

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**



На правах рукописи

Щеглов Глеб Андреевич

**Разработка технологии очистки сточных вод горнодобывающих
предприятий от неорганических соединений азота в условиях
северных широт России**

1.5.15. Экология (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Институте проблем промышленной экологии Севера – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН)

- Научный руководитель: **Маслобоев Владимир Алексеевич**,
доктор технических наук, научный руководитель
Института проблем промышленной экологии Севера,
советник генерального директора Кольского научного
центра Российской академии наук, г. Апатиты
- Официальные оппоненты: **Ксенофонов Борис Семенович**,
Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой технологий промышленной экологии
Московского государственного технического
университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э.
Баумана)
- Ульрих Дмитрий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, декан Факультета
инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-
Петербургского государственного архитектурно-
строительного университета (СПбГАСУ)
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
- КарНЦ РАН

Защита состоится 07 апреля 2026 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций РХТУ.1.5.01, созданного на базе Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева, по адресу: 125047 Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9, Конференц-зал (аудитория 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева, а также на официальном сайте:

https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета РХТУ.1.5.01
кандидат технических наук, доцент

Я. П. Молчанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования подтверждается рядом нормативных правовых актов в области снижения загрязнения водных систем, что особенно важно для Арктической зоны Российской Федерации:

В стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г № 176) среди задач выделяются: снижение сбросов загрязненных сточных вод в водные объекты, включая восстановление водных экосистем; устранение источников загрязнения, таких как промышленные и бытовые стоки, которые приводят к деградации рек и морей. В документе отмечается, что 19% сточных вод в России сбрасываются без очистки, а 70% – недостаточно очищенными.

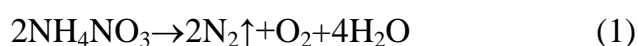
Одним из примеров загрязнения озерно-речных систем из-за деятельности горнодобывающего предприятия является система реки Кенти, подвергшаяся воздействию предприятия АО «Карельский окатыш» в городе Костомукша, Республика Карелия, на Северо-Западе России. Данное предприятие специализируется на добыче и переработке железной руды, а его доля в общем объеме производства железорудных окатышей в России составляет 20%. С 1994 года осуществляется регулируемый сброс сточных вод в систему реки Кенти.

В 2019 году предприятию было предписано принять меры по недопущению нарушений требований к качеству воды водных объектов рыбохозяйственного значения – озера Окуневое и ручья Безымянный, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций. Несмотря на то, что с 2019 года в Российской Федерации применяются подходы эколого-технологического регулирования объектов I категории негативного воздействия на окружающую среду, в отношении сокращения содержания веществ, для которых не установлены технологические показатели, могут выдвигаться требования соответствия состава воды принимающих водных объектов в контрольных точках ПДК.

За три десятилетия деятельность АО «Карельский окатыш» привела к изменению химического состава воды в озерно-речной системе. Наблюдается увеличение концентрации нитратов, аммония, а также калия, сульфатов, лития, никеля. Для очистки от соединений азота сточных вод хвостохранилища перед сбросом в природные водные объекты применяются биологические методы, однако их использование ограничено в климатических условиях северных широт России.

В настоящее время на предприятии внедряются фитоочистные системы с использованием растительных организмов. Однако эффективность очистки техногенных сточных вод от азотсодержащих соединений недостаточна. После внедрения фитоочистки концентрация ионов аммония в воде снизилась на 53-90%, содержание нитратов – на 15-20%. Требуется совершенствование технологий очистки сточных вод от неорганических соединений азота. Кроме того, фитоочистные системы имеют недостаток в виде вторичного загрязнения воды вследствие отмирания части растений.

В процессе взрыва нитрат аммония разлагается с выделением энергии и тепла на кислород, воду и азот по уравнению 1.



Не вся масса азота переходит в газообразную форму в процессе. Часть взрывчатых веществ подвергается неполному разложению, из-за чего образуются неорганические соединения азота.

Примерно 4% общей массы соединений азота из взрывчатых веществ попадает в воду после взрывных работ. Сброс сточных вод в открытые водные объекты и дальнейшее распространение загрязнения по озерно-речным системам приводит к загрязнению воды, вызывая негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека. Поэтому разработка технологических решений, обеспечивающих надлежащую очистку сточных вод от неорганических соединений азота для горнодобывающих предприятий, представляет собой актуальную задачу.

Степень разработанности темы. Работы Родионова А.И., Клушина В.Г., Торочешникова Н.С. являются фундаментальными в области водоподготовки и очистки сточных вод, особенно с использованием сорбционных и реагентных методов. Для удаления соединений азота из сточных вод наиболее эффективны технологии биологической очистки вод, использующие растительные организмы, сообщества микроорганизмов и микроводоросли для удаления загрязняющих веществ. Наряду с биологическими методами, активно развиваются и технологии физико-химической очистки. Например, Ксенофонов Б.С. предложил усовершенствованную технологическую схему физико-химической очистки сточных вод, демонстрирующую высокую эффективность для ряда загрязняющих веществ. Значительный вклад в разработку экологически безопасных технологий и методов очистки внесли Кручинина Н.Е., Макарова А.С., Колесников А.В.. В области создания новых материалов и методов

для охраны окружающей среды и водоподготовки важны работы Бубнова А.Г., Цветкова А.С., Буймовой С.А., Локтевой Е.С., Перминовой И.В., Петросяна В.С.. Вопросы проектирования и повышения эффективности очистных сооружений и водоснабжения освещены в исследованиях Самбурского Г.А., Погорелого А.М., Леонтьевой С.В., Семеновой Т.С., Сергиенко О.И., Ульянова Н.Б.

Одним из перспективных вариантов развития биотехнологий, отмеченный в работах Пашкевич М.А. и Коротаевой А.Э., является применение одноклеточной микроводоросли *C. vulgaris* (*Chlorella vulgaris* Beijer). Преимущества использования *C. vulgaris* для очистки заключаются в том, что образующуюся биомассу микроводоросли можно использовать для борьбы с цветением сине-зеленых водорослей в водоемах или как удобрение, согласно работам Богдановой А.А.

Одним из вариантов увеличения толерантности водорослей к северным климатическим условиям может стать применение электромагнитных излучений (ЭМИ). Влияние электромагнитного излучения (ЭМИ) крайне высоких частот (КВЧ) на живые объекты описаны в работах Kimball G.C., Вдовиной Н.В., Бецкого О.В.. Причем работах Гапочки Л.Д., Гапочки М.Г., Королёва А.Ф. просматривается перспективность применения электромагнитного излучения для воздействия на микроорганизмы с целью интенсификации очистки вод от этих веществ.

Объект исследования. Сточные воды предприятия АО «Карельский окатыш», расположенного в г. Костомукша (Республика Карелия, Россия), загрязненные неорганическими соединениями азота.

Предмет исследования. Процесс удаления неорганических соединений азота из сточных вод в условиях северных регионов России.

Цель исследования – совершенствование технологий очистки сточных вод предприятий горнопромышленного комплекса от неорганических соединений азота с использованием культур микроводорослей *Chlorella vulgaris*, облученных ЭМИ КВЧ на примере сточных вод предприятия АО «Карельский окатыш».

Задачи исследования:

1. Оценить возможность стимулирования роста культуры водоросли *C. vulgaris* электромагнитным излучением крайневысоких частот.
2. Выявить способность микроводоросли *C. vulgaris* поглощать неорганические соединения азота из сточных вод в различных условиях.

3. Оценить возможность применения ЭМИ КВЧ для улучшений технологий очистки сточных вод горнодобывающих производств от неорганических соединений азота.

4. Подобрать оптимальные условия для утилизации неорганических соединений азота из сточных вод *C. vulgaris*, включая температуру, длительность и частоту облучения, состав среды культивирования, способ подготовки культуры.

Новизна исследования

1. Впервые установлена действующая частота ЭМИ КВЧ 40 ГГц, позволяющая интенсифицировать процесс культивирования биомассы культуры водоросли *C. vulgaris*.

2. Предложены технологические решения, позволяющие интенсифицировать процесс биологической очистки сточных вод от неорганических соединений азота путем облучения культуры водоросли ЭМИ КВЧ; эффективность утилизации аммония возрастает на 10% и нитратов на 4% по сравнению с экспериментами без облучения ЭМИ КВЧ.

3. Установлено, что *C. vulgaris*, выращенная на безазотной среде, начинает утилизировать аммоний при более низких температурах и способна в бóльшей степени утилизировать нитраты, чем *C. vulgaris*, выращенная на среде Тамия.

Теоретическая и практическая значимость работы. В рамках исследования выявлены условия культивирования водоросли *C. vulgaris* для эффективного удаления неорганических соединений азота из сточных вод. Разработана схема удаления соединений азота с использованием водоросли *C. vulgaris*. Прикладное значение работы подтверждается актами о внедрении на предприятиях: ООО «Ловозерский ГОК», ГОАП «Мурманскводоканал». Результаты работы использованы для актуализации ИТС 8-2022 для уточнения требований к очистке сточных вод от неорганических соединений азота. Материалы диссертации нашли применение в образовательном процессе филиала Мурманского Арктического университета в г. Апатиты.

Проведенные расчеты демонстрируют высокую экономическую эффективность проекта по внедрению технологии биологической очистки, дополненной системой подогрева воды, использующей сбросное тепло обжиговых печей. Срок окупаемости капитальных вложений составляет 2,7 года при годовом чистом экономическом эффекте

75,6 млн рублей. Эколого-экономическую эффективность внедрения результатов работы подтверждает проектная организация ООО «МурманЭКОпроект».

Полученные в ходе выполнения исследования данные легли в основу базы данных (свидетельство № 2025625718 от 04.12.2025).

Материалы и методы исследования

Для решения поставленных задач применен комплексный подход к проведению исследований, включающий теоретические и экспериментальные методы.

Теоретические методы были направлены на анализ, имеющихся на момент планирования исследования научных публикаций, подбором и разработкой методик исследования.

Экспериментальные методы включали проведение экспериментальных лабораторных исследований с использованием микробиологических, альгологических, биофизических методов исследования, обработку данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан способ стимуляции роста микроводоросли *Chlorella vulgaris* с применением электромагнитного излучения крайне высоких частот (ЭМИ КВЧ), отличающийся использованием резонансной частоты 40 ГГц и продолжительности экспозиции 120 минут, что обеспечивает увеличение скорости прироста биомассы в 6,8 раз.

2. Установлена способность микроводоросли *C. vulgaris* к эффективному росту на сточных водах хвостохранилища, что подтверждается накоплением биомассы до 5,6 мг/л за 14 суток и открывает новую возможность применения культуры в биологических методах очистки.

3. Обоснована эффективность метода по применению микроводоросли *C. vulgaris* для биологической очистки сточных вод горнодобывающих производств. Предложенный метод, отличающийся спецификой подготовки культуры на безазотной среде, обеспечивает в оптимальных условиях (26°C, аэрация) снижение концентрации загрязняющих веществ до уровней ниже ПДК: нитрат-ионов на 96% за 11 суток и аммоний-ионов на 93% за 4 суток. При низких температурных условиях (1-17°C) достигается снижение концентрации аммоний-ионов на 50% за 4 суток.

4. Предложен способ повышения эффективности биоремедиации с использованием *C. vulgaris*, основанный на предварительном облучении культуры ЭМИ

КВЧ в загрязненной среде и обеспечивающий прирост биомассы на 15% и увеличивающий скорости утилизации аммония и нитратов на 10% и 4% соответственно.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность выводов и научных положений подтверждается результатами обширных лабораторных исследований. Результаты экспериментов соответствуют закономерностям, выявленным в работах других исследователей, занимающихся данной тематикой.

Основные положения обсуждены на 7 научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе 3 международного уровня: Научно-практическая конференция – студенческая научная школа филиала МАГУ в г. Апатиты (2021 г.); XIX Ферсмановская научная сессия ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты, 2022 г.); XVI Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, специалистов и студентов ВУЗов: «Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий» (г. Апатиты, 2022 г.); III Международная молодежная научно-практическая конференция «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию» (г. Архангельск, 2022 г.); XIX Международная научная конференция студентов и аспирантов «Проблемы Арктического региона» (г. Мурманск, 2022 г.); XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (с участием иностранных ученых) (г. Екатеринбург 2023 г.); VII Международная конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (г. Петрозаводск, 2023 г.). Доклад по работе занял I место в секции «Арктическая гидробиология и ихтиология» на конференции студентов и аспирантов «Проблемы Арктического региона» (г. Мурманск, 2022 г.).

Обеспечение достоверности полученных в работе результатов достигалось за счет применения общепринятых и апробированных на базе ИППЭС КНЦ РАН методов анализа и статистической обработки, а также высокого уровня научно-технической базы ФИЦ КНЦ РАН.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 5 статей – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 1.5.15 Экология, из которых 3 – в журналах, индексируемых в международных базах данных Chemical Abstracts и GeoRef.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в разработке методик исследований; проведении в рамках работы всех экспериментов. В совместных публикациях доля диссертанта составляла 80-90%.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка терминов и сокращений, списка литературы, содержащего 135 источников, и 4 приложений. Текст работы изложен на 142 страницах, включая 46 рисунков и 10 таблиц.

Соответствие паспорту специальности. Решаемая в работе научно-техническая проблема лежит в области исследований научной специальности 1.5.15. Экология (технические науки) и отвечает требованиям паспорта специальности:

п.3. Научное обоснование, разработка и совершенствование методов проектирования технико-технологических систем и нормирования проектной и изыскательной деятельности, обеспечивающих минимизацию антропогенного воздействия на живую природу при проведении горных выработок, обогащения и переработки полезных ископаемых, а также разведки, освоения и эксплуатации нефтегазовых месторождений, транспорта и хранения нефти и газа;

п. 8. Разработка принципов и механизмов, обеспечивающих устойчивое развитие общества при сохранении биоразнообразия и стабильного состояния природной среды, юридические вопросы природопользования и охраны окружающей среды.

Решение проблемы направлено на научное обоснование и разработку методов, обеспечивающих минимизацию антропогенного воздействия на живую природу при проведении горных выработок; разработку принципов и механизмов, обеспечивающих стабильное состояние природной среды; разработку экологически безопасных технологий очистки сточных вод горнодобывающих предприятий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи, необходимые для ее достижения. Дано обоснование научной новизны полученных результатов, а также их теоретической и практической значимости.

В первой главе проведен анализ гидрологического режима озерно-речной системы р. Кенти (Карелия), подверженной воздействию Костомукшского ГОКа. Объем водосброса хвостохранилища составляет 13-15 млн м³/год. Время прохождения воды через отстойник зависит от сезона и объема водосброса и составляет от 1 до 4 дней.

Гидрохимические исследования (Лозовик, 2017) подтвердили устойчивое превышение фоновых показателей по нитратам, сульфатам, калию, литию и никелю.

Отбор проб воды проводили согласно ГОСТ 31861-2012 «Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб». Пробы отбирали в 2021, 2022, 2023 годах в июле, сентябре, октябре, декабре. Воду отбирали в трех пунктах: № 3 – водосброс в первую секцию отстойника, № 4 – водопропускные трубы из второй в третью секцию отстойника, № 1 – водосброс в оз. Окуневое.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования.

Матрица планирования экспериментов представлена в таблице 1:

Таблица 1 – Матрица планирования экспериментов исследования

№ эксперимента	1.1.	1.2.	2.1.	2.2.	2.3.
Образцы воды №	-	-	1, 3, 4	3	3
Кол-во повторов	3	3	3	3	3
Среда культивирования	Тамия	Тамия	Тамия	Тамия	Тамия
				Тамия без N	Тамия без N
Частоты облучения F (ГГц)	0; 38-53 шаг 1 ГГц	40	-	-	0; 40
Длительность облучения (мин.)	480	0-480	-	-	0; 120
Продолжительность эксп-та (сутки)	1	1	9	14	14
Температура эксп-та (°C)	26	26	7; 17; 26	1; 7; 17; 26	17; 26
Показатели измерения	Vбиомас Vп	Vбиомас Vп	Vбиомас V _{NO₃} V _{NH₄}	Vбиомас V _{NO₃} V _{NH₄}	Vбиомас V _{NO₃} V _{NH₄}

Модель эксперимента № 1.1. Поиск резонансных частот в диапазоне 38-53 ГГц

Три повтора опыта с суспензией микроводоросли культивировали в течение 24 часов. Первые 8 часов культивирования суспензию подвергали воздействию ЭМИ КВЧ в диапазоне 38-53 ГГц. Всего проведено 14 экспериментов с облучением с шагом 1 ГГц, а также контрольные повторы без облучения. После окончания культивирования определяли концентрацию биомассы и содержание пигментов.

Модель эксперимента № 1.2. Выявление оптимального времени воздействия ЭМИ КВЧ.

Пробы культивировали в течение 24 часов, облучая ЭМИ КВЧ 40 ГГц от 0 до 480 минут в начале культивирования. Проведено 2 контрольных эксперимента, в которых

культуру выращивали без воздействия ЭМИ КВЧ, и 9 экспериментов с различным временем экспозиции: 5, 10, 15, 30, 45, 60, 120, 240, 480 минут. Все эксперименты проводили в трех повторностях.

Полученные в экспериментах образцы анализировали по ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*.

Материалы и методы изучения утилизации соединений азота *C. vulgaris*

Характеристика сточных вод. Пробы воды отбирали после отстаивания взвеси. Представлены условные обозначения проб и расшифровка условий экспериментов: 1 – отстойник хвостохранилища; 3 – отстойник карьера №1; 3/2 – проба 3, разбавленная в 2 раза; $\frac{3}{4}$ – проба 3, разбавленная в 4 раза; 4 – отстойник карьера №2.

Пробу воды № 3 изучали в исходном виде и после разбавления в 2 и 4 раза, для оценки возможности очистки при разной степени загрязнения. Исходную концентрацию загрязняющих веществ определяли перед началом серии экспериментов.

Контроль условий эксперимента. Контроль температуры осуществляли ртутным термометром с точностью шкалы ± 1 °С. Для обеспечения оптимальных условий для освещения и подогрева проб использована лампа LED-1088 Aquarium light. Аэрацию обеспечивали компрессором М-102 со скоростью прокачки 2,5 л/мин.

Модель эксперимента № 2.1. Утилизация азота из сточных вод водорослью *Chlorella vulgaris*

Продолжительность экспериментов составила 9 суток. В ходе всего периода ежедневно измеряли концентрации аммония, нитратов и биомассы водоросли. Все эксперименты шли параллельно. Для экспериментов отбирали пробы объемом 0,2 дм³ с добавлением 10 мл суспензии микроводоросли. Всего было проведено 9 вариантов экспериментов в таблице 2. Все эксперименты проводились параллельно. Температурный режим был подобран для имитации зимних 7 °С, летних 17 °С, и благоприятных для вида условий 26 °С.

Таблица 2 – Условия проведенных экспериментов № 2.1

Температура	Обозначение пробы				
	3	3/2	$\frac{3}{4}$	4	1
7 °С	3.7	3/2.7	-	-	-
17 °С	3	3/2	$\frac{3}{4}$	4	1
26 °С	3.26	3/2.26	-	-	-

Модель эксперимента №2.2. Утилизация азота водорослью, выращенной в условиях азотного голодания

Общая схема эксперимента соответствовала эксперименту № 2.1, рассматривали пробы № 3 и №3/2. Условия культивирования аналогичны предыдущей серии экспериментов, с добавлением эксперимента при температуре 1 °С для оценки выживаемости вида в самых суровых условиях. Номера проб экспериментов (таблица 3):

Таблица 3 – Варианты проведенных экспериментов № 2.2

Температура	Обозначение пробы	
	3/2	3
1 °С	1	5
7 °С	2	6
17 °С	3	7
26 °С	4	8

Принципиальным отличием серии экспериментов № 2.2 от № 2.1 является подготовка культуры перед началом экспериментов. В то время как серию № 2.1 проводили с водорослью, выращенной на классической среде Тамия, для серии № 2.2 использовали модифицированную среду без источников азота (таблица 4).

Таблица 4 – Среда культивирования без источников азота

№ п/п	Компонент:	Навеска, г/100мл	V р-ра на 1 Л среды, мл
1	MgSO ₄ *7H ₂ O	5	25
2	KH ₂ PO ₄	2,5	25
3	FeSO ₄ *7H ₂ O	0,3	1
4	Раствор А: - H ₂ BO ₃ - MnCl ₂ *4H ₂ O - ZnSO ₄ *5H ₂ O	0,286 0,181 0,0222	1
5	Раствор Б: - MoO ₃	0,0018	1

Модель эксперимента №2.3. Облучение водоросли с последующей очисткой вод

В рамках эксперимента проведено 8 вариантов опытов (таблица 5). Продолжительность экспериментов составляла 14 суток.

Таблица 5 – Условия проведения экспериментов № 2.3

Облучение:	ЭМИ		Контроль	
Температура:	17 °С	26 °С	17 °С	26 °С
Среда:				
Тамия	1	2	3	4
Безазотная	5	6	7	8

Методы анализа. Экспериментальные данные о концентрации биомассы микроводоросли, аммония и нитратов получены с использованием

фотоколориметрического метода с использованием колориметра КФК-2 с кюветой 10 мм. Показания колориметра были предварительно калиброваны согласно методике ГОСТ 17.1.4.02 – 90.

Концентрацию аммония определяли с использованием электрода ЭЛИТ-051 в соответствии с методикой, описанной в РД 52.24.394-95. Концентрацию нитратов измеряли с применением электрода ЭЛИТ-021 в соответствии с методикой, описанной в РД 52.24.367-95.

Статистическая обработка данных. Для статистической обработки результатов экспериментов применены стандартные алгоритмы статистического анализа, включенные в пакет MS Excel.

В третьей главе описаны и обсуждены результаты экспериментального изучения действия ЭМИ миллиметрового диапазона на микроводоросль *Chlorella vulgaris*.

Экспериментальное изучение действия ЭМИ миллиметрового диапазона на микроводоросль *C. vulgaris* (эксперимент № 1.1.)

На рисунке 1 представлены экспериментальные данные изменения биомассы водоросли после культивирования в течение суток - ΔB .

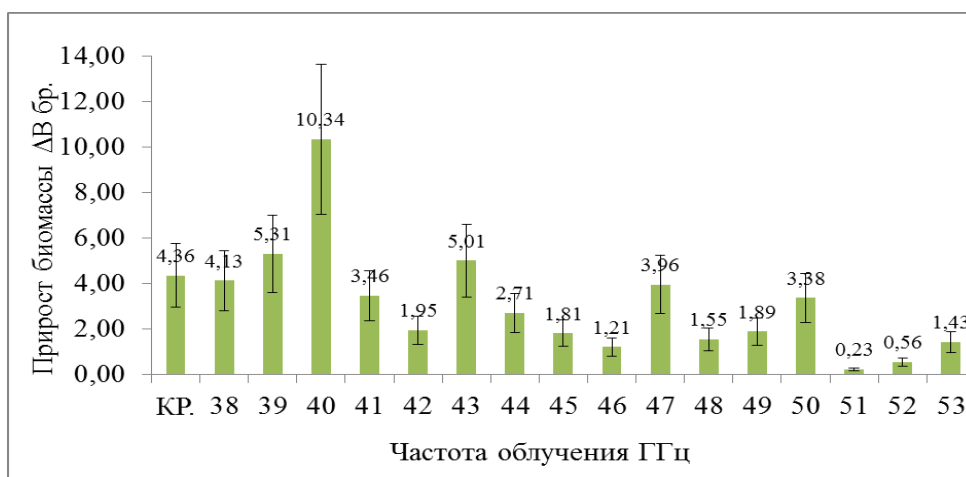


Рисунок 1 – Изменение концентрации биомассы *C. vulgaris* под воздействием ЭМИ 38-53 ГГц

Установлено, что облучение частотой 40 ГГц оказывает значительное стимулирующее действие на рост биомассы *C. vulgaris*. При 8-часовом воздействии в течение 24-часового культивирования абсолютный прирост биомассы составил 10,34 раза, что в 2,37 раза превышает показатель в контрольных опытах без облучения ($4,36 \pm 1,39$ раза).

Выявление эффективного времени воздействия ЭМИ КВЧ (эксперимент № 1.2.)

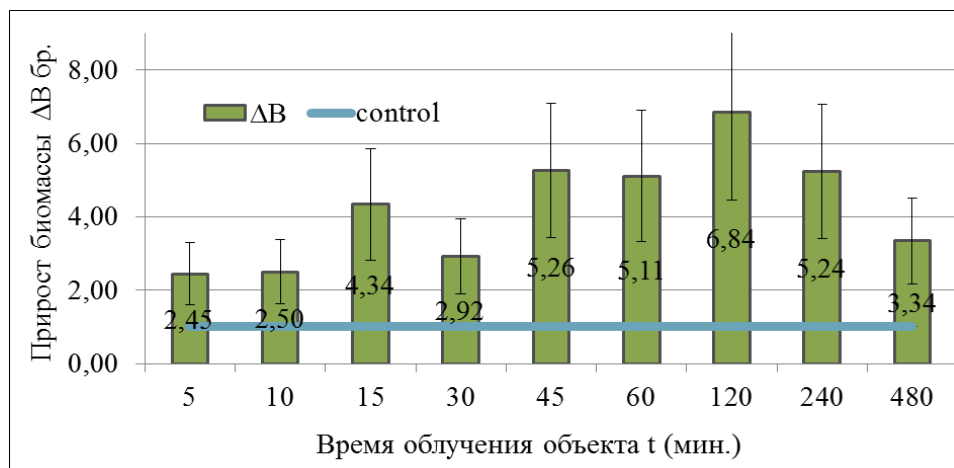


Рисунок 2 – Прирост концентрации биомассы *C. vulgaris* после 24 часового культивирования в зависимости от времени экспозиции ЭМИ 40 ГГц, ППЭ 11.7мкВт/см²

Анализ данных эксперимента (рисунок 2) подтвердил стимулирующее действие ЭМИ КВЧ 40 ГГц на рост биомассы *C. vulgaris*. Наибольшая эффективность воздействия наблюдалась в диапазоне экспозиции 45-240 минут, с пиком при 120 минутах, когда прирост биомассы превысил контроль в 6,84 раза. Короткие (5-30 мин) и длительные (480 мин) экспозиции показали значительно меньший стимулирующий эффект.

В четвертой главе предложено обоснование технологии очистки сточных вод от соединений азота с помощью микроводоросли *C. vulgaris*.

Обоснование технологии очистки сточных вод от соединений азота с помощью микроводоросли *C. vulgaris*. (эксперимент №2.1.)

В пробах, культивируемых при температуре 7 и 17 °С, концентрация биомассы увеличилась с 0,041 мг/л до 0,11 мг/л, то есть в 2,7 раза за 9 суток. Прирост биомассы свидетельствует о способности *C. vulgaris* выживать при низких температурных условиях.

Эффективность поглощения аммония *C. vulgaris* напрямую зависела от температуры культивирования. При 7°С снижения концентрации не наблюдалось, при 17°С эффективность составила 3,5–10,2%. Максимальное поглощение (85–90%) достигнуто при 26°С с аэрацией и освещением за 2–3 суток, после чего концентрация стабилизировалась на уровне 0,65 мг/л. Параллельный значительный прирост биомассы подтверждает, что удаление аммония происходило за счет его потребления микроводорослью. Изменение концентрации аммония представлено на рисунке 3.

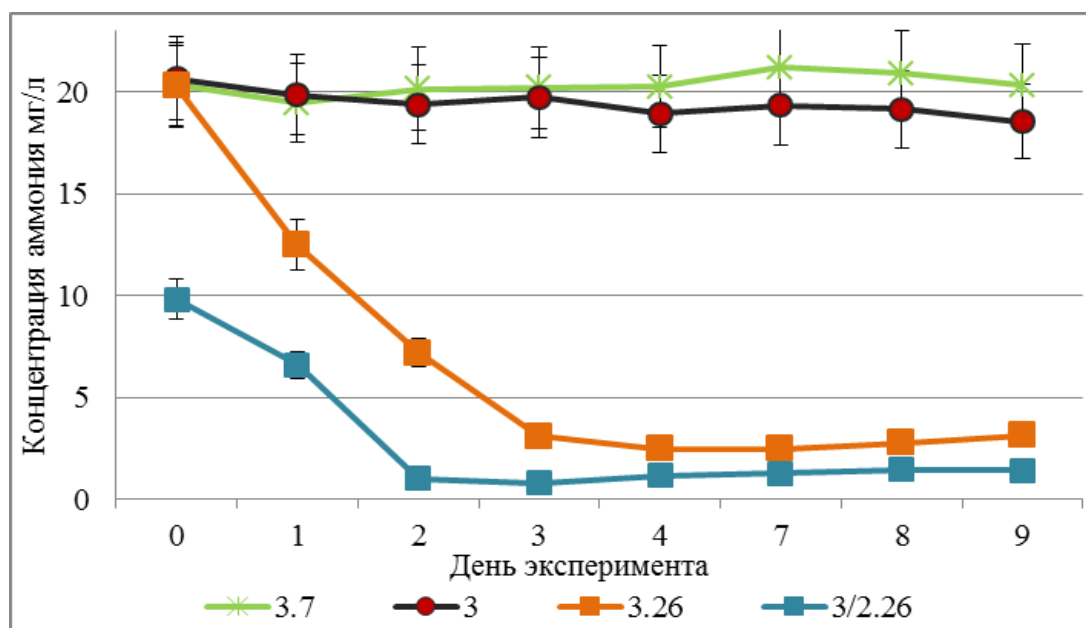


Рисунок 3 – Изменение содержания аммония в пробах воды

Графическая интерпретация изменения концентрации нитратов в пробах воды представлена на рисунке 4.

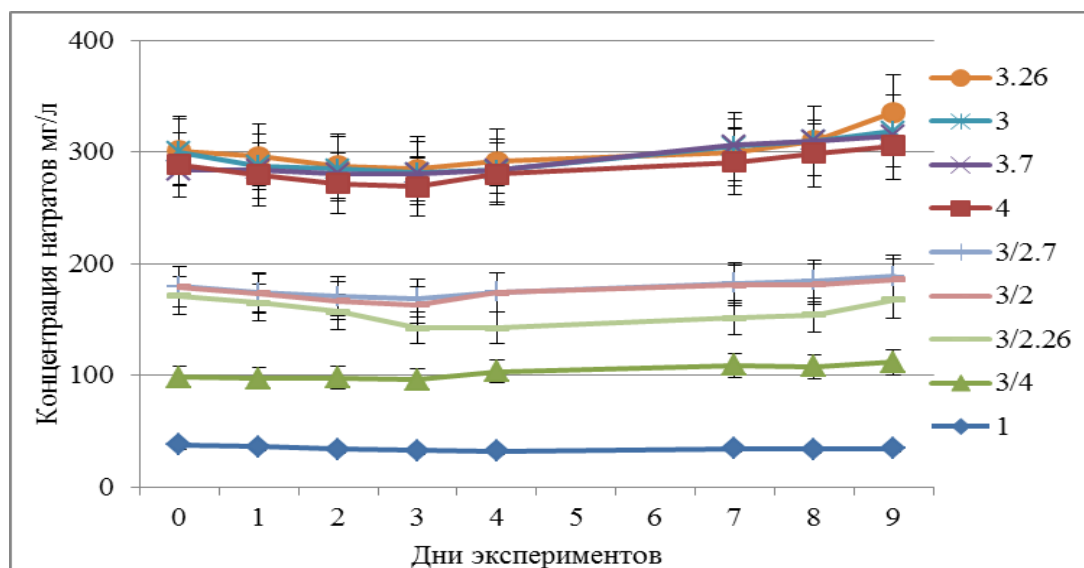


Рисунок 4 – Изменение концентрации нитратов в пробах воды

Динамика концентрации нитратов не показала значимого снижения ни при одном из температурных режимов, отмечены лишь незначительные колебания концентраций.

Проведенные 9-суточные эксперименты демонстрируют выраженную зависимость эффективности биоремедиации от условий культивирования. Наибольшая активность *S. vulgaris* наблюдается в оптимальных условиях (26°C, аэрация, освещение), где отмечается не только интенсивный рост биомассы, но и резкое снижение концентрации аммония – в 10 раз за 2-3 суток. Вместе с тем, в условиях, приближенных к естественным для северных регионов (7-17°C без аэрации), эффективность очистки

оказывается незначительной. Это указывает на необходимость создания специальных биореакторных систем для применения технологии в условиях Севера. Особый интерес представляет перспектива использования культур, предварительно выращенных в условиях азотного голодания, что может существенно повысить эффективность утилизации азотных соединений в неблагоприятных температурных условиях.

Утилизация азота водорослью, выращенной в условиях азотного голодания (эксперимент № 2.2.)

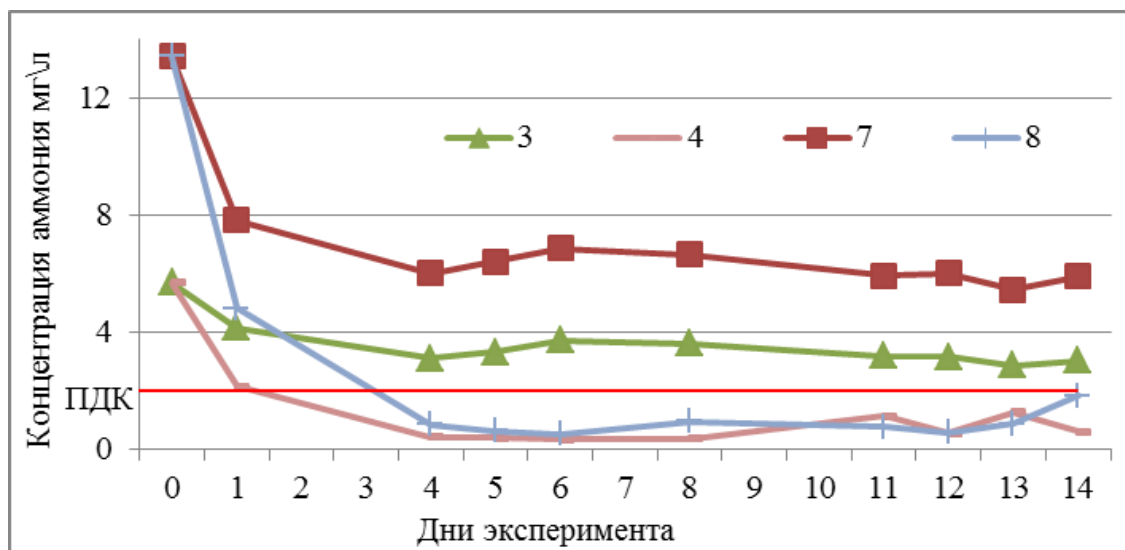


Рисунок 5 – Изменение концентрации аммония в образцах воды при культивировании *C. vulgaris*, выращенной в условиях азотного голодания

Во всех вариантах опыта (рисунок 5) наблюдали статистически значимое снижение концентрации аммония, которое в основном происходило за четверо суток эксперимента, после чего показатели стабилизировались. Важно, что даже в низкотемпературном диапазоне (1–17 °С) отмечали снижение концентрации аммония порядка 50%. При этом в условиях (26 °С, аэрация, освещение) наблюдалось наиболее полное удаление аммония – до 93% за 4 суток, с достижением остаточных концентраций ниже 1 мг/л. Это позволяет говорить о синергетическом эффекте, создаваемом сочетанием азотного голодания и оптимальных внешних условий.

Из анализа данных, представленных на рисунке 6, следует, что во всех пробах было зафиксировано снижение концентрации нитратов. Однако, при культивировании при температурах 1, 7 и 17 °С утилизация азота была незначительной и неэффективной для очистки воды, независимо от исходной концентрации нитратов.

Другую ситуацию наблюдали при культивировании при температуре 26 °С. В процентном соотношении из пробы 4 с исходной концентрацией 125,5 мг/л нитратов

удалено 96% за 11 дней эксперимента. Из пробы 8 с исходным содержанием 234,5 мг/л удалено 57% за 14 дней эксперимента.

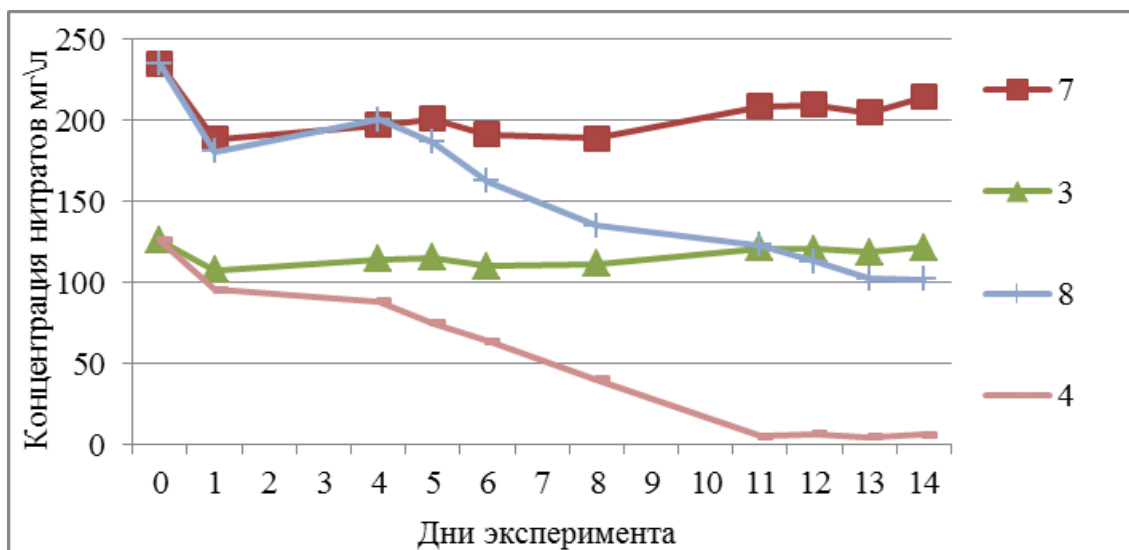


Рисунок 6 – Изменение концентрации нитратов в образцах воды при культивировании *S. vulgaris*, выращенной на азотном голодании

В эксперименте № 2.1, проведенном для изучения способности водорослей к поглощению соединений азота из сточных вод, было отмечено снижение концентрации аммония на 84-87% за 3 дня при культивировании при температуре 26 °С с аэрацией и освещением. Однако существенного снижения аммония при температурах 7 и 17 °С без аэрации и освещения не наблюдалось. Результаты эксперимента №2.2 показывают, что утилизация аммония водорослями при азотном голодании оказалась более эффективной и составила 93% за 4 дня при температуре 26 °С с аэрацией и освещением. Кроме того, удалось достичь утилизации аммония с эффективностью 45-55% при различных температурных режимах от 1 до 17 °С, что не было достигнуто при культивировании водорослей на среде Тамия.

Облучение водоросли с последующей очисткой вод (эксперимент № 2.3.)

В рамках эксперимента №2.3 проводили повторы опыта с культурой, выращенной на среде Тамия и среде без азота. Половину проб выращивали при температуре 17°С без аэрации и освещения, вторая половина при 26°С с аэрацией и освещением. Половину проб облучали ЭМИ КВЧ 40 ГГц 2 часа до начала культивирования, вторую половину не облучали для контроля. Условия для каждой пробы представлены в таблице 5. Продолжительность эксперимента составила 14 суток. Наибольший прирост биомассы

наблюдался в опыте с выращиванием культуры водоросли на среде Тамия при облучении ЭМИ КВЧ и составил 5,6 мг/л.

На рисунке 7 представлен график изменения концентрации аммония в ходе эксперимента. На графике «б» показаны результаты экспериментов на среде Тамия для увеличения наглядности результатов.

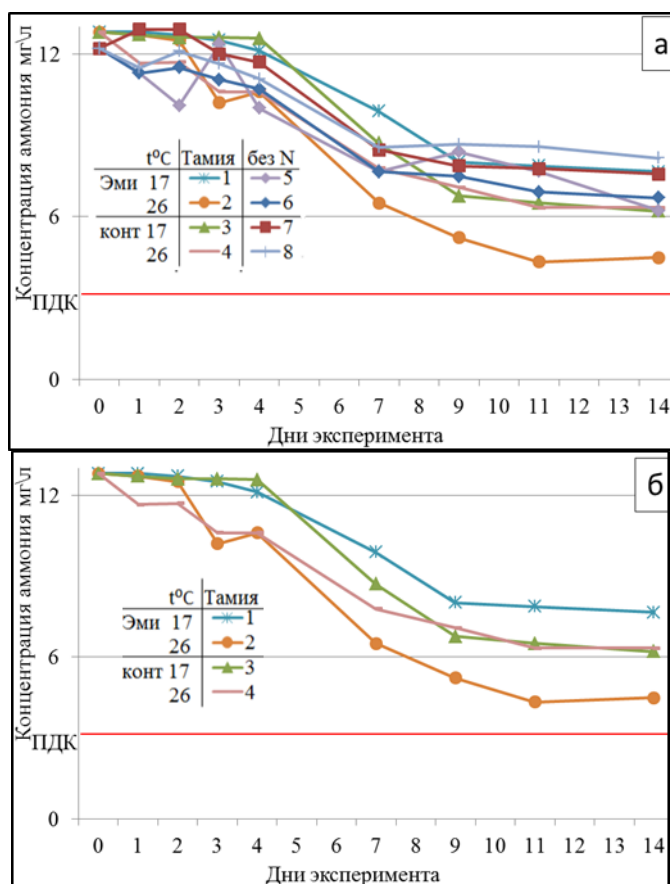


Рисунок 7 – Изменение концентрации аммония в воде в эксперименте №2.3.:
«а» – результаты всех вариантов экспериментов; «б» – результаты экспериментов
на среде Тамия

В течение 4 суток эксперимента концентрация аммония находится на плато и снижается незначительно. Затем, между 4 и 7 сутками, происходит основное снижение концентрации аммония во всех пробах воды. После этого, с 7-го по 14-й день эксперимента концентрация аммония продолжает снижаться, но с меньшей скоростью.

Установлено, что в вариантах экспериментов, проведенных при температуре 26 °С, концентрация аммония была ниже, чем при 17 °С, но существенно не различалась в зависимости от среды культивирования.

Также установлено, что в экспериментах с облучением образцов концентрация аммония была ниже, чем без облучения. В эксперименте 1 с облучением концентрация

аммония оказалась выше, чем в эксперименте 3 без облучения, на 24%. В то время как в эксперименте 2 с облучением концентрация аммония была ниже, чем в эксперименте 4 без облучения на 29%. В эксперименте 5 с облучением концентрация аммония оказалась ниже, чем в эксперименте 7 без облучения на 18%, так же как и при сравнении экспериментов 6 и 8. Таким образом, в среднем при облучении эффективность утилизации аммония водорослью *C. vulgaris* после 14 дней выросла на 10%, по сравнению с аналогичными экспериментами без облучения.

Выявлено, что разница в концентрации аммония в облученных и необлученных пробах была больше в пробах, выращенных на среде Тамия, чем на среде без азота. Данное наблюдение свидетельствует о том, что облучение оказывает большее воздействие, когда водоросль находится в более благоприятной среде с подходящей ей средой культивирования.

На рисунке 8 представлен график изменения концентрации нитратов в ходе эксперимента.

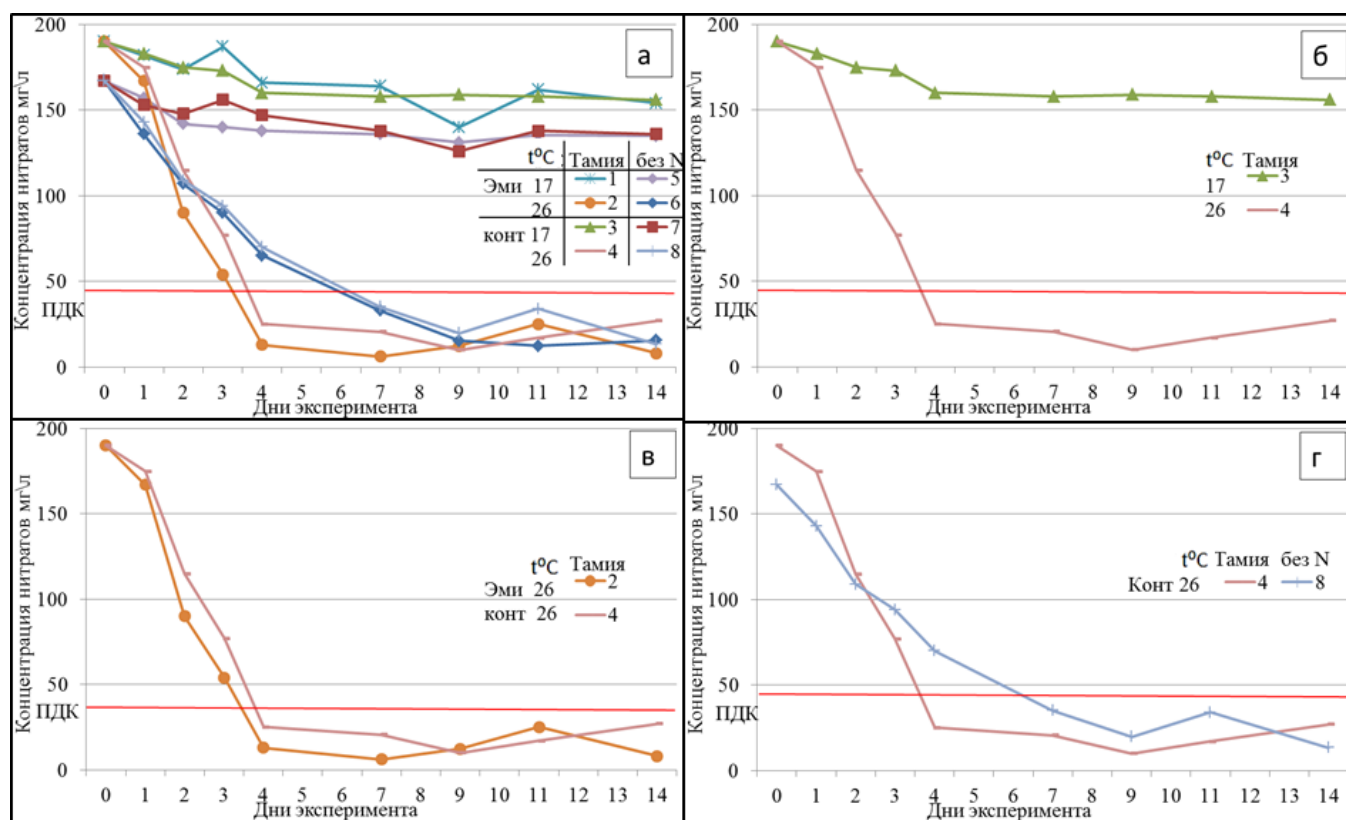


Рисунок 8 – Изменение концентрации биомассы водоросли в эксперименте №2.3.

На графике «а» представлены результаты всех экспериментов; «б» – сравнение результатов в зависимости от температуры; «в» – результаты в зависимости от облучения ЭМИ КВЧ; «г» – результаты в зависимости от состава среды

Как показано в предыдущих экспериментах и на графике 8 «б», азот нитратов успешно утилизируется водорослью при температуре 26 °С, в отличие от экспериментов при температуре 17 °С.

При температуре 17 °С было установлено планомерное снижение концентрации нитратов во всех пробах в среднем на 19%, независимо от других факторов. В то время как при температуре 26 °С в среднем к концу экспериментов было удалено 91% нитратов. Максимальная эффективность в 96% удаления нитратов была зафиксирована в эксперименте с облучением, культивированием на среде Тамия при температуре 26 °С.

Отмечается (рисунок 8 «г»), что минимальные значения показателей были достигнуты быстрее в экспериментах, где водоросль культивировали на среде Тамия (4 дня), чем на среде без азота (7 дней). Однако концентрация нитратов к концу эксперимента статистически не отличалась при различных средах культивирования.

Сравнение результатов (рисунки 8а, 8в) всех экспериментов показывает, что в вариантах с облучением конечная концентрация нитратов была в среднем на 4% ниже.

В результате проведения серии экспериментов сделано заключение о том, что облучение водоросли в загрязненных водах увеличивает скорость роста на 15%, что меньше, чем было показано на «чистой» водной среде. Этот эффект повысил эффективность утилизации аммония на 10% и эффективность утилизации нитратов на 4%. Для понимания целесообразности применения ЭМИ для интенсификации утилизации азота сточных вод требуется дальнейшее экономическое обоснование с учетом технологических показателей.

Прямое сравнение данных концентрации биомассы при культивировании на двух вариантах сред (среда Тамия и новая среда без источников азота) показало, что культура водоросли *C. vulgaris* хуже набирает биомассу, если была подготовлена на среде без азота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены новые научно обоснованные технологические решения, имеющие существенное значение для развития горнодобывающей отрасли в Арктической зоне страны. Предложены механизмы, обеспечивающие устойчивое развитие общества при сохранении стабильного состояния природной среды и минимизацию воздействия горнодобывающих предприятий на окружающую среду. В результате проведения исследования получены следующие **выводы:**

1. Установлено, что *C. vulgaris* способна выживать и успешно наращивать биомассу при культивировании в различных условиях в водах хвостохранилища.

2. *C. vulgaris* пригодна для утилизации неорганических соединений азота из вод хвостохранилища. Эффективность утилизации азота может достигать: 96% для нитратов за 11 дней и 93% для аммония за 4 дня в случае, когда очистка проходит в оптимальных для вида условиях и культура подготовлена на специальной среде без источников азота.

3. Благодаря облучению водоросли в воде ЭМИ КВЧ 40 ГГц в течение 120 минут до начала культивирования удалось увеличить прирост биомассы за сутки в 6,8 раза. Это свидетельствует об эффективности использования ЭМИ КВЧ для повышения скорости роста микроводорослей.

4. Облучение водоросли вместе со сточными водами ЭМИ КВЧ 40 ГГц в течение 2 часов перед культивированием не дает столь же высокого увеличения скорости роста, как при облучении водоросли в чистой воде, но позволяет увеличить концентрацию биомассы на 15%. Что повышает эффективность утилизации аммония на 10% и нитратов на 4%.

В результате проведенного исследования была достигнута его цель: разработаны технологические решения, позволяющие усовершенствовать технологий очистки сточных вод предприятий горнопромышленного комплекса от неорганических соединений азота с использованием культур микроводорослей *Chlorella vulgaris* облученных ЭМИ КВЧ на примере сточных вод предприятия АО «Карельский окатыш».

Проведенные расчеты демонстрируют высокую экономическую эффективность проекта по внедрению технологии биологической очистки, дополненной системой подогрева воды использующей сбросное тепло обжиговых печей. Срок окупаемости капитальных вложений составляет 2,7 года при годовом чистом экономическом эффекте 75,6 млн рублей.

Полученные результаты носят как прикладной, так и фундаментальный характер. Прикладное значение работы подтверждается актами о внедрении на предприятиях: ООО «Ловозерский ГОК», ГОАП «Мурманскводоканал». Результаты работы использованы для актуализации ИТС 8-2022 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях». Материалы диссертации нашли применение для разработки специальных дисциплин по углубленному освоению промышленной экологии.

Последующие исследования в данной области могут быть связаны с подбором новых сред культивирования для повышения эффективности очистки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК и международных базах

1. **Щеглов Г.А.,** Маслобоев А.В. Особенности утилизации неорганических соединений азота биологическими методами для повышения экологической безопасности региона // Экология промышленного производства. – 2025. – № 3(131). – С. 31-34. doi: [10.52190/2073-2589_2025_3_31](https://doi.org/10.52190/2073-2589_2025_3_31) (Chemical Abstracts)
2. **Щеглов Г.А.** Возможность использования *Chlorella* для снижения антропогенной нагрузки горного производства на озерно-речную систему Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 107–116. DOI: 10.17076/lim1789 (Georef)
3. **Щеглов Г.А.** Изменение концентраций неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего предприятия микроводорослью *Chlorella vulgaris* // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 191–199. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199 (GeoRef)
4. **Щеглов Г.А.** Стимулирование роста *Chlorella* в зависимости от длительности воздействия электромагнитного излучения крайне высоких частот // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 225–231. DOI: [10.22363/2313-2310-2023-31-2-225-231](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-225-231) (Перечень ВАК, 1.5.15 – технические науки)
5. **Щеглов Г.А.,** Маслобоев В.А. Методы исследования эффектов электромагнитного излучения на микроорганизмы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 179–190. DOI: [10.22363/2313-2310-2023-31-2-179-190](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-179-190) (Перечень ВАК, 1.5.15 – технические науки)

Доклады на международных и всероссийских научных мероприятиях:

1. **Щеглов Г. А.** Обзор исследований в области воздействия электромагнитных полей на живые организмы / Г.А. Щеглов // Сборник Региональной научно-практической конференции – студенческой научной школы филиала МАГУ в г. Апатиты: Сборник материалов конференций, Апатиты, 28 апреля 2021 года / Отв.

редактор И.В. Вицентий. – Апатиты: Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мурманский арктический государственный университет» в г. Апатиты, 2021. – С. 107-116.

2. **Щеглов Г.А.** Экологические аспекты действия электромагнитного излучения крайне высоких частот на микроорганизмы / Г.А. Щеглов // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: Материалы III Международной молодежной научно-практической конференции, Архангельск, 26 – 28 апреля 2022 года. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 2022. – С. 394-398.

3. **Щеглов Г.А.** Возможность стимулирования роста микроводорослей электромагнитным излучением для альгологических исследований / Г.А. Щеглов // XIX Международная научная конференция «Проблемы Арктического региона»: тезисы докладов (Мурманск, 17 – 18 мая 2022 г.). – Мурманск, 2022. – 89 с. ISBN 978-5-91137-464-8. – С. 21.

4. **Щеглов Г.А.** Перспективы применения *Chlorella* для доочистки карьерных вод от азота при низких температурных условиях / Г.А. Щеглов, В.А. Маслобоев // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2022. – № 19. – С. 424-429. – DOI 10.31241/FNS.2022.19.077.

5. **Щеглов Г.А.** Изучение способности *Chlorella vulgaris* снижать концентрацию азота в сточных водах горнодобывающих предприятий // XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (с участием иностранных ученых), Институт горного дела УрО РАН, Апатиты, 7 - 10 февраля 2023 г. // Проблемы недропользования. – 2023. – №. 2 (37). – С. 112-120. [DOI:10.25635/2313-1586.2023.02.112](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.02.112).

Прочее:

1. Базы данных № 2025625718 Российская Федерация. Загрязнение водных объектов Арктического региона за 1997-2024 годы / **Щеглов Г. А.**, Маслобоев А. В.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук». – № 2025625372; заявл. 27.11.2025; опубл. 04.12.2025, Бюл. № 12. – 156 КБ.