст: электронный // ООН: [сайт]. — URL: <https://news.un.org/ru/story/2015/12/1276351> (дата обращения: 12.03.2025).
221. Сиренко Л. А., Сакевич А. И., Осипов Л. Ф., Топачевский А. В. Методы физиолого-биологического исследования водорослей в гидробиологической практике – М.: Киев, 1975. – 247 с
222. Скороходов В. Ю., Кафтан Ю. В., Зенкова Н. А., Скороходова Е. Н. Влияние различных видов пара на влагозапасы и плотность почвы в условиях степной зоны Южного Урала //Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование, 2024. – № 3(75). – С. 104-112.
223. Скорочкин Ю. П., Воронцов В. А. Биологизация земледелия: определение, принципы и направления развития. — 2021. —Текст: электронный // Журнал Агробизнес: [сайт]. — URL: <https://agbz.ru/articles/biologizatsiya-zemledeliya-opredelenie-printsipy-i-napravleniya-razvitiya/> (дата обращения: 12.03.2025).
224. Смирнова Н. Г. Особенности развития почвенных и эпифитных цианопрокариотно-водорослевых ценозов в сообществах широколиственных лесов: автореф. дис. ... кандидата биологических наук. - Уфа, 2013. – 20с.
225. Старовойтов С. В., Халил А. С. Влияние внешних факторов на скорость биохимических реакций микроводорослей //Инженерный Вестник Дона. – 2017. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vneshnih-faktorov-na-skorost-biohimicheskikh-reaktsiy-mikrovodorosley> (дата обращения: 06.03.2025).
226. Стифеев А. И., Лукьянов В. А., Бессонова Е. А., Косинова Н. В., Ежицкая Ю. А. Агроэкологическая оценка применения микроводоросли хлореллы в АПК // Актуальные проблемы агропромышленного производства: мат. международной научно-практической конференции (Курск, 25 января 2013 г.). – Курск. – 2013. – С. 51-55.

227. Стифеев А. И., Косулин Г. С., Лукьянов В. А., Тюнина А. И. К вопросу утилизации отходов сахарной промышленности: [Электронный ресурс] // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: IV Международная науч. экологическая конф. – Курск, 2015.– С. 144 -147. – Режим доступа: <http://www.elibrary.ru>, свободный.
228. Стрижников О. А., Солошенко А. Д., Азимов Д. Д. Оценка влияния микроводоросли *Chlorella vulgaris* bin на жизнедеятельность почвенного биотического сообщества // Доклады ТСХА: Сборник статей. Выпуск 293, Москва, 02–04 декабря 2020 года. Том Часть I. – Москва: РГАУ, 2021. – С. 16-19.
229. Суханова И. М., Лукманов А. А., Яппаров И. А. [и др.] Изменение агрофизических свойств серых лесных почв при использовании вермикомпоста // Плодородие. – 2019. – № 3(108). – С. 29-32.
230. Тареев А. И., Березнов А. В., Смирнов В. В., Тареева А. А., Кислая С. С. Мировой рынок химических средств защиты растений: потенциальные потери урожая, тренды и перспективы производства пестицидов для экономики России // Техника и технология пищевых производств. – 2024. – №2. – С. 310-329.
231. Тренкеншу Р. П. Одноклеточные водоросли: массовое культивирование и практическое использование // Прикладная альгология. – 1999. – Т. 1. – С. 7 – 10.
232. Тренкеншу Р. П., Лелеков А. С. Простейшие модели роста микроводорослей. Потребность микроводорослей в элементах минерального питания // Экология моря. – 2005. – № 70. – С. 53 – 61.
233. Тренкеншу Р. П., Лелеков А. С., Боровков А. Б., Новикова Т. М. Унифицированная установка для лабораторных исследований микроводорослей // Вопросы современной альгологии. – 2017. – №1 (13). URL: <http://algology.ru/1097>
234. Туктарова Э. А., Латипова Э. И., Габидуллина Г. Г., Бадрутдинова Р. И., Сафиуллина Л. М. Влияние культуральной жидкости микроводорослей на рост и

развитие семян корнеплодов// Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – №01 (55). Ч. 2. – С. 127-130.

235. Трухницкая С. М., Хижняк С. В., Сеницына И. И. Влияние пестицидов на водоросли отдела Chlorophyta // Решетневские чтения. 2015. – №19. – С.319-321.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-pestitsidov-na-vodorosli-otdela-chlorophyta> (дата обращения: 07.03.2025).

236. Турусов В. И., Качанин А. Л., Нужная Н. А., Винокурова Е. В. Структура почвенных микромицетов – показатель состояния чернозема обыкновенного при интенсивном антропогенном использовании// Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2010. – № 6. – С. 25-28

237. Турусов В. И., Гармашова Л. В. Ферментативная активность чернозема обыкновенного на различных элементах ландшафта //Центральный научный Вестник. – 2018. – № 10 (51). – Т. 3. – С. 65-67.

238. Упитис В. В. Макро- и микроэлементы в оптимизации минерального питания микроводорослей. Рига: Изд-во «Зинатне», 1983. – 240с.

239. Управляемое культивирование микроводорослей/под ред. А. М. Лисовского М.: Наука, 1964. – 153 с

240. Уткаева В. Ф., Скворцова Е. Б., Сапожников П. М., Щепотьев В. Н. Изменение агрофизических свойств почв пойм при различных антропогенных нагрузках // Почвоведение. – 2009. – № 2. – С. 167-177.

241. Федоренчик А. А., Мельникова Н. В., Алещенкова З. М., Щур А. В. Создание микробно-растительной ассоциации для фиторемедиации почвы, загрязненной нефтью и продуктами ее переработки// Биотехнология и качество жизни: материалы междунар.науч.-практ. конференции, Москва, 18-20 марта 2014 г. – М.: Изд-во: Закрытое акционерное общество «Экспобиохимтехнологии». – 2014. – С.426-427.

242. Фадькин Г. Н., Виноградов Д. В., Щур А. В. Миграция азота в системе «удобрение-почва-растение» под влиянием длительного применения удобрений

- [Электронный ресурс]. // АгроЭкоИнфо. – 2015. – №4. Режим доступа: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/st_15/doc.
243. Фомина Н. В., Демиденко Г. А., Сорокин Н. Д. Эколого-микробиологический мониторинг почвы лесного питомника Красноярского края // Вестник КрасГАУ. – 2006. – № 10. – С. 146-152.
244. Франк Р. И. Кищенко В. И. Биопрепараты в современном земледелии // Защита и карантин растений. – 2008. – № 4. – С. 30.
245. Франц Й., Криг А. Биологические методы борьбы с вредителями / Пер. с нем. и предисл. И. Н. Заикиной. – Москва: Колос, 1984. – 351[1]. – 238 с.
246. Харченко А. Г. Восстановление почвенного плодородия // Ресурсосберегающее земледелие, 2011. – №3. – С. 36-40.
247. Хазиев Ф. Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. – М.: Наука. – 1982. – 203 с.
248. Хазиев Ф. Х., Кабиров Р. Р. Количественные методы почвенно-альголистических исследований. – Уфа: БФАН СССР, 1986. – 172 с.
249. Хазиев Ф. Х., Гулько А. Е. Ферментативная активность почв агроценозов и перспективы ее изучения // Почвоведение. – 1991. – № 8. – С. 88-103.
250. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. – М.: Наука, 2005. – 250 с.
251. Хазиев Ф. Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех, 2018. – Т.1. – № 2. – С. 80-91.
252. Халюткин В. А., Сидельников Д. А. и др. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет Устройство для разрушения оболочек хлореллы. Патент RU 2767255 C1 РФ МПК В02С19/00 С12N. № 2021129896; Заявл. 14.10.2021; Оpubл. 16.03.2022, Бюл. №8.
253. Цианобактерии как биоагенты против борьбы с патогенами растений (обзор) / А. В. Юсупова, Л. Д. Губайдуллина, В. А. Чумак [и др.] // Фундаментальные и прикладные исследования: естественные науки : Материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых и студентов , Уфа, 30 апреля

- 2021 года. – Уфа: Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, 2021. – С. 102-107.
254. Цоглин Л. Н., Пронина Н. А. Биотехнология микроводорослей – Москва: Научный мир, 2012. – 184 с.
255. Чаплина, А. А. Анализ возможностей использования биологически активных соединений в технологии кондитерских изделий / А. А. Чаплина // Сборник трудов X Конгресса молодых ученых: Материалы Конгресса, Санкт-Петербург, 14–17 апреля 2021 года. Том 2. – Санкт-Петербург: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО", 2021. – С. 184-186.
256. Чупрова В. В. Углерод и азот в агроэкосистмах Средней Сибири. – Красноярск, 1997. – 166с.
257. Чурсин А. И., Незванова К. В. Методы борьбы с деградацией почв в РФ// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6-1. – С. 88-91.
258. Шабанов В. В., Солошенко А. Д. Количественные методы оценки плодородия для целей точного мелиоративного регулирования // Природообустройство. – 2020. – № 4. – С. 13-22.
259. Шалыго Н. В. Микроводоросли и цианобактерии как биоудобрение //Наука и инновации, 2019. – № 3. – С. 10-12.
260. Шалыго Н. В., Мельников С. С. Хозяйственно полезные виды водорослей // Наука и инновации. 2009. – №3 (73). – С. 34–38.
261. Шаповал О. А., Можарова И. П. Ауксин и эффективность применения синтетических регуляторов роста класса ауксинов в период корнеобразования сельскохозяйственных и декоративных культур// МСХ. 2021. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/auksin-i-effektivnost-primeneniya-sinteticheskikh-regulyatorov-rosta-klassa-auksinov-v-period-korneobrazovaniya-selskohozyaystvennyh> (дата обращения: 16.04.2025).

262. Шемякин М. М., А. С. Хохлов Химия антибиотических веществ. - М.; Л.: Гос. научно-техн. изд-во хим. лит., 1949. – С. 230
263. Шегорец О. В. Становление, проблемы и перспективы биологизации земледелия России и Дальнего Востока //Аграрный вестник Приморья. 2019. – № 4(16) – С.5-8.
264. Щербакова Т. А. Почвенные ферменты, их выделение, свойства и связи с компонентами почвы // Почвоведение, 1980. – № 5. – С. 85–92.
265. Ширяева Н. В., Ширяев А. В., Кузнецова Л. Н., Романцова И. Е. Структурное состояние почвы в посевах разных сортов озимой пшеницы //Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2020. – № 3(27). – С. 114-121.
266. Штина Э. А., Голлербах М. М. Экология почвенных водорослей. – М.: Наука, 1976. – 143 с.
267. Штина Э. А., Байрамова Л. А., Перминова Г. Н., Третьякова А. Н. Взаимодействие между почвенными водорослями и высшими растениями // Физика, химия, биология и минералогия почв СССР. –М.: Наука, 1964. – С.284–292.
268. Щур А. В. Экологические особенности микробиоты почв в условиях радиоактивного загрязнения территории Республики Беларусь при применении биологически активных препаратов [Электронный ресурс]. / А. В. Щур, Д. В. Виноградов // АгроЭкоИнфо. – 2016, №1. Режим доступа: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2016/1/st_51.doc
269. Щур А. В. Экологические подходы к оптимизации состава почвенного микроценоза как основа поддержания стабильной производительной способности агроэкосистем: дис. ...доктора биологических наук. –Могилев, 2016. – 326 с.
270. Юдаков А. С. Биоремедиация почв с помощью зеленых водорослей и микромицелиальных грибов: Российский университет дружбы народов, Экологический факультет, Кафедра экологического мониторинга и прогнозирования. – Москва: 2021. – 70 с.

271. Юсупов Б. Ю., Аймаханов М. С. Влияние цианобактерий на биологическую активность почвы //Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» (дата обращения: 13.04.2025)
272. Abdel-Hamid M. S., Hamouda R. A. EF., Abd El-Aal H. *et al.* Distinctive application of the consortium of *Chlorella vulgaris* and *Anabaena oryzae* toward different planting dates and climate change on jerusalem artichoke yield. // J Plant Growth Regul. - №41. – 2022. – P. 479–493. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10309-2>
273. Abedin R. M. A., Taha H. M. Antibacterial and antifungal activity of cyanobacteria and green microalgae. Evaluation of medium components by Plackett-Burman design for antimicrobial activity of *Spirulina platensis* //Global Journal of Biotechnology and Biochemistry. – 2008. – Т. 3. – №. 1. – С. 22-31.
274. Abreu A. P, Martins R, Nunes J. Emerging Applications of *C. sp.* and *Spirulina (Arthrospira) sp.* //Bioengineering (Basel). – 2023. – Aug 11. – 10(8):955. doi: 10.3390/bioengineering10080955. PMID: 37627840; PMCID: PMC10451540.
275. Al-Nazwani, Mahmoud S. et al. Antifungal activity of *Chlorella vulgaris* extract on black scab disease, growth performance and quality of potato. // Archives of Plant Pathology and Plant Protection. – 54. –2021. – P. 2171–2190.
276. Alobwede E., Leake J. R., Pandhal J. Circular economy fertilization: Testing micro and macro algal species as soil improvers and nutrient sources for crop production in greenhouse and field conditions. // Geoderma, 2020. – 334, 113–123. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.07.049
277. Alvarenga P., Martins M., Ribeiro H., Mota M., Guerra I., Cardoso H., Silva J.L. Evaluation of the fertilizer potential of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* grown in agricultural drainage water from maize fields. // Sci Total Environ. –2023–Feb. 25;861: 160670.doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160670
278. Ammar E. E., Aioub A. A. A., Elesawy A. E., Karkour A. M., Mouhamed M. S., Amer A. A. , El-Shershaby N. A. Algae as bio-fertilizers: between current situation and future prospective. //Saudi J Biol Sci-2022.-Vol. 29.- P. 3083-3096.

279. Babadzhanyov A. S. Chemical Composition of *Spirulina Platensis* Cultivated in Uzbekistan (англ.) // Chemistry of Natural Compounds: journal. – Vol. 40. – no. 3. – P. 2004.
280. Becker W. Microalgae in human and animal nutrition // Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. – 2004. – P. 312-315.
281. Bhatt N. C., Panwar A., Bisht T. S., Tamta S. Coupling of algal biofuel production with wastewater // Sci. World J. 2014. – V. 2014. – Art. 210504. <https://doi.org/10.1155/2014/210504>.
282. Bhatnagar A., Chinnasamy S., Singh M., Das K. C. Renewable biomass production by mixotrophic algae in the presence of various carbon sources and wastewaters //Applied energy. – 2011. – T. 88. – №. 10. – C. 3425-3431.
283. Bold H. C. The cultivation of algae // Bot. Rev. – 1942. – V. 8. – P. 69–138.
284. Brück, W. M., Alfonso, E., Rienth, M., Andlauer, W. Heat stress resistance in *Chlorella vulgaris* enhanced by hydrolyzed whey proteins. // Agronomy. – 2024. – №14.- P. 2854.
285. Caceres T. P., Megharaj M. G., Naidu R. Z. Biodegradation of the pesticide fenamiphos by ten different species of green algae and cyanobacteria //Current Microbiology. –2018. – 57(6) – P.46-52.
286. Chatterjee A., Singh S., Agrawal C., Yadav S., Rai R., Rai L. C. Role of algae as a biofertilizer //Algal Green Chemistry. – 2017. – P. 189-200.
287. Chaumont D. Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture // J. Appl. Phycol. – 1993. – V. 5. – №6. – P. 593-604.
288. Chamizo S., Mugnai G., Rossi F., Certini G., De Philippis R. Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: Gaining insights for applicability in soil restoration. // Front. Environ. Sci., 2008. – 6. – P. 49.
289. Chisti Y., Biodiesel from microalgae// Biotechnology Advances. – 2017.– V. 25. – Issue 3. – P. 294-306/
290. Chrost R. J. The composition and bacterial utilization of DOC released by phytoplankton. //Kieler Meeresforsch Sonderh. –1981. – 5. – P.325–332.

291. Crouzet O, Consentino L, Pétraud J. P., Marraud C, Aguer J. P., Bureau S, Le Bourvellec C., Touloumet L., Bérard A. Soil photosynthetic microbial communities' mediate aggregate stability: Influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil. // *Frontiers in microbiology*. – 2021. – V.10 – P. 8-19.
292. Deepika P., Mubarak Ali D. Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants. // *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 2020. – 28. – 101701. doi: 10.1016/j.bcab.2020.101701
293. Dejaux J. F., Recous S., Meynard J. M. The fate nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxes to the environment and uptake by rapeseed crop in spring. *Plant and soil*. 2000. – V. 218. – № 1-2. – P. 257-272.
294. Falaise C., François C., Travers M. A, Morga B., Haure J., Tremblay R., Turcotte F., Pasetto P., Gastineau R., Hardivillier Y., Leignel V., Mouget J. L. Antimicrobial compounds from eukaryotic microalgae against human pathogens and diseases in aquaculture falaise// *Mar Drugs*. – 2016. – Sep. 2. – V.14 (9). – P.159.
295. Gao Q. T., Wong Y. S., Tam N. F. Y. Removal and biodegradation of nonylphenol by immobilized *Chlorella vulgaris* // *Bioresource Technolog.* – 2011. – V. 102. – I. 22. – P. 10230–10238.
296. Gauthier M. R., Senhorinho G. N. A., Scott J. A. Microalgae under environmental stress as a source of antioxidants. // *Algal Research*. – V. 52.- 2020.- P.102-104.
297. Ghasemi Y. et al. Antifungal and antibacterial activity of the microalgae collected from paddy fields of Iran: characterization of antimicrobial activity of *Chroococcus dispersus*. – 2007.– V. 7. – P. 904–910.
298. Gitau M. M., Farkas A., Balla B., Maróti G., Ördög V., Futó Z. Strain-specific biostimulant effects of *Chlorella vulgaris* and *Chlamydomonas* green microalgae on *Medicago truncatula*// *Plants*. – 2021. – 10. – 1060. – Vol. 18. <https://doi.org/10.3390/plants10061060>
299. Global C. Market – Industry Trends and Forecast to 2029. —2022. — Текст: электронный // Data Bridge market research: [сайт]. — URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-C.->

market?srsltid=AfmBOoq1fft7PDT83cYL-

%20%20%20%20%20%20WhZs8Ecez0DxQRxbuVpmfjEdb4gMb1EmfJN;%20https://elibrary.ru/download/elibrary_45671400_11128518.pdf. (дата обращения: 12.03.2025).

300. Goncalves A. L. The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: a review of their biofertilizing, biostimulating and biopesticide roles//Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – T. 11. – № 2. – С. 1-21.

301. Groom M. J., Gray E. M., Townsend P. A. Biofuels and biodiversity: principles for creating better policies for biofuel production. //Conservation Biology. – 2008. – 22(3). – P.602-609.

302. Heimbach U. Erfahrungen mit dem biologischen pflanzenschutz im ankerbau in Deutschland. //J. fur Kulturpflanzen. – 2010. – V. 62. – №. 3. – P. 89 - 92.

303. Helliwell K. E. The roles of B vitamins in phytoplankton nutrition: new perspectives and prospects // New Phytologist. –2017. – V. 216. – iss. 1. – P. 62–68.

304. Imane H., Doumandji A. Comparative phytochemical analysis and in vitro antimicrobial activities of the cyanobacterium *Spirulina platensis* and the green alga *Chlorella pyrenoidosa*: potential application of bioactive components as an alternative to infectious diseases. //Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie. – 2017. – № 39. – P. 41-49

305. Jiraskova D. High-throughput screening technology for monitoring phytohormone production in microalgae // J. Phycol. – 2009. – V. 45. – P. 108–118.

306. Jung Ch. G, Braune S., Waldeck P., Küpper J. H., Petrick I., Jung F. Morphology and growth of *Arthrospira platensis* during cultivation in a flat-type bioreactor //Life (Basel). – 2021. – Jun 9. –11(6). – p. 536.

307. Khadija A. T., Abd-Wahab R. A., Fadhil A. M. Effect of ethanolic extract of *Chlorella sp.* on *Entamoeba histolytica* parasite in vivo. //Plant. – Arch. 2020. – 20. –P.1975–1978.

308. Kumar J., Singh D., Tyagi M. B., Kumar A. Cyanobacteria: Applications in biotechnology. //Cyanobacteria. – 2018. – P. 327-346.

309. Lababpour A. A mathematical representation of microalgae distribution in aridisol and water scarcity, *Biogeosciences Discussions*. – 2017. – P/ 1-18.
310. Lababpour A. Potentials of the microalgae inoculant in restoration of biological soil crusts to combat desertification // *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016. – T. thirteen. – No. 10. – P. 2521–2532.
311. Liang Y., Sarkany N., Cui Y. Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions // *Biotechnol. Lett.* – 2009. – V. 31. – P. 1043 – 1049.
312. Llieva Y. Y., Zaharieva M. M., Kroumov A. D., Najdenski H. Antimicrobial and ecological potential of *Chlorellaceae* and *Scenedesmaceae* with a focus on wastewater treatment and industry // *Fermentation*. 2024. – 10(7) –. 341. – P. 1-46
313. Lowrey J., Brooks M. S., McGinn P. J. Heterotrophic and mixotrophic cultivation of microalgae for biodiesel production in agricultural wastewaters and associated challenges. A critical review. // *Journal of applied phycology*. – 2015. – 27. – P. 1485-1498.
314. Mahmoud A. A., Mostafa Soha S. M., Abd El-All, Azza A. M, Hegazi A. Z. Effect of cyanobacterial inoculation in presence of organic and inorganic amendments on carrot yield and sandy soil properties under drip irrigation regime. // *Egypt J. Basic Appl Sci.* – 2007. – 22. – P.716–733.
315. Maksimova I. V., Sidorova O. A. Light-dependent antibacterial effect of algae and its ecological significance (a Review). // *Gidrobiol. Zhurnal*. – 1986. – 22. – P. 3–11.
316. Mallick N., Rai L. C. Removal of inorganic ions from wastewaters by immobilized microalgae // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 1994. – 10 (4). – P. 439-443.
317. Mallick N., Bagchi S. K., Koley S., Singh A. K., Progress and challenges in microalgal biodiesel production// *Frontiers in microbiology*. – 2016. – № 7. – P. 1019.
318. Markou G., Eliopoulos C., Argyri A., Arapoglou D. Production of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* enriched in β -glucans through phosphorus limitation// *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2021. – V. 11. – No. 17

319. Mata T. M., Martins A. A., Caetano N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – V.14(1). – P.217-232.
320. Murray M., Murphy J., McMahon T. Comparative carbon fixation in microalgae and higher plants// Journal of Applied Phycology. – 2021. – 33(4). –P.2509-2520.
321. Mutum L., Janda T., Ördög V., Molnár Z. Biologia Futura: potential of different forms of microalgae for soil improvement// Biologia futura. –2022. –№ 73. – P. 1–8.
322. Nichols K. Microalgae as a beneficial soil amendment//Soil science from the university of Maryland in 2003. – April 2020. – P. 22.
323. Ogawa T., Aiba S. Bioenergetic analysis of mixotrophic growth in *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus*//Biotechnology and bioengineering. –1981. –V. 23. – № 5. – P. 1121– 1132.
324. Ogbonna J. C., Masui H. , Tanaka H. Sequential heterotrophic/autotrophic cultivation—an efficient method of producing C. biomass for health food and animal feed//Journal of applied phycology . – 1997. – No 9. – P. 359-366.
325. Ogbonna J. C., Tanaka H. Effect of light intensity on the growth and photosynthetic activity of *Chlorella vulgaris*//Biotechnology and bioengineering. –2001. –No 33(3). – P. 291-299.
326. Ozdemir F. O., Ekinici K., Uysal O. Determination of fertilizing characteristics of three different microalgae cultivated in raceways in greenhouse conditions// Lucrări Științifice, seria Agronomie. – 2016. – V. 59(1). – P.14-18.
327. Paudel Y. P., Pradhan S., Pant B., Prasad B. N. Role of blue green algae in rice productivity // Agriculture and Biology Journal of North America. – 2012. – V.3. – №8. – P. 332–335
328. Poorter H., Niklas K.J., Reich P. B., Oleksyn J., Poot P., Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. // New Phytologist. – 2012. – №193. – P. 30-50.

329. Pratt R., Oneto J., Pratt J. Studies on *Chlorella vulgaris*. X. Influence of the age of the culture on the accumulation of Chlorellin. // Chemistry American Journal of Botany. –1945. –V. 32. –№. 7. – P. 405-408
330. Pratt R., Mautner H., Gardner G. M., Sha Y., Dufrenoy J. Report on antibiotic activity of seaweed extracts //J. Am. Pharm. Assoc. –Nov., 1951. –, V. 40. –issue11. – P. 575–579.
331. Qu L., Wang R., Zhao P. et al. Interaction between *Chlorella vulgaris* and bacteria: interference and resource competition //Acta Oceanol. Sin. 33. – 2014. – P.135–140
332. Redmile-Gordon M., Gregory A. S., White R. P., Watts C. W. Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use. //Geoderma, 2020. – P. 363.
333. Riobbo C., Gonzáles O., Herrero C., Cid A. Physiological response of freshwater microalga (*Chlorella vulgaris*) to triazine and phenylurea herbicides // Aquat. Toxicol. – 2002. – V. 59. – . № 3–4. – P. 225–235.
334. Robertson G. P. Nitrogen use efficiency in row crop agriculture: crop nitrogen uses and soil nitrogen loss // Ecology in Agriculture / Ed. L.E. Jackson. N.Y., USA: Academic Press, 1997. – P. 347–365.
335. Schreiber C., Schiedung H., Harrison L. et al. Evaluating potential of green alga *Chlorella vulgaris* to accumulate phosphorus and to fertilize nutrientpoor soil substrates for crop plants // J. Appl. Phycol, 2018. – V. 30. – № 5. – P. 2827–2836.
336. Selivanova E. A., Ignatenko M.E., Nemtseva N.V. Antagonistic activity of novel green microalgae strains // Journal of microbiology, epidemiology and immunobiology. – 2014. – V. 91. – №. 4. – P. 72-76.
337. Shukla A. C., Gupta A. B. Influence of algal growth-promoting substances on growth, yield and protein contents of rice plants // Nature. – 1967. – V. 213. – №5077. – P.744-744.
338. Solovchenko A., Verschoor A. M., Jablonowski N. D., Nedbal L. Phosphorus from wastewater to crops: An alternative path involving microalgae // Biotechnol. Adv. – 2016. – V. 34. – № 5. – P. 550–564.

339. Spain O., Plöhn M., Funk Ch. The cell wall of green microalgae and its role in the removal of heavy metals// *Physiologia Plantarum*. – 25 March 2021. – V.126– P. 81–96.
340. Spoehr H. A., Milner H. W. The chemical composition of *Chlorella vulgaris*. Effect of environmental conditions. // *Plant Physiol.* – 1949. – Jan. – № 24(1). –P.120–149.
341. Thoré E. S. J., Muylaert K., Bertram M. G., Brodin, T. // *Microalgae. Curr. Biol.* – 2023. – No 33. – P.91– R95.
342. Tiwari O. N., Bhunia B., Mondal A., Gopikrishna K., Indrama T. System metabolic engineering of exopolysaccharide-producing cyanobacteria in soil rehabilitation by inducing the formation of biological soil crusts: A review. // *J. Clean. Prod.*, 2019. – 211. – 70–82.
343. Uysal O., Uysal F. O., Ekinçi K. Evaluation of microalgae as microbial fertilizer. // *European Journal of Sustainable Development*. - June 2015. - 4.- P. 77-82.
344. Venkataraman L. // *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell Biology and Biotechnology*, edited by Avigad Vonshak. – *Journal of Applied Phycology*. – 1997. – No 9. –P.295–296.
345. Volk R. B. Screening of microalgal culture media for presence of algicidal compounds and isolation and identification of two bioactive metabolites, excreted by the cyanobacteria *Nostoc insulare* and *Nodularia harveyana* // *J. Appl. Phycol.* – 2005. – V. 17. – No 4. – P. 339.
346. Watanabe K., Takihana N., Aoyagi H., Hanada S., Watanabe Y., Ohmura N., Saiki H., Tanaka H. // *Symbiotic association in C. culture*. *FEMS Microbiol Ecol.* – 2005 Jan.1 – No.51(2). – V.9. – P.87-96.
347. Yang C., Hua Q., Shimizu K. // *Energetics and carbon metabolism during growth of microalgal cells under photoautotrophic, mixotrophic and cyclic light-autotrophic/dark-heterotrophic conditions*. – *Biochem Eng J.* – 2000. –No.6. – V.15. – P.87–102.

348. YATAN Продажа красной икры. Состав красной икры: [сайт]. — URL: <https://yatan.ru/index.php/composition-of-red-caviar> (дата обращения: 12.03.2025).
349. Zhang X., Davidson E. A., Mauzerall D. L., Searchinger T. D., Dumas P., Shen Y. Managing nitrogen for sustainable development // Nature. 2015. –V. 528. – P. 51–59.
350. Zelitch I. Photosynthesis, photorespiration and plant productivity. Academic Press. – Elsevier. – 2012. – V. 362. – P. 275.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П. 1 - Содержание агрономически ценных фракций и плотность агрочернозема в агроценозе пшеницы (0-20 см)

Вариант	АЦФ, % (n = 3)		d, г/см ³ (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	33,0	71,3	1,02	0,91
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	47,1	77,7	0,92	0,70
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	54,4	74,2	0,85	0,74
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	48,2	74,6	1,06	0,82
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	44,0	64,9	1,04	0,77
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	42,7	69,6	1,01	0,88
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	44,4	81,8	1,00	0,84

Таблица П. 2 - Влажность и запасы продуктивной влаги в агрочерноземе
агроценоза пшеницы (0-20 см)

Вариант	Влажность, % (n = 3)		ЗПВ, мм (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	31,9	31,4	40,6	35,2
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	32,6	30,7	37,8	26,2
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	31,3	31,2	32,9	28,3
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	29,8	31,1	37,4	31,2
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	32,1	30,4	41,8	28,2
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	33,1	30,9	39,9	33,1
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	30,7	31,8	37,3	31,6

Таблица П.3 - Содержание гумусовых веществ в агрочерноземе агроценоза
пшеницы (0-20 см)

Вариант	Сгумуса, мгС/100г (n = 3)		СН ₂ О, мгС/100г (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	3766,9	3740,7	10,5	16,7
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	3633,3	3561,6	18,0	12,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	3578,0	3563,2	12,0	15,3
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	3713,1	3719,3	16,0	16,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	3714,2	3526,1	11,5	14,3
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	3744,8	3734,4	18,2	18,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	3726,1	3781,7	13,5	20,5

Таблица П.4 – Реакция среды и содержание Нобщ в агрочернозёме (0-20 см)

Вариант	рНН ₂ О (n = 3)		Нобщ, % (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	7,1	6,9	0,41	0,40
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	7,1	7,0	0,40	0,40
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	7,1	7,2	0,41	0,41
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	7,1	6,8	0,41	0,42
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	7,0	6,8	0,40	0,42
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	6,9	6,9	0,40	0,42
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	6,8	7,0	0,41	0,43

Таблица П.5 – Содержание гидролизующих форм азота в агрочернозёме
(0-20 см)

Вариант	НТГ, мг/кг (n = 3)		НЛГ, мг/кг (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	283,5	304,5	144,2	147,7
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	269,5	294,0	149,1	155,4
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	273,0	262,5	152,6	142,8
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	273,0	301,0	159,6	162,4
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	280,0	301,0	139,3	165,9
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	280,0	283,5	168,7	154,7
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	294,0	283,5	186,2	162,4

Таблица П.6 – Содержание минеральных форм азота в агрочернозёме (0-20 см)

Вариант	N-NH ₄ , мг/кг (n = 3)		N-NO ₃ , мг/кг (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	4,0	14,8	3,3	1,7
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	4,7	5,5	5,3	3,0
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	3,5	5,3	5,0	4,2
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	6,9	7,7	4,8	4,8
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	7,9	22,6	4,5	4,1
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	17,4	7,4	4,6	3,6
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	18,4	4,6	5,0	2,9

Таблица П.7 – Содержание подвижного фосфора и обменного калия в агрочерноземе агроценоза пшеницы (0-20 см)

Вариант	Р ₂ О ₅ , мг/кг (n = 3)		К ₂ О, мг/кг (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	184,4	153,1	221,5	254,4
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	134,2	157,8	255,8	292,5
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	167,2	196,4	269,1	312,3
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	195,1	139,9	289,5	319,5
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	155,1	170,0	263,4	330,4
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	158,3	138,3	285,7	270,6
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	174,8	168,6	309,0	336,4

Таблица П.8 – Потенциальная интенсивность дыхания и протеазная активность агрочернозема в агроценозе пшеницы (0-20 см)

Вариант	CO ₂ , мг/10г (n = 3)		Протеаза, мг аминного азота/10г почвы за 20 часов (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	5,3	2,8	0,30	0,26
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	4,0	2,3	0,38	0,33
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	4,5	3,8	0,32	0,47
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	3,3	2,7	0,39	0,39
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	4,2	2,3	0,35	0,38
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	4,5	4,2	0,38	0,45
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	4,3	4,5	0,27	0,42

Таблица П.9 – Уреазная и каталазная активность агрочернозема в агроценозе пшеницы (0-20 см)

Вариант	Уреаза, мгNH ₄ /10г/24ч (n = 3)		Каталаза, мл 0,1 н KMnO ₄ /г сух. почвы за 20 минут (n = 3)	
	срок определения			
	июнь	август	июнь	август
Контроль (химическая защита - фон)	16,2	22,2	0,18	0,19
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (1-кратная)	17,1	15,0	0,17	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (2-х-кратная)	15,9	18,3	0,17	0,19
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> (3-х-кратная)	15,6	18,0	0,14	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (1-кратная)	17,7	18,3	0,18	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (2-х-кратная)	17,6	14,1	0,19	0,18
Фон + суспензия <i>C. vulgaris</i> термически обработанная (3-х-кратная)	17,5	20,7	0,18	0,18

Таблица П.10 – Статистические параметры содержания Сгк в агрочерноземе,
мгС/100

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)				СреднееА
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)		
	<i>Xcp</i>	<i>Cv</i> , %	<i>Xcp</i>	<i>Cv</i> , %	
0-20 см					
Контроль	284,7	17	459,4	10	372,1
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	320,6	22	389,7	29	355,2
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	237,7	46	386,6	23	312,2
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	279,6	17	304,6	20	292,1
<i>A. platensis</i> (гранулы)	263,6	17	306,2	11	284,9
<i>p A = 0,0000*</i> ; <i>p B = 0,0000*</i> ; <i>p AB = 0,0003*</i>					
20-40 см					
Контроль	268,0	14	416,6	3	342,3
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	307,9	24	419,5	22	362,3
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	271,5	6	402,8	7	337,2
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	287,9	11	297,3	22	292,6
<i>A. platensis</i> (гранулы)	284,3	8	296,3	8	290,3
<i>p A = 0,0000*</i> ; <i>p B = 0,0000*</i> ; <i>p AB = 0,0048*</i>					

Таблица П.11 – Статистические параметры содержания Сфк в агрочерноземе,
мгС/100

Вариант (фактор А)	Год (фактор В)				СреднееА
	2022 г. (n = 12)		2023 г. (n = 12)		
	\bar{X}_{cp}	$Cv, \%$	\bar{X}_{cp}	$Cv, \%$	
0-20 см					
Контроль	191,9	49	185,7	66	188,8
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	177,6	16	226,4	36	202,0
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	202,5	30	177,1	38	189,8
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	163,2	40	159,9	31	161,6
<i>platensis</i> (гранулы)	170,7	28	136,1	36	153,4
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0058^*$					
20-40 см					
Контроль	124,1	38	198,1	6	161,1
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	193,4	53	180,2	33	186,8
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	200,6	27	186,2	43	193,4
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	123,0	30	146,1	55	134,6
<i>A. platensis</i> (гранулы)	109,2	43	128,2	21	118,7
$p A = 0,0000^*$; $p B = 0,0000^*$; $p AB = 0,0001^*$					

Таблица П.12 - Урожайность яровой пшеницы, т/га

Вариант	2022г.	2023г.
Контроль	3,27	2,54
<i>C. vulgaris</i> (суспензия 1 % раствор)	4,02	3,32
<i>C. vulgaris</i> (гранулы)	3,73	3,76
<i>C. vulgaris</i> + <i>A. platensis</i> (гранулы)	3,76	3,10
<i>A. platensis</i> (гранулы)	3,79	3,77

УТВЕРДЖАЮ:

«Красноярский государственный аграрный университет»

Н.И. Пыжикова
« 17 » 9 2025г.



Результаты научных исследований Н.В. Абакумовой по теме: «Агроэкологическая оценка биопрепаратов на основе микроводорослей для повышения продуктивности системы почва-растение» используются в учебном процессе кафедры почвоведения и агрохимии Института агроэкологических технологий ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» по дисциплинам: «Агропочвоведение», «Агрохимия» (для направлений 35.03.03 «Агрохимия и агропочвоведение», 35.03.04 «Агрономия») и «Управление плодородием почв», «Устойчивость почв» (для направления 35.04.03 «Агрохимия и агропочвоведение»).

Протокол № 1 от 17.09.2025г.

Зав. кафедрой
почвоведения и агрохимии

[Signature]

О.А. Власенко

Директор Института
Агроэкологических технологий
ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ»

Busch

В.В. Грубер