

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»



На правах рукописи

Щеглов Глеб Андреевич

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

Научная специальность: 1.5.15. Экология (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Маслобоев Владимир Алексеевич

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	15
1.1. Анализ экологической обстановки озера Костомукшское и озерно-речной системы реки Кенти	15
1.2. Микроводоросль рода хлорелла (<i>Chlorella</i>).....	25
1.3. Способы выращивания микроводорослей	27
1.4. Загрязнение сточных вод неорганическим азотом.....	31
1.5. Электромагнитные поля и их воздействие на организмы	36
1.6. Выводы по главе	43
1.7. Постановка основных направлений диссертационного исследования.	44
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	46
2.1. <i>Chlorella vulgaris</i>	46
2.2. Воздействие ЭМИ КВЧ на <i>Chlorella vulgaris</i>	47
2.3. Материалы и методы изучения действия ЭМИ КВЧ на <i>Chlorella vulgaris</i> ...	48
2.4. Материалы и методы изучения утилизации соединений азота хлореллой ...	61
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭМИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА МИКРОВОДОРОСЛЬ CHLORELLA VULGARIS	71
3.1. Поиск резонансных частот в диапазоне 37,5-53,53 ГГц	71
3.2. Выявление оптимального времени воздействия ЭМИ КВЧ	76
Выводы по главе.....	79
ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОДОРОСЛИ CHLORELLA.	80
4.1. Утилизация азота из сточных вод водорослью <i>Chlorella vulgaris</i>	80
4.2. Утилизация азота водорослью выращенной в условиях азотного голодания	86
4.3. Подбор оптимальной концентрации водоросли для удаления азота.....	94
4.4. Облучение водоросли с последующей очисткой вод.....	98
Выводы по главе.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	109

ПРИЛОЖЕНИЯ	126
Приложение 1. Документы, подтверждающие использование результатов диссертационной работы	126
Приложение 2. Сводная таблица содержания элементов и свойств воды	132
Приложение 3. Схема модернизации очистных сооружений.....	133
Приложение 4. Экономическое обоснование технологии	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Водные ресурсы играют ключевую роль в поддержании жизни человека и экосистем. Они необходимы для питьевого водоснабжения, сельского хозяйства и промышленности. Загрязнение водных систем является глобальной экологической проблемой. Актуальность темы подтверждается принятием национальной цели развития «Экологическое благополучие» и решения о реализации в рамках ее достижения федерального проекта «Вода России», а также выпуском ряда нормативных правовых актов в области снижения загрязнения водных систем, что особенно важно для Арктической зоны Российской Федерации:

В стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года (Указ Президента РФ № 645 от 26.10.2020 г.) предусмотрено, что «Выполнение основных задач в сфере охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности осуществляется путем реализации ... мер ... предотвращения негативных экологических последствий при освоении природных ресурсов» (Пункт 15).

В основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года (Указ Президента РФ № 164 от 5.03.2020 г.) сказано в частности: «Основными направлениями реализации государственной политики Российской Федерации в Арктике являются: в) охрана окружающей среды и обеспечение экологической безопасности (Пункт 10).

В стратегии национальной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ № 400 от 02.07.2021 г.) отмечено: «Достижение целей обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования осуществляется путем реализации государственной политики, направленной на решение следующих задач: 5) развитие мощностей и технологий очистки выбросов в атмосферный воздух, промышленных и городских сточных вод» (Пункт 83).

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%. Добыча ведется открытым способом, используются взрывчатые вещества гражданского назначения. Предприятие оказывает техногенное воздействие на озерно-речные системы Карелии. В частности, в котловине озера Костомукшское (верхнее озеро озерно-речной системы реки Кенти) созданы хвостохранилище для захоронения хвостов обогащения (отходов производства) и отстойник оборотной воды. С 1994 года осуществляется регулируемый сброс сточных вод в систему реки Кенти.

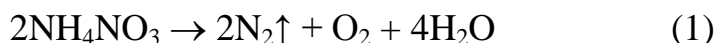
Согласно решению арбитражного суда города Санкт-Петербурга и Ленинградской области по делу № А56-109026/2019 от 05.12.2019 г. предприятию АО «Карельский окатыш» предписано выполнить следующие требования: «Прекратить сброс загрязняющих веществ, сбрасываемых в озеро Окуновое и ручей Безымянный»; «не допускать нарушение требований к качеству воды водных объектов рыбохозяйственного значения – озера Окуновое и ручья Безымянный, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в местах сбора сточных вод». Данное решение суда указывает на актуальность разработки технологий очистки вод от соединений азота. «Наблюдается превышение загрязняющих веществ в сточных водах, сбрасываемых АО «Карельский окатыш» в озеро Окуновое по следующим

показателям:... аммоний-ион – в 1,52 раза (факт – 0,76 мг/дм³, норматив – 0,5 мг/дм³); нитрат-ион – в 1.1 раза (факт – 28,94 мг/дм³, норматив – 26,2 мг/дм³)».

Деятельность горнодобывающего предприятия привела к изменению химического состава воды в озерно-речной системе. Наблюдается увеличение концентрации нитратов, аммония, а также калия, сульфатов, лития, никеля. В отличие от металлов и их соединений неорганические соединения азота в воде не выпадают в осадок, и их невозможно удалить химическими и физическими методами. Для очистки от соединений биогенных элементов сточных вод хвостохранилища перед сбросом в природные водные объекты применяются биологические методы, однако их использование в климатических условиях Карелии затруднено. Для предприятия не стоит проблема очистки от фосфора, поэтому основной упор в применении биологических методов на предприятии ставится на очистку соединений азота.

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, особенно – от нитратов. 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 взрыва согласно уравнению 1. Часть взрывчатых веществ подвергается неполному разложению, из-за чего образуются неорганические соединения азота: аммонийные соли; свободный аммиак, нитраты, нитриты. Неорганические соединения азота вымываются сточными водами, затем попадают в открытые водные объекты.

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. Требования наилучших доступных технологий (НДТ), которым должны соответствовать горнодобывающие предприятия, предъявляются как к выбросам загрязняющих веществ в атмосферный воздух, так и к их сбросам в природные водные объекты. Поэтому разработка технологических и технических решений, обеспечивающих надлежащую очистку сточных вод от неорганических соединений азота, а также обоснование технологических показателей НДТ 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.

Кроме того *C. vulgaris* востребована в широком спектре сфер человеческой деятельности, что отмечено в работах Манукяна В. и Azocar J.. Ее успешно применяют при выращивании растений в качестве удобрения, подкормки для рыб и разведении скота. Также она используется для генерации кислорода в замкнутых системах и получения биотоплива. Поэтому в случае применения водоросли для очистки сточных вод полученная биомасса может перейти из разряда отходов производства в ценный продукт.

Одним из вариантов увеличения толерантности водорослей к северным климатическим условиям может стать применение электромагнитных излучений (ЭМИ). Влияние (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.

В работах Гапочки Л.Д. описывается совокупное воздействие от нескольких факторов, например, сочетание электромагнитного излучения с наличием загрязняющих веществ (фенол, Cd, Co, Cu, Zn, Fe). Причем в таких работах просматривается перспективность применения электромагнитного излучения для воздействия на микроорганизмы с целью повышения их толерантности к загрязняющим веществам, а также интенсификации очистки вод от этих веществ.

Таким образом, определение способности водоросли *C. vulgaris* утилизировать азот неорганических соединений из сточных вод горнодобывающих предприятий и оценка возможностей увеличения степени очистки за счет применения ЭМИ КВЧ являются актуальными и перспективными научными направлениями.

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 эффективные 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 показано, что применение ЭМИ КВЧ 40ГГц в течение 120 минут позволяет интенсифицировать процесс культивирования биомассы культуры водоросли *C. vulgaris* в 6,8 раза.

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.

В работе изучено воздействие миллиметровых электромагнитных полей в диапазоне 37-53 ГГц на микроводоросль *C. vulgaris*. Исследования такого диапазона частот на других живых объектах показали перспективность его применения как стимулирующего, так и ингибирующего фактора. Это определяет новизну исследования воздействия данного диапазона на *C. vulgaris* с целью последующего применения.

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 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 применялся комплексный подход к проведению исследований, включающий теоретические и экспериментальные методы.

Теоретические методы были связаны с поиском и анализом имеющихся на момент планирования исследования научных публикаций о воздействии электромагнитных излучений на микроорганизмы, подбором и разработкой методик исследования, расчетом характеристик применяемого излучения.

Экспериментальные методы включали в себя подбор и создание необходимого для исследования оборудования; проведение экспериментальных лабораторных исследований с использованием микробиологических, альгологических, биофизических методов исследования с применением современного оборудования и приборов, а также адаптацией уже имеющегося оборудования; обработку данных методами статистики.

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.

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 *S. vulgaris*, основанный на предварительном облучении культуры ЭМИ КВЧ в загрязненной среде и обеспечивающий прирост биомассы на 15% и увеличивает скорости утилизации аммония и нитратов на 10% и 4% соответственно.

Степень достоверности и апробация результатов

Апробация работы. 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 международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе: 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 отработанных 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%.

Реализация работы. Экспериментальная и теоретическая работа выполнялась на базе ФИЦ КНЦ РАН, Института проблем промышленной экологии севера, Лаборатории междисциплинарных эколого-экономическими исследований №24. Аналитические работы были выполнены на базе Лаборатории водных экосистем и Лаборатории экологии микроорганизмов.

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.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Маслобоеву Владимиру Алексеевичу, доктору технических наук, заведующему лабораторией междисциплинарных эколого-экономических исследований ИППЭС КНЦ РАН за советы в планировании проведении исследования и процессе подготовки работы. А так же выражает благодарность заведующему лабораторией водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН Денисову Дмитрию Борисовичу, кандидату биологических наук, а также ведущему инженеру Косовой Анне Львовне за помощь в подборе методики анализа хлорофилла, предоставление возможности проведения анализа. Лаборатории экологии микроорганизмов ИППЭС КНЦ РАН и лично Мязину Владимиру Александровичу и Фокиной Надежде Викторовне за помощь в освоении методик оценки концентраций азота в воде.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ экологической обстановки озера Костомукшское и озерно-речной системы реки Кенти

Гидрологический режим озёрно-речной системы реки Кенти и водоема Костомукшское

Озёрно-речная система реки Кенти представляет собой важный водный объект на севере Республики Карелия, расположенный рядом с городом Костомукша. Эта система включает в себя ряд водоёмов и притоков: озёра Окуневое, Поппаллярви, Койвас, Кенто и Ср. Куйто, а также саму реку Кенти.

Образование этой системы связано с ледниковыми и флювиогляциальными процессами, которые сформировали озёра и речные долины в регионе. Формирование и развитие природной среды представляют большой теоретический и практический интерес и являются результатом длительного процесса взаимодействия различных факторов и условий окружающей среды.

Климатические особенности региона оказывают значительное влияние на гидрологический режим системы. Для северных широт характерны холодные и длительные зимы, а летние периоды коротки и прохладны. Территория подвержена влиянию арктических воздушных масс и атмосферных фронтов, что приводит к обилию снегопадов и осадков в летний период. Эти климатические условия значимо влияют на распределение влаги, скорость течения воды в реках, испарение, а также формирование льда и снежного покрова. Следовательно, колебания климатических условий влекут за собой определённые изменения в гидрологическом режиме водной системы.

Кроме того, деятельность человека оказывает значительное воздействие на гидрологическую обстановку в регионе. Костомукшский горнообогатительный комбинат (ГОК) занимается добычей и обогащением железной руды и является главной промышленной организацией в этом районе. В процессе своей работы ГОК выбрасывает в озёрно-речную систему техногенные воды, содержащие соединения неорганического азота (NO_2 , NO_3), а также K, S, Na, Li, Ni и

минеральные вещества. Это приводит к значительным изменениям в химическом составе воды и влияет на экологическое состояние водоёмов (Сямозёрский резервуар пресной воды) и водотоков (река Сяпся).

Эти факторы необходимо учитывать при изучении и оценке гидрологического режима озёрно-речных систем. Грамотное управление водными ресурсами и эффективная защита от негативного антропогенного воздействия позволят сохранить экологическое равновесие и обеспечить устойчивое развитие региона.

Гидрологические характеристики: Озеро Костомукское расположено в непосредственной близости от города Костомукша, Республика Карелия, Российская Федерация. Площадь водоёма составляет примерно 100 км², а объём воды превышает 1 км³.

В озеро впадают несколько притоков, самый крупный из которых – река Кенти. Через неё же происходит и отток воды из озера, формируя, таким образом, озерно-речную систему региона.

Геохимические показатели: Данные характеристики отражаются в составе веществ водоёма и влиянии на его химический баланс различных процессов.

Для воды озера Костомукское характерен определённый уровень рН – около 6,5, что говорит о слабокислой среде. Однако этот показатель может изменяться, исходя из определённых факторов.

Вода озера содержит минеральные вещества, такие как соли, сульфаты, нитраты и другие компоненты. В разное время года и в разных частях водоёма их концентрация может варьироваться.

Стоит отметить, что озеро Костомукское подвержено влиянию различных геохимических процессов. К примеру, на состав воды может воздействовать выщелачивание минералов из окружающих водоём пород или атмосферные осадки.

Воздействие предприятий горнодобывающей промышленности на озерно-речную систему реки Кенти

Техногенные воды, выбрасываемые комбинатом из хвостохранилища, приводят к увеличению содержания минеральных веществ (K^+ и SO_4^{2-}), а также продуктов, содержащих азот, в водоёмах системы.

Эти процессы вызывают существенные изменения химической структуры озёрно-речного бассейна, что особенно заметно в верхних водоёмах – таких как Окуновое и Поппалиярви. Кроме того, происходит нарушение естественного баланса, что изначально проявляется в увеличении содержания соединений азота в форме нитратов и нитритов. Это, в свою очередь, ведёт к такому явлению, как эвтрофикация. Суть данного процесса заключается в ускорении накопления минеральных и органических питательных веществ, в результате чего наблюдается активное размножение водорослей.

Последствия выбросов сточных вод могут быть разнообразными:

- сокращение биоразнообразия;
- ухудшение качества воды;
- негативное воздействие на здоровье людей и животных.

Учитывая особенности климатических условий в северных широтах, традиционные методы очистки вод от соединений неорганического азота не всегда обеспечивают должный эффект, а часто оказываются неуместными и с экономической точки зрения. Загрязнение сточных вод соединениями азота представляет собой сложную с научной точки зрения и трудноразрешимую задачу.

Следовательно, требуются альтернативные решения, сочетающие инновационные способы очистки сточных вод и контроль выбросов ГОКа и других промышленных предприятий. Разработка и внедрение подобных мер обеспечат предотвращение исчезновения уникальных экосистем и разрушение естественных условий обитания живых организмов.

Гипотетически новый подход может включать в себя применение новых технологий, адаптированных к условиям севера и способных обеспечить эффективную очистку сточных вод. Также требуется внедрение более строгих мер

по контролю за выбросами промышленных предприятий, направленных на уменьшение загрязнения.

Определение оптимальных методов очистки сточных вод, разработка инновационных решений и их внедрение являются ключевыми шагами на пути сокращения загрязнения озерно-речных систем.

Вследствие добычи, ведения взрывных работ, хранения вскрытых пород, наполнения хвостохранилищ, в том числе сточными водами, горнодобывающая отрасль оказывает существенное воздействие на экологическую обстановку.

Одним из предприятий, оказывающих воздействие на водные системы республики Карелия, является Костомукшский ГОК, занимающийся добычей железной руды и производством железных окатышей с 1982 года. В ходе деятельности предприятия идет сброс сточных вод из Хвостохранилища в систему реки Кенти.

Для сточных вод предприятия характерны нестандартные соотношения катионов, повышенная минерализация и содержание соединений неорганического азота (Рисунок 1.1), а также тяжелых металлов, таких как Li, Ni, Mg, Al. При этом воды отличаются низкой концентрацией фосфора и органических веществ [1].

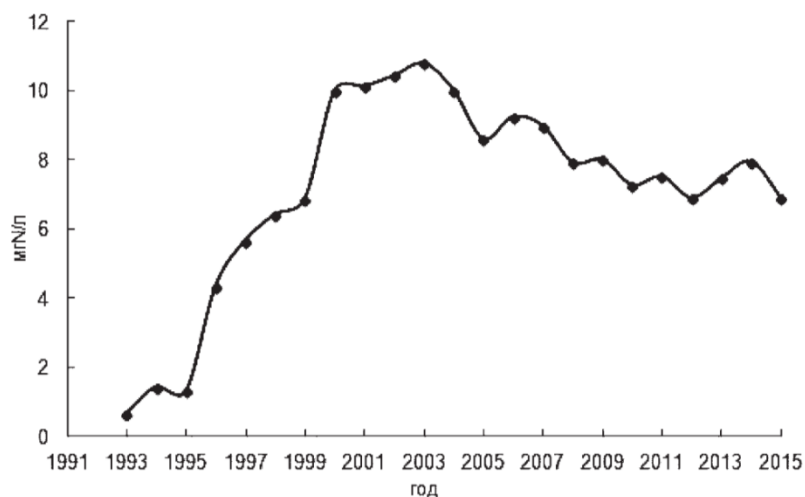


Рисунок 1.1 – Многолетний мониторинг концентрации нитратов в озере Костомукшское [1]

Объем сбрасываемых вод в систему реки Кенти в среднем составляет 14 млн. м³ в год и колеблется от 9 до 24 млн. м³ в год. Сброс ведется с 1994 года.

Хвостохранилище из которого ведется сброс воды создано из озера Костомукшское, которое является верхним уровнем речной системы. Хвостохранилище используется для захоронения хвостов и оборотного водоснабжения. Ведение данной деятельности привело к изменениям гидрологического режима водоема: уровень воды вырос на 23,18 м, размер зеркала увеличился в 6,6 раза, а объем воды в 25 раз. Период полного водообмена увеличился с 0,23 до 30 лет.

В результате деятельности предприятия произошли серьезные изменения в химическом составе воды озер Костомукшское и Окуновое, чуть меньшее воздействие наблюдается на озера Поппалиярви и Койвас, объекты ниже озера Койвас остались в состоянии близком к фоновому.

Сброс воды из хвостохранилища влияет на изменение состава и качества воды в нижнем течении реки Кенти. Наблюдается чёткая корреляция между многолетними изменениями состава воды хвостохранилища и реки Кенти.

В контексте геоэкологических исследований изучение загрязнения водных объектов играет важную роль, так как оно может быть связано с деятельностью промышленных предприятий. В данном разделе рассматриваются результаты оценки загрязнения в системе реки Кенти, включая влияние ГОК «Карельский окатыш», опубликованные Карельским научным центром РАН, включая труды П. А. Лозовика.

1. Анализ данных: Исследования гидрохимического состава воды выявили превышение природных фоновых показателей по таким химическим элементам, как сульфаты, калий, нитраты, литий и никель, как в верхних, так и в нижних водоёмах системы.

2. Влияние предприятий: Данные о сбросах ГОКа «Карельский Окатыш» подтверждают его непосредственное воздействие на уровень загрязнения водных ресурсов. С увеличением количества выпускаемой из хвостохранилища жидкости возрастает уровень минерализации, содержания калия, сульфатов, нитратов, лития и никеля в нижележащих реках и озёрах.

3. Сравнение с допустимыми уровнями: Оценка загрязнения показывает, что объём сточных вод, поступающих в систему реки Кенти превышает ПДК для содержания многих химических элементов.

Текущая ситуация с загрязнением оказывает серьёзное влияние на экологию всей речной системы, вызывая ухудшение условий для флоры и фауны, а также пагубно воздействуя на водные ресурсы региона.

Исследование многолетней динамики содержания нитратов в водной системе реки Кенти является ключевым моментом для понимания экологического состояния этого водного объекта и воздействия антропогенных факторов, включая промышленные предприятия.

Особое внимание уделяется анализу данных, полученных учеными Карельского научного центра Российской академии наук, среди которых особо выделяются работы П.А. Лозовика и Н.Е. Кулаковой.

Из-за деятельности человека река Кенти подверглась азотному загрязнению. В воде преобладают нитраты, но в нижнем течении реки и в озере Среднее Куйто больше всего органического азота (N_{орг}), что типично для карельских водоёмов.

Многолетние исследования показали, что концентрация нитратов снижается от верхних озёр системы к нижним.

Исследования выявили, что количество нитратов в воде верхних озёр – Окуневое и Поппалиярви – колеблется и имеет тенденцию к росту. В нижних озёрах – Койвас и Кенто – этот показатель более постоянный [1].

Микроэлементы в воде, за исключением лития и никеля, соответствуют естественным значениям. Однако содержание лития и никеля снижается от верхних озёр к нижним из-за влияния приточных вод. Концентрация алюминия, напротив, увеличивается из-за его поступления со слабокислыми приточными водами [2]. Сброс воды из хвостохранилища повлиял на химический состав реки Кенти. Техногенное воздействие уменьшается по мере приближения к устью реки благодаря боковой проточности и почти не заметно в озере Среднее Куйно [1].

Таким образом, работа Костомукшского горно-обогатительного комбината сильно изменила химический состав воды в зоне его влияния. Причём водные

объекты возле Корпангского месторождения загрязняются быстрее, чем возле Костомукшского (рисунок 1.3).

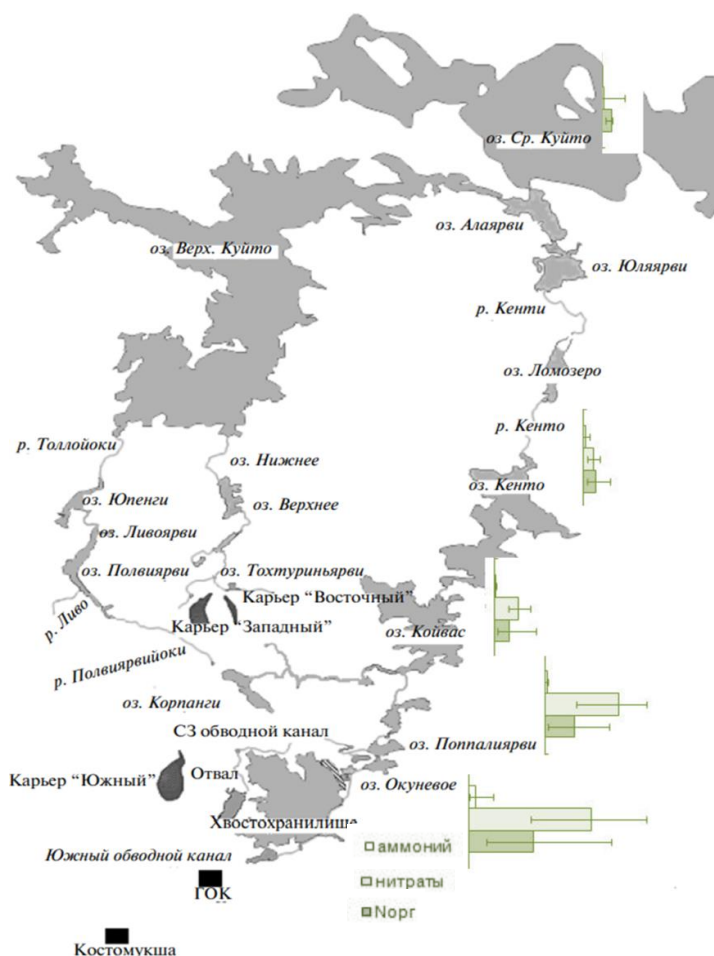


Рисунок 1.2 – Содержание соединений азота в озерах системы реки Кенти (составлен автором с учетом [1])

Физико-химическая характеристика водосброса из озера Костомукшское

Водосброс из озера Костомукское составляет 13-15 млн м³ в год. Объем водосброса распределен неравномерно, снижается в осенне-зимний период и повышается в весенне-летний период.

Минимальные значения водосброса фиксируются в марте и составляют порядка 0,5 млн м³/мес. Максимум фиксируется в августе и составляет около 2,3 млн м³/мес.

Водосброс из озера Костомукшское перекрыт дамбой через которую сбросные воды поступают в отстойник с площадью 0,32 км² (рисунок 1.3).

Отстойник разделен на три части, в одной из которых расположены Фито-очистные сооружения (ФОС).



Рисунок 1.3 – Отстойник озера Костомукшское: 1) оз. Костомукшское; 2) загородительная дамба; 3) отстойник; 4) оз. Окунево.

После прохождения отстойника вода попадает в естественный водоем – озеро Окунево, озерно-речную систему реки Кенти. Время прохождения отстойника зависит от сезона и объема водосброса и составляет от 1 до 4 дней.

Физико-химические характеристики вод меняются в зависимости от сезона, средние значения основных показателей представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Физико-химические характеристики вод

Характеристика	Значения
Растворенный кислород	8,4-12,8 мг/л
pH	7,3-7,8
ОВП (окислительно-восстановительны потенциал)	52-214 мВ
T	+1 - +19 °C
TDS	500-650 мг/дм ³
Электропроводность EC	1089-1234 мкСм/см

Концентрация растворенного кислорода соответствует норме ПДК (выше 6 мг/л), составляет 8,4-12,8 мг/л. Водородный показатель рН находится в диапазоне 7,3-7,8 ед., что соответствует нормам СанПиН 1.2.3685-21 (6-9 ед. рН) для воды питьевого централизованного и нецентрализованного водоснабжения, источников хозяйственно-бытового и рекреационного водопользования. Вода обладала окислительно-восстановительным потенциалом в диапазоне от 156 до 214 мВ, что указывает на окислительную среду. Благодаря такой среде соединения металлов, азота и фосфора не переходили из донных отложений в воду.

Содержание растворённых частиц (TDS) в воде находилось в диапазоне 500-650 мг/дм³, который рекомендован для питьевой воды, то есть не превышало ПДК 1000 мг/дм³. Воду пресная, но достаточно сильно минерализованной.

Величина электропроводности воды (ЕС) меняется в пределах от 1089 до 1234 мкСм/см. Стоит отметить, что пределы значений электропроводности могут варьироваться: обычно она колеблется от 250 до 800 мкСм/см, что зависит от источника воды и особенностей региона. Электропроводность в свою очередь тесно связана с минерализацией воды.

Температура воды варьируется в диапазоне от 1 до 19 °С и зависит от времени года. Минимальные значения около 1 °С фиксируются в декабре, максимальные 18-19 °С в июле.

Подобные условия свидетельствуют о возможности выращивания в воде растительных организмов, деятельность которых может приводить к снижению концентраций загрязняющих веществ, в том числе соединений неорганического азота. Однако успешная утилизация веществ возможна в летние периоды, когда температура воды максимальна. В зимние периоды при температуре воды в 1 °С растительные организмы будут подавлены.

Выводы по разделу

В ходе исследования были изучены особенности гидрологического режима озёрно-речной системы реки Кенти, расположенной на севере Республики Карелия. Эта система включает в себя ряд водоёмов и притоков, а также саму реку Кенти.

Исследование показало, что гидрологический режим системы реки Кенти формируется под воздействием климатических условий, характерных для северных широт. Холодные и длительные зимы, а также короткие и прохладные летние периоды оказывают значительное влияние на распределение влаги, скорость течения воды в реках, испарение, а также формирование льда и снежного покрова.

Кроме того, было установлено, что деятельность Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК) оказывает значительное воздействие на гидрологическую обстановку в регионе. В процессе своей работы ГОК выбрасывает в озёрно-речную систему техногенные воды, содержащие соединения неорганического азота (NO_2 , NO_3), а также K, S, Na, Li, Ni и минеральные вещества. Это приводит к значительным изменениям в химическом составе воды и влияет на экологическое состояние водоёмов и водотоков.

Результаты исследования показали, что функционирование Костомукшского ГОК привело к заметным изменениям химического состава воды в хвостохранилище и системе реки Кенти. В результате наблюдений были зафиксированы тренды, отражающие изменение составов вод в результате деятельности предприятия. В частности, в озере Костомукшском увеличилось содержание большинства минеральных компонентов, а концентрации Al, K, N и Li в водах реки Кенти существенно возросли. Также отмечено снижение концентрации HCO_3^- в исследуемых водах.

Эти изменения вызваны регулярными попуском воды из озера Костомукшское в систему реки Кенти, объёмы которых составляют 13-15 млн м³ в год. Фиксируется увеличение минерализации, содержание калия, сульфатов, нитратов, лития и никеля во всех водоёмах системы Кенти. Однако по мере продвижения от верхних озёр к нижним озёрам наблюдается закономерное снижение указанных показателей за счёт разбавления водой озера Среднее Куйто, которое остаётся относительно чистым из-за большого объёма поступающих в него вод.

Разработка и исследование озера Костомукшское и прилегающих к нему водоёмов свидетельствуют об увеличении степени загрязнённости водных объектов за последние десятилетия. В настоящий момент воды озера Костомукшское, а также расположенных выше по течению озёр характеризуются как «чрезвычайно грязные».

Для решения этой проблемы необходимо разработать и внедрить новые технологии очистки сточных вод, а также усилить контроль за выбросами промышленных предприятий. Это позволит предотвратить дальнейшее загрязнение озёрно-речных систем и сохранить экологическое равновесие в регионе.

1.2. Микроводоросль рода хлорелла (*Chlorella*)

Виды рода хлорелла (*Chlorella* Beij.) – широко распространены в природе. Морфологически представляют собой сферические одноклеточные микроорганизмы, 2-10 мкм в диаметре, не имеющие жгутиков.

Представители рода характеризуются зеленым окрасом, зависящим от соотношения хлорофилла *a* и *b* с другими пигментами, такими как каротиноиды. Эндоплазматическая сеть хлоропластов отсутствует. Хлоропласты окружены двумя мембранами. [3].

Хлорелла активно применяется во многих отраслях деятельности человека, начиная садовых удобрений и корма для рыб и скота, заканчивая производством топлива, и кислорода, очисткой водоемов [4 - 18]. Кроме того, находит широкое применение, как тест-объект в экологических исследованиях [19 - 22].

Виды рода встречаются в планктоне пресных водоемов и водотоков, а также образует обрастания в фитоперифитоне и обнаруживается как пионер на почвах [1].

Наиболее часто встречаемым является вид *Chlorella vulgaris* (рисунок 1.4). Его можно наблюдать в прудах, лужах, канавах.

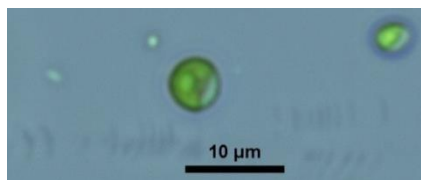


Рисунок 1.4 – Клетки микроскопической водоросли *Chlorella vulgaris*

Области применения Хлореллы

Вид *Chlorella vulgaris* нашел применение в следующих аспектах человеческой деятельности: Пищевая добавка; Корм при выращивании рыб, птиц, скота; Садовое удобрение; Производство кислорода; Создание биотоплива; Восстановление водоемов и очистка сточных вод; Тест-объект экологических исследований.

Эта водоросль имеет в своем составе большое количество белка – 50%, что превосходит содержание белка в пшенице 12% и сопоставимо с содержанием в мясе. Она содержит большое количество витаминов [5, 6].

Одной из отраслей применения хлореллы является получение чистой воды [16]. Так О.Е. Количеной [17] изучалась возможность применения водоросли хлореллы для разработки экономически выгодного и экологичного метода очистки вод от фенола. Лабораторные опыты показали снижение концентрации фенола в сточных водах птицеводческого хозяйства при замене водоросли микроцистита на хлореллу. Получен вывод о применимости хлореллы для очистки вод. Ю.В. Семенов [18] рассматривали использование хлореллы для очистки вод при загрязнении нефтепродуктами. Было показано, что водоросль снижает токсичность нефтепродуктов на 38-57%. При этом концентрация загрязнителя не снижается, однако он переходит в иное менее токсичное соединение, которое затем разрушается при экстракции. На данный момент хлорелла уже применяется для таких водных объектов России, как озеро Казанского зооботсада, Леновское водохранилище, Нижнетагильский пруд, Орловский пруд, Гравский пруд. Но не всегда такой подход успешен. В Ижевском пруде применению хлореллы для очистки вод помешали донные отложения.

Кроме того хлорелла применяется в различных методиках биотестирования. Существует ряд методик [19, 20, 21] по определению токсичности вод и почв, основанных на измерении оптической плотности суспензии *Chlorella vulgaris* Beijer. Данные методики находят свое применение в работах по контролю токсичности и качества очистки вод [22].

1.3. Способы выращивания микроводорослей

На данный момент существует два основных типа массового культивирования микроводорослей: на открытом воздухе и в биореакторах [22]. В 1950-х годах в Японии, США, Чехословакии начались исследования по созданию установок для выращивания микроводорослей открытым способом, в результате были изобретены и описаны первые прототипы подобных установок [24].

Однако не во всех странах климатические условия позволяют выращивать микроорганизмы под открытым небом [22]. Поэтому также разрабатывались так называемые биореакторы [25 – 34], позволяющие оптимизировать процесс выращивания, искусственно создавая оптимальные условия для размножения микроорганизмов.

Все разновидности установок для культивирования микроскопических культур представлены на рисунке 1.5.

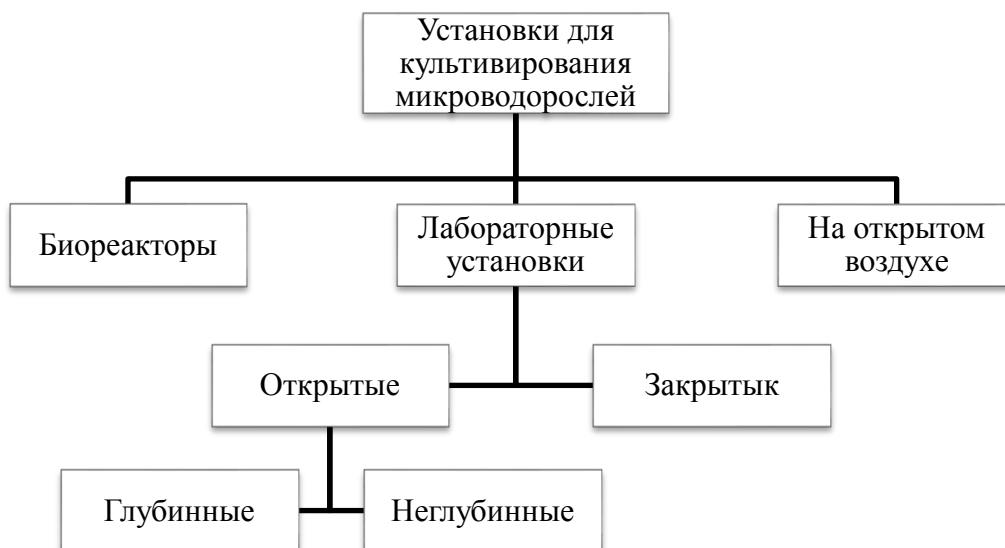


Рисунок 1.5 – Разновидности установок

Воздействие внешних факторов на микроводоросли

Освещение

Наличие света является наиболее важным фактором, влияющим на скорость роста микроводорослей. Чаще всего используют фотопериод 16:8.

В связи с этим наиболее перспективным является использование закрытых фотореакторов с применением искусственных источников освещения. [35].

При использовании искусственного освещения необходимо помнить, что в процессе размножения микроводоросль осаждается на стенках сосудов, покрывая их зеленым слоем. Это, в конечном счете, может привести к снижению интенсивности освещения.

Оптимальным для Хлореллы является интенсивность освещения $(0,7-20) \cdot 10^3$ лк., порог светового насыщения $(1-90) \cdot 10^3$ лк [35]. Хлорелла способна приспосабливаться к различным значениям интенсивности освещения. Значение оптимального освещения зависит от конструктивных особенностей установки для культивирования.

Помимо интенсивности освещения еще одной важной характеристикой для выращивания водорослей является спектр излучения. Спектр поглощения зависит от пигментов, осуществляющих процесс фотосинтеза: хлорофилл *a*, *b*, каротиноиды.

Спектр поглощения хлореллы, как можно увидеть на рисунке 1.6., непрерывен, то есть она поглощает весь спектр видимого света. Но поглощение происходит с разной интенсивностью. В спектре поглощения хлореллы имеется два пика. Первый пик поглощения наблюдается в красном диапазоне от 660 до 680 нм. Второй пик находится в диапазоне синего света от 420 до 450 нм. [35]

Таким образом культивирования хлореллы оптимальным будет являться источник освещения в диапазоне 660-680 нм совместно с 420-450 нм, то есть красный и синий свет. И интенсивность такого источника освещения должна составлять $0,7-20 \cdot 10^3$ лк.

Кислород

Окислительно-восстановительный потенциал выражается в μH_2 и характеризует степень насыщения кислородом среды [36]. Анаэробные

микроорганизмы живут при значении rH_2 меньше 14, а размножение их возможно при значении ниже 5. Тогда как аэробы при rH_2 от 12 до 30.

Таким образом, варьируя окислительно-восстановительный потенциал воды можно регулировать темпы развития и размножения различных микроорганизмов. Снижение роста анаэробов наблюдается, начиная при концентрации 0,01-0,1 мг/л. [36]. А при высокой концентрации кислорода 10-30 мг/л рост анаэробов отсутствует.

Температура

Температура является важным фактором для нормального размножения микроводорослей. В своей работе [37 - 42] Ю.В. Мещерякова и С.А. Нагорнова экспериментально установили, что оптимальная температура для вида *Chlorella vulgaris* штамма ИФР № С111 лежит в диапазоне 33-35⁰С.

При этом существуют различные по термофильности штаммы и виды хлореллы. Так для криофильных форм оптимум температуры лежит в диапазоне от 10 до 15⁰С. Для мезофильных оптимальным являются значения от 25 до 27⁰С. А термофильным видам подходит температура 35-37⁰С.

Углекислый газ (CO₂)

В процессе своего жизненного цикла хлорелла, как и другие зеленые водоросли активно фотосинтезирует. В процессе фотосинтеза живые организмы с помощью световой энергии преобразуют оксид углерода и воду в сахар и кислород. Поэтому для культивирования хлореллы необходимо наличие углекислого газа.

Кислотность воды рН

Кислотность воды, она же водородный показатель, важна для нормального функционирования микроорганизмов в среде. Среда для хлореллы должна быть слабокислой. Уровень рН должен лежать в диапазоне 5,5-6,5 относительных единиц.

Минеральное питание

Несмотря на то, что для реакции фотосинтеза необходимы только вода, углекислый газ и солнечный свет, недостаток минеральных веществ может повлиять на качественный состав клетки микроводоросли [5].

Так нехватка азота снижает прирост биомассы клеток. При этом снижается концентрация белка и хлорофилла, и возрастает содержание углеводов и жиров в клетке. А средний сухой вес одной клетки возрастает. Снижение концентрации хлорофилла происходит вследствие недостатка белка необходимого для построения фотосинтетического аппарата и всех клеточных структур [5].

Так при азотном голодании отсутствует синтез белка, что приводит к накоплению только углеводов и жиров, так как они не содержат азот. Тогда как нехватка серы провоцирует синтез жиров, что несколько подавляет синтез углеводов. Снижение синтеза белка также происходит при серном голодании, но в меньшей степени, чем при азотном.

Питательные среды

На основе данных представленных выше можно сделать вывод, о целесообразности применения специальных сред для культивирования микроводоросли хлореллы. Среды для выращивания микроводорослей представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Состав (г/л) минеральных сред

№ п/п	Вещество	1	2	3	4	5	6	7
		Среда						
		Кнопа	Прага	Тамия	Майер-са	№3	Ягужинского	ЛГУ
1	Ca(NO ₃) ₂	0,25	-	-	-	-	-	-
2	CaCl ₂ *2H ₂ O	-	-	-	-	-	-	-
3	MgSO ₄ *7H ₂ O	0,06	0,01	2,5	1,204	0,75	0,1	0,3
4	K ₂ HPO ₄	-	0,01	-	-	-	-	0,3
5	KH ₂ PO ₄	0,06	-	1,25	1,224	1,5	-	-
6	KCl	0,08	-	-	-	-	-	-
7	KNO ₃	-	0,1	5,0	1,213	-	0,5	2
8	NH ₄ NO ₃	-	-	-	-	-	-	-
9	NH ₂ CONH ₂	-	-	-	-	0,3	-	-
10	FeSO ₄ *7H ₂ O	-	-	0,003	-	-	0,002	-
11	Fe ₂ (SO ₄) ₃	-	-	-	0,0747	-	-	-
12	FeCl ₃	Следы	Следы	-	-	Следы	-	-
13	ЭДТА	-	-	0,037	-	-	-	0,01
14	Растворы Микроэл-ов	-	-	0,0001	0,00005	-	-	0,00005

От того, какой элемент является источником азота, зависит, будет ли изменяться рН среды. А из-за наличия в среде Тамия нитрата калия, который является щелочной солью, среда изначально является щелочной. И при культивировании микроводорослей уровень рН повышается в растворе за счет накопления карбоновых и бикарбонатных ионов.

Оптимальные условия для культивирования хлореллы

Исходя из разделов, описанных выше, можно констатировать, что хлореллу можно выращивать, открытым способом при благоприятных внешних условиях. А в случае, когда условия окружающей среды не позволяют выращивать микроводоросль на воздухе, то применяют биореакторы закрытого типа.

В случае если нужно поддерживать оптимальные условия, то в качестве источника искусственного освещения лучше всего подойдут светодиодные лампы, излучающие одновременно красный и синий свет с длиной волны 660-680нм и 420-450нм соответственно. Интенсивность такого освещения должна составлять от $0,7 \cdot 10^3$ до $20 \cdot 10^3$ лк.

Хлорелла не требует дополнительной подачи кислорода, но ей необходим приток углекислого газа. Можно использовать чистый углекислый газ в объеме 50-100мл/ м³ или может подойти атмосферный воздух в объеме 3-5 л/м³ в минуту.

Кроме того аэрация, т.е. искусственная подача воздуха, может обеспечить дополнительное перемешивание культуры, которое также позитивно влияет на процесс культивирования.

Применение минеральных сред в качестве подкормки поможет избежать нехватки у микроводорослей различных микроэлементов.

Наиболее часто применяемой для выращивания Хлореллы из несбалансированных сред является среда Тамия. Оптимальным рН для выращивания Хлореллы является 5,5-5,6.

1.4. Загрязнение сточных вод неорганическим азотом

Российская Федерация занимает ведущее место в мировой практике добычи минеральных ресурсов, разрабатывая в настоящее время более 200 тыс. месторождений. Такая обширная горнодобывающая деятельность приводит к

экологическим проблемам, в частности к загрязнению природных озерно-речных экосистем недоочищенными сточными водами [43, 44]. Согласно данным Росводресурсов, федерального агентства по водным ресурсам России, сточные воды в объеме 52 км³ ежегодно сбрасываются в озерно-речные системы России, из которых 19 км³ из этого объема сточных вод сбрасывается в окружающую среду без должной обработки. Следует отметить, что предприятия минерально-сырьевого комплекса вносят значительный вклад. Их доля составляет 25% от общего объема сброса неочищенных сточных вод [45].

Очистка сточных вод.

Классификация методов очистки сточных вод

На сегодняшний день в области обработки сточных вод используются следующие методы, которые получили широкое распространение [46]:

- Методы без использования реагентов
- Методы с использованием реагентов
- Электрохимическая обработка
- Мембранные методы обработки
- Методы сорбции
- Биологическая обработка

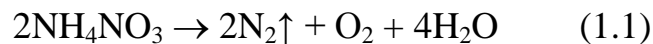
Выбор конкретного метода обработки сточных вод зависит от физико-химических характеристик сточных вод и климатических условий в регионе, где находится очистное сооружение.

Наблюдается растущая тенденция к применению методов очистки, которые исключают необходимость в химических реагентах и массивной инфраструктуре для снижения стоимости очистки и уменьшения воздействия на озерно-речные системы. Эти подходы используют природные фильтры и сорбенты, а также живые организмы, выполняющие их роль в процессе жизнедеятельности. В отношении удаления азотных соединений из сточных вод особенно перспективными техниками являются биологические методы, которые используют взаимодействие между сточными водами и водными растениями.

Источники неорганического азота в сточных водах горнодобывающих производств

В процессе добычи полезных ископаемых, а также при ведении коммунального хозяйства образуются сточные воды, загрязненные соединениями азота. В воду коммунальных хозяйств биогенный азот попадает с отходами жизнедеятельности человека.

В сточные воды горнодобывающих предприятий неорганический азот попадает из нитрата аммония, используемого в качестве взрывчатки при буровзрывных работах [47, 48]. В процессе взрыва нитрат аммония разлагается с выделением энергии и тепла на кислород, воду и азот по формуле 1.1:



Образованный по формуле азот газообразный и не вносит вклад в загрязнение вод, а улетучивается с воздухом. Однако в процессе взрыва не вся масса азота переходит в газообразную форму. Часть взрывчатых веществ подвергается неполному разложению.

Из-за чего в сточных водах неорганический азот присутствует в форме: Аммонийные соли NH_4^+ ; Свободный аммиак NH_3^+ ; Нитраты NO_3^- ; Нитриты NO_2^- .

Полученный азот не выпадает в осадок и увеличивает растворимость с ростом температуры. В сточные воды азот попадает с карьерными и шахтными водами, а также с атмосферными осадками, проходящими через взорванную породу. Порядка 4 % общей массы азота из взрывчатых веществ попадает в воду после взрывных работ [49 – 51].

Способы устранения азотных соединений из сточных вод

Для удаления неорганического азота применяются химические, физико-химические, биологические методы.

Химические методы: озонирование, обработка натриевыми или кальциевыми гипохлоритами.

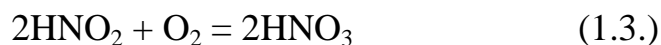
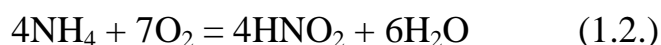
Эти химические вещества, в сочетании с азотными соединениями, образуют нетоксичные вещества. Тем не менее, для удаления азотных соединений более часто используются биологические методы, которые зависят от микроорганизмов и бактерий, потребляющих азотные соединения в сточных водах [48, 52].

Физико-химические методы: электродиализ, адсорбция, обратный осмос, ионообмен.

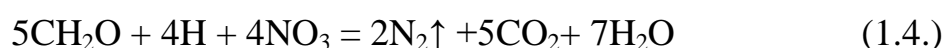
Извлечение неорганических азотных соединений возможно физическими методами, однако их широкому внедрению препятствует недостаточная селективность, особенно при работе с крупными потоками промышленных сточных вод. Еще одним ограничением является риск вторичного загрязнения окружающей среды используемыми реагентами.

Напротив, для очистки бытовых стоков повсеместно применяются биологические подходы, ключевым элементом которых служат специализированные сообщества микроорганизмов – активированный ил [52].

Данная технология включает двухстадийный процесс. На первом этапе в аэробных условиях нитрифицирующие бактерии окисляют ионы аммония до нитритов с последующим их превращением в нитраты. Указанная последовательность реакций составляет суть нитрификации. Нитрификация проходит в два этапа по формулам 1.2., затем 1.3.:



Второй этап происходит в анаэробных условиях, без кислорода, с участием денитрифицирующих бактерий. Эти микроорганизмы переводят азот из нитратов в газообразный (N_2). Денитрификация зависит от источников органического углерода, которые бактерии получают из органических веществ. Процесс денитрификации протекает по формуле 1.4.:



Очистка сточных вод с использованием водных растений

Изучение потенциала высшей водной растительности для очистки сточных вод ведется с конца XX века. Технологически этот процесс обеспечивается за счет создания специализированных инженерно-биологических сооружений. В отечественной научной литературе за ними закрепился термин «биоплато», тогда как в международных источниках распространено название «сконструированные водно-болотные угодья» (constructed wetland) [53 – 82].

Ключевым аспектом реализации таких технологий является подбор видового состава растительных сообществ, адекватного специфике предприятия, его климатической зоне, объему стоков и их химическому составу [76], который может варьироваться в зависимости от технологического цикла и сезона.

В рамках методологии constructed wetlands апробированы различные фитосистемы, в том числе:

- Комбинации тростника и осоки на погруженных плотинах в сочетании с водорослями;
- Виды с развитой корневой системой: хмель, рогоз, осока, камыш [62, 63, 69];
- Многоступенчатая очистка с участием зеленых водорослей (*Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus sp.*), цианобактерий (*Oscillatoria sp.*, *Anabaena sp.*), диатомовых водорослей (*Navicula radiosa*) и высших растений (тростник, осока, омела) [63];
- Применение *Vallisneria spiralis* [69];
- Доочистка стоков в поточных каналах с *Cyperus alternifolius* [48];
- Фильтрация через системы с *Phragmites australis* и *Lemna mino* [70, 71, 72];
- Очистка в каналах с использованием *Eichhornia crassipes* [66];
- Использование гидатофитов, гидрофитов, гелофитов [72], мезофитов [74], а также *Najas microdon* [75].

Для регионов с суровым климатом, например, северных территорий России, лимитирующим фактором становится низкая температура, неблагоприятная для многих гидрофитов. Однако исследования демонстрируют, что корневые системы

продолжают экстрагировать загрязнители даже в период зимнего покоя, а ассоциированные микробные сообщества в ризосфере осуществляют метаболизм питательных веществ и органических соединений в течение всего года [77, 61].

Успешные примеры внедрения фитотехнологий отмечены на горнодобывающих предприятиях Мурманской и Томской областей, а также Республики Карелия [78, 79, 80, 81]. Вместе с тем, авторы разработок констатируют постепенное снижение эффективности таких систем, обусловленное насыщением организмов-фиторемедиантов, продолжительным снежным сезоном с дефицитом освещенности, а также вторичным загрязнением воды продуктами разложения отмершей биомассы [78, 79, 80, 81].

Наряду с биологическими методами, активно развиваются и технологии физико-химической очистки. Например, [83] предложили усовершенствованную технологическую схему физико-химической очистки сточных вод, демонстрирующую высокую эффективность для ряда загрязнителей.

Таким образом, очистка вод от соединений неорганического азота водной растительностью возможна и внедряется на некоторых производствах, но не лишена проблем круглогодичного обеспечения необходимой эффективности.

Это заключение подчеркивает огромный потенциал и значимость использования высших водных растений для удаления соединений азота в процессах очистки воды. При этом подчеркивает необходимость инновационных решений по разработке природоподобных технологий, способных поддерживать свою эффективность даже в регионах с неблагоприятными для водных растений климатическими условиями.

1.5. Электромагнитные поля и их воздействие на организмы

Классификация диапазонов частот и их источники.

Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [84] и Международного союза электросвязи диапазоны частот от 3 Гц до 3000 ГГц делятся согласно тому, как показано в таблице 1.3.

Электромагнитные излучения делятся на 12 диапазонов, каждому из которых соответствуют свои частоты и длины волн.

Таблица 1.3 – Диапазоны частот от 3Гц до 3000ГГц [84]

Диапазон частот	Длина волны	Название частот	Вид длин волн	Обозн. МСЭ
3-30 Гц	100-10 Мм	Крайне низкие частоты (КНЧ)	Декаметровые	ELF
30-300 Гц	10-1 Мм	Сверхнизкие частоты (СНЧ)	Мегаметровые	SLF
0,3-3 кГц	1000-100 км	Инфранизкие частоты (ИНЧ)	Гектокилометровые	ULF
3-30 кГц	100-10 км	Очень низкие частоты (ОНЧ)	Мириаметровые	VLF
30-300 кГц	10-1 км	Низкие частоты (НЧ)	Километровые	LF
0,3-3 МГц	1-0,1 км	Средние частоты (СЧ)	Гектометровые	MF
3-30 МГц	100-10 м	Высокие частоты (ВЧ)	Декаметровые	HF
30-300 МГц	10-1 м	Очень высокие частоты (ОВЧ)	Метровые	VHF
0,3-3 ГГц	100-10 см	Ультравысокие частоты (УВЧ)	Дециметровые	UHF
3-30 ГГц	10-1 см	Сверхвысокие частоты (СВЧ)	Сантиметровые	SHF
30-300 ГГц	10-1 мм	Крайне высокие частоты (КВЧ)	Миллиметровые	EHF
300-3000 ГГц	1-0,1 мм	Гипервысокие частоты (ГВЧ), длинноволновая область инфракрасного излучения	Децимиллиметровые	THF

Особенности распространения миллиметрового диапазона

Излучение миллиметрового диапазона с длиной волны 1-10мм, оно же излучение крайне высокой частоты (КВЧ) 30-300ГГц распространяется прямолинейными лучами, как видимый свет. Волны миллиметрового диапазона практически не имеют способность огибать объекты, то есть не склонны к дифракции, поэтому распространяются только при отсутствии любых препятствий на пути. Поэтому радиус распространения такого излучения ограничен расстоянием прямой видимости [85].

То есть приемник и источник излучения должны находиться в прямой видимости друг от друга без препятствий на пути. Обычно расстояние прямой видимости для таких излучений не превышает 60км. Для увеличения расстояния передачи сигналов КВЧ строят линии передатчиков ретранслирующих сигнал от одного к другому.

При распространении, волны миллиметрового диапазона способны отражаться от различных объектов, а также накладываться друг на друга. Так на их распространение влияют различные метеорологические явления, такие как, дождь, туман, снег [84].

Электромагнитные поля, как экологический фактор окружающей среды

Биосфера – оболочка Земли, которую населяют живые организмы. В ее состав входят Электромагнитные поля (ЭМП) естественного происхождения, а также искусственно созданные человеком.

К естественным полям относятся: магнитное, оно же геомагнитное, и электрическое поле Земли. Также естественными являются переменные ЭМП, источниками которых являются радиоизлучение Земли, Солнца и космоса, и атмосферные явления, такие как разряды молний. Частоты естественных переменных ЭМП находится в диапазон 103-1012Гц [84].

Поля искусственного происхождения создаются деятельностью человека. К ним относятся излучения от линий электропередач (ЛЭП), промышленных установок, бытовых электроприборов, устройств спутниковой и сотовой связи, радиостанции. Количество источников искусственного излучения с каждым годом растет [86]. Что заставляет рассматривать их, как важный экологический фактор окружающей среды.

Энергетические загрязнения оказывают воздействие только во время излучения и не накапливаются, за исключением теплового и радиационного излучения. Таким образом, их относят к не аккумулирующим загрязнениям.

Электромагнитные поля распространяются в веществе и в вакууме. Это касается и тканей различных организмов. Квантовой энергии высокочастотного ЭМП недостаточно для создания изменений в структуре молекул или их разрушения. Так энергия необходимая для разрушения водородной связи составляет 80 МэВ, при этом максимальная энергия электромагнитного излучения (ЭМИ) 300 ГГц равняется 1,2 МэВ [85].

Так как излучения частотой до 300 ГГц не способны вызвать изменения молекул, то их называют неионизирующим. При этом такое излучение способно оказывать другие эффекты, такие как нагрев, наведение токов и изменения химических реакций [84].

Ошибочно полагать, что электромагнитное излучение может оказывать только негативные воздействия. Часть эффектов могут быть положительными,

даже оказывать стимулирующее воздействие на организм, например, тепловые эффекты при холодной обстановке под действием ЭМИ. А солнечный свет, который также является электромагнитным излучением, необходим для нормального функционирования большого числа организмов, необходим для процесса фотосинтеза для растений.

А некоторые эффекты могут не оказывать ни положительных, ни отрицательных воздействий на организм. Примером может быть усиление кровотока вследствие нагрева от воздействия ЭМИ.

Количество энергии полученное в результате поглощения ЭМИ зависит от характеристик этого излучения, таких как частота, мощность, форма импульса, характер излучения, а также от размеров и формы биологического объекта, его расстояния до источника излучения, и кроме того внешних факторов. Например, наличия заземления, характеристик подстилающей поверхности, наличия других источников и приемников излучение и т.п.

В мировой науке применяют характеристику SAR (Specific Absorbed Rate) – удельная поглощенная мощность (УПМ), она описывает количество поглощенной энергии на массу объекта и выражается в Вт/кг либо мВт/г [84].

Воздействие ЭМП на микроорганизмы

Микроорганизмы представляют собой удобный объект изучения по нескольким причинам. Их простая организация, легкость культивирования и высокие темпы роста делают эксперименты с ними более быстрыми и простыми по сравнению с другими организмами [87-113]. Именно поэтому значительное количество исследований направлено на изучение воздействия электромагнитных полей на микроорганизмы.

Одной из ранних работ, демонстрирующих влияние магнитного поля на организмы, является исследование Kimball [88]. В этой работе изучалось воздействие магнитного поля на клетки дрожжей. В ходе эксперимента клетки дрожжей на разных стадиях развития подвергались воздействию как однородного, так и неоднородного магнитного поля в течение различных промежутков времени от 5 до 150 минут. Результаты указали на то, что воздействие оказывалось лишь

неоднородным магнитным полем и только на клетки во второй половине лаг-фазы. Также было показано, что эффекты зависели от продолжительности облучения: облучение в течение 10, 15, 17 минут не оказывало никакого воздействия, в то время как облучение в течение 5, 20, 25, 30, 60 и 150 минут оказывало ингибирующее действие. Эта работа стала одной из первых в своей области и заложила основы для изучения биологических эффектов электромагнитных полей.

Н.А. Глущенко [89] проводил исследование влияния неоднородного электрического поля на клетки пивных дрожжей, варьируя напряженность поля от 1 до 4 кВ/см. Результаты указывают на изменение количества жизнеспособных клеток под воздействием поля по сравнению с контрольными образцами. Наблюдаемые изменения зависели от напряженности поля и расположения объекта относительно поля.

Исследование Юсуповых Р. и Г. [90] направлено на оценку воздействия СВЧ излучения на споры, заражающие зерно. Эксперименты показали снижение числа спор в зараженном зерне с 1700 спор/г до 0, что свидетельствует о потенциальной эффективности применения СВЧ облучения для дезинфекции зерновых культур.

Исследование воздействия электромагнитных полей крайне низких частот (ЭМП КНЧ) проведено М.А. Бабенко и коллегами [91]. Эксперимент показал, что ЭМП с магнитной индукцией 0,9 мТл и частотой 16 Гц стимулирует увеличение биомассы винных дрожжей. Однако излучение с той же мощностью при частоте 30 Гц оказывает подавляющее воздействие на молочнокислые и уксуснокислые бактерии.

Исследование Liries J. и соавт. [92] нацелено на изучение воздействия пульсирующего магнитного поля на патогенные микроорганизмы, присутствующие в картофеле. Авторы обнаружили, что магнитное поле напряженностью 5 Тл оказывает ингибирующее воздействие на *Erwinia carotovora*, 10 Тл на *Streptomyces scabies* и 15 Тл на *Alternaria solani*.

Исследование Al-Barzenji Н. А. и соавт. [93] направлено на анализ воздействия магнитных полей с магнитной индукцией от 50 до 20 000 Гаусс на паразитов стрептококков. Было установлено, что максимальное подавляющее воздействие наблюдается при магнитной индукции 500 и 20 000 Гаусс.

Ряд исследователей занимался изучением воздействия электромагнитных полей на зубактерии [94-111]. Исследования Cellini и соавт. [94] и Zrimes и соавт. [95] обнаружили стимулирующий эффект переменного и постоянного магнитного полей на бактерии *Escherichia coli*. Стимулирующее воздействие было также отмечено у переменного магнитного поля, проведенного Chang с соавт. [96].

По данным Hirano [97], Li [98] и Singh [99] постоянное магнитное поле оказывает стимулирующее воздействие. Поле с магнитной индукцией 10 мТл увеличило скорость размножения *Spirulina platensis* на 50%, при магнитной индукции 250 мТл увеличение составило 22%, а облучение *Anabaena doliolum* магнитным полем 300 мТл также оказало стимулирующее воздействие. Исследования [110] также указывают на то, что магнитное поле с индукцией 10-27 мТл стимулирует прирост микроводоросли *Dunaliella salina* на 90%.

Влияние электромагнитных полей на микроводоросль Хлореллу

Хлорелла, используемая в качестве объекта исследований в области воздействия электромагнитных полей на живые организмы, стала предметом изучения в нескольких работах. Исследования показали, что постоянное магнитное поле оказывает стимулирующий эффект на представителей этого рода микроводорослей. Различные исследователи использовали поля с магнитной индукцией в диапазонах от 10 до 35 мТл [111] и от 6 до 58 мТл [112].

Работа Н.А. Суховского [22] продемонстрировала, что применение постоянного магнитного поля с напряжением 15 кВ в биореакторах способно увеличить производительность на 2 раза, а также снизить стоимость производства хлореллы на 52%.

Другая работа [113] исследовала воздействие переменного электромагнитного поля на различные микроорганизмы. Эксперимент показал

уменьшение биомассы и увеличение числа мертвых клеток *Chlorella vulgaris* под воздействием СВЧ излучения с частотой 10,4 ГГц и ППЭ 2,4 мкВт/см².

Работа Н.И. Мальцева и коллег [114] выявила стимулирующее действие сантиметрового и миллиметрового излучения, а также угнетающее воздействие от СВЧ излучения на хлореллу.

В области исследований воздействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на живые организмы можно выделить два основных направления [115]. Первое направление оценивает негативные эффекты ЭМИ на организмы, предполагая, что электромагнитные поля могут быть вредными и загрязнять окружающую среду [116]. При этом компании, занимающиеся производством бытовой техники, отрицают опасность электромагнитного излучения для человека, и утверждают, что производимая техника соответствует всем нормам безопасности и не несет вреда для здоровья. Кроме того, и само человечество не хочет отказываться от достижений техники, применяя различные устройства в быту [115]. В связи с этим особенно актуальны меры по ослаблению действия электромагнитных полей.

Второе научное направление рассматривает электромагнитное излучение с точки зрения возможности его применения в лечебных целях и поиска стимулирующих эффектов излучения на организмы. Основными сторонниками и основоположниками данного направления являются академик Н.Д. Девятков, профессор О.В. Бецкий, профессор Н.И. Сеницын, профессор В.Ф. Киричук и другие [117].

В основном сторонники данного научного направления рассматривают воздействие электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с длиной волны 1-10 мм, оно же излучение крайне высоких частот (КВЧ), частотой 30-300 ГГц.

Впервые мысль о возможности стимулирующего воздействия ЭМИ КВЧ на живые объекты была предложена академиком Н.Д. Девятковым с соавт. в 1964-1965 гг. [118].

Механизмы воздействия ЭМИ миллиметрового диапазона

На данный момент имеется несколько гипотез, пытающихся объяснить эффекты от ЭМИ миллиметрового диапазона оказывающие воздействия на организмы [117 - 125].

Эффекты для организмов от воздействия ЭМИ на воду [128]:

- Выработка БАВ;
- Синтеза АТФ;
- Нормализация ЦНС;
- Усиление иммунитета;

То есть ЭМИ КВЧ может воздействовать на организмы на организменном, клеточном и молекулярном уровне.

Раздел подготовлен на основе обзора автора диссертации [129].

1.6. Выводы по главе

Проведя литературный обзор по нашей области исследования, были получены следующие выводы:

1. Загрязнение озерно-речных систем сточными водами, содержащими неорганический азот, является серьезной проблемой горнодобывающей отрасли. Для утилизации азота наиболее эффективны биологические методы очистки. В связи с низкими температурами в зимний период применение биологических методов в северных регионах России затруднено. Требуется разработка новых методов очистки сточных вод от азота в северных широтах.

2. Разработка технологий утилизации неорганического азота из сточных вод горнодобывающих производств в северных широтах России актуальная задача. Применение Хлореллы может помочь в разработке необходимых систем очистки.

3. Хлорелла является перспективным объектом исследований по двум причинам. Во-первых, данная микроводоросль имеет простую организацию и высокую скорость развития, что делает ее удобным объектом для лабораторных исследований. Во-вторых, Хлорелла применяется в различных сферах от использования в качестве кормов животных до получения топлива и в очистке

водоемов. Поэтому данные, полученные в исследованиях, могут быть полезны для применения на практике.

4. Существуют различные способы культивирования микроводорослей, это и выращивание открытым и закрытым методом вне помещения, и выращивание в биореакторах. Для исследования воздействий искусственных ЭМП на микроводоросли лучше всего подойдут компактные лабораторные установки, в которых все условия для культивирования исследуемого объекта можно точно задавать и поддерживать в необходимых значениях.

5. Накоплено большое количество работ изучающих воздействия ЭМИ на живые организмы. Излучение способно оказывать, как стимулирующие, так и угнетающие воздействия на организмы в зависимости от свойств этих излучений и характера воздействия. Электромагнитное излучение крайне высоких частот 30-300ГГц миллиметрового диапазона, длина волны 1-10мм, способно оказывать как стимулирующие, так и угнетающие эффекты на живые организмы, в том числе и микроорганизмы. И является перспективным с точки зрения стимулирования организмов.

6. Воздействие излучений миллиметрового диапазона не изучалось на микроводоросли Хлорелла. Подобные исследования актуальны, как с точки зрения общего понимания вопроса о воздействии ЭМИ на организмы, так и с точки зрения применения полученных знаний для модернизации технологий в различных областях, в том числе для разработки технологий биологической очистки сточных вод.

1.7. Постановка основных направлений диссертационного исследования.

На основе рассмотренной литературы и полученных выводов были сформулированы следующие направления исследования:

1. Сконструировать лабораторную установку, для культивирования микроводоросли Хлореллы в оптимальных для данного вида условиях с возможностью облучать объект исследований КВЧ излучением в процессе культивирования;

2. Исследовать эффекты, оказываемые электромагнитным излучением крайне высоких частот на Хлореллу на различных частотах в диапазоне 37,50-53,53 ГГц;
3. Исследовать воздействие электромагнитных излучений КВЧ на Хлореллу при различной длительности воздействия;
4. Изучить способность водоросли Хлорелла утилизировать азот из сточных вод горнодобывающих производств;
5. Изучить возможность применения ЭМИ КВЧ для улучшений технологий восстановления водоемов и технологий культивирования микроводоросли Хлореллой;
6. Подобрать оптимальные условия для утилизации неорганического азота из сточных вод *Chlorella vulgaris*: температура, длительность и частота облучения, состав среды культивирования, способ подготовки культуры.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris использовалась в исследовании для утилизации соединений азота. Хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beij.) – обширно распространенная в природе одноклеточная планктонная микроводоросль. Встречается в водах озер и рек во взвеси, также покрывает зеленым налетом предметы, находящиеся под водой и влажные почвы.

Обладает размером 2-10 мкм. По форме является сферической. В собственных хлоропластах имеет хлорофилл *a* и *b*. Для поддержания жизни и фотосинтетической активности нуждается лишь в солнечном свете, воде, диоксиде углерода и малом количестве минеральных веществ. В связи со своей неприхотливостью отлично подходит для замкнутых экосистем.

Данный микроорганизм применяется в большом количестве отраслей. В том числе хлорелла применяется и как тест-объект экологических исследований. Поэтому данная водоросль была выбрана в качестве объекта исследования.

Исследования воздействия ЭМИ на хлореллу в рамках данной работы проводилось только в лабораторных условиях с водной суспензией микроводоросли. В рамках экспериментальной работы микроводоросль культивировалась и подвергалась воздействию факторов в специально сконструированной установке, поддерживающей оптимальные для вида условия.

Оптимальными условиями для выращивания хлореллы являются температура 25-35 °С, интенсивность освещения в диапазоне от $0,7 \cdot 10^3$ до $20 \cdot 10^3$ лк (длиной волны 660-680нм и 420-450нм), рН 5,5-5,6. Во время роста водоросль требует 50-100мл/м³ углекислого газа. Культивируется на среде Тамия.

Фактор внешнего воздействия – электромагнитное излучение крайневысоких частот.

На живые организмы постоянно воздействует большое количество факторов. Один из таких факторов – электромагнитное излучение. Механизмы воздействия электромагнитного излучения на живые организмы до конца

остаются не ясными, хотя количество источников излучения постоянно растет. Поэтому было решено посвятить наши исследования изучению воздействия электромагнитных излучений на организмы.

Существует большое количество работ, описывающих воздействия миллиметрового диапазона частот. Данные исследования выявляли, как стимулирующие, так и угнетающие эффекты. Нами не было найдено достаточного количества работ, которые исследовали воздействия миллиметровых излучений на хлореллу.

В нашей работе был выбран диапазон часто 37,5-53,57 ГГц, так как в работах других авторов [126, 127, 128] было отмечено стимулирующее воздействие на других объектах исследований. Данный выбор был сделан с целью применения знаний о стимулирующих диапазонах частот в разработке различных технологий с применением хлореллы.

2.2. Воздействие ЭМИ КВЧ на *Chlorella vulgaris*

В работе рассматриваются эффекты от воздействия электромагнитных излучений миллиметрового диапазона 37-53 ГГц на хлореллу.

В рамках работы оценивалось воздействие на скорость роста и содержание хлорофиллов. Данные показатели дают возможность судить о физиологической активности и состоянии фотосинтезирующих организмов. Что позволяет делать выводы о том, находится ли организм под воздействием стресса или стимулируется за счет воздействия внешних факторов.

Утилизация соединений азота из сточных вод водорослью *Chlorella vulgaris*

Загрязнение сточных вод предприятий горнопромышленного комплекса является актуальной проблемой. Неорганические соединения азота, образующиеся при неполном распаде нитрата аммония во время взрывных работ, попадая в карьерные и сточные воду, растворяются. Удаление азота физическими методами малоэффективно. Для удаления азота из вод применяют биологические методы. *Chlorella vulgaris* в процессе жизнедеятельности поглощает азот и может использоваться для очистки воды. Однако химический состав сточных вод может отличаться от предприятия к предприятию, что требует подбора индивидуальных

решений для очистки сточных вод. Кроме того, климатические условия в северных регионах России затрудняют внедрение биологических методов очистки. Поэтому важно подобрать оптимальные условия для удаления неорганического азота из сточных вод с помощью микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

2.3. Материалы и методы изучения действия ЭМИ КВЧ на *Chlorella vulgaris*

Лабораторная установка для культивирования микроводоросли Хлореллы

Для проведения экспериментальной работы нам необходима лабораторная установка для культивирования микроводорослей. Готовые биореакторы имеют слишком большие размеры и стоимость, поэтому было решено создать лабораторную установку самостоятельно.

При разработке конструкции необходимо учесть следующие требования:

- Поддержание температуры в диапазоне 20-35⁰С;
- Наличие постоянного освещения с синим и красным спектром;
- Снабжение водоросли углекислым газом;
- Наличие возможности поставить сразу несколько повторов опытов;
- Простота эксплуатации и конструкции;
- Относительная дешевизна и доступность комплектующих деталей.

В качестве емкостей, в которых культивировалась Хлорелла, было решено использовать стакан В-1-1000, на рисунке 2.1. Данная лабораторная посуда имеет объем 1000 мл, диаметр 95 мм и высоту 180 мм, материал: стекло. Такая посуда не восприимчива к воздействию температур и химических веществ, а также позволяет наблюдать за состоянием объекта. В установке используется три стакана, для проведения трех повторений опыта.

Стаканы помещаются в стеклянный аквариум объемом 15 литров, который играет роль термостата. В аквариуме поддерживается необходимая температура и освещение. Такая конструкция позволяет добиться одинаковых условий во всех емкостях.



Рисунок 2.1 – стакан В-1-1000

Чтобы добиться оптимальной для водоросли температуры применяется аквариумный нагреватель АН-1006-1, изображенный на рисунке 2.2. Данный нагреватель питается от сети 220 В, 50 Гц, имеет мощность 25Вт. Способен поддерживать температуру 20-34⁰С с точностью ± 1 ⁰С. Имеет возможность регулировки температуры во время работы.



Рисунок 2.2 – нагреватель АН-1006-1

Для точного контроля температуры используется дополнительный термометр, который закрепляется на внутренней стенке аквариума.

Для снабжения микроводоросли необходимым количеством углекислого газа использовался аквариумный компрессор М-102, подающий 2,5 л/м воздуха. Трубка диаметром 5 мм соединяет компрессор с разделителем, от которого расходятся еще три аналогичные трубки с распылителями на конце. Разделитель снабжен вентилями для регулировки подачи воздуха. Компрессор и система трубок представлены на рисунке 2.3.

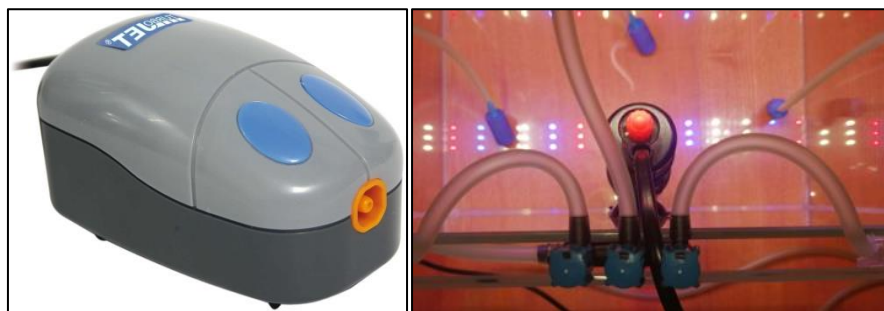


Рисунок 2.3 – Система аэрации

Для создания оптимального светового режима применялся аквариумный осветитель LED-1088 Aquarium light.

Внешний вид лампы и спектральные характеристики двух режимов работы представлены на рисунке 2.4. Данная лампа работает в двух режимах: ночном, рисунок 2.4. слева, и дневной, рисунок 2.4. справа. Дневной режим работы соответствует спектру поглощения микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

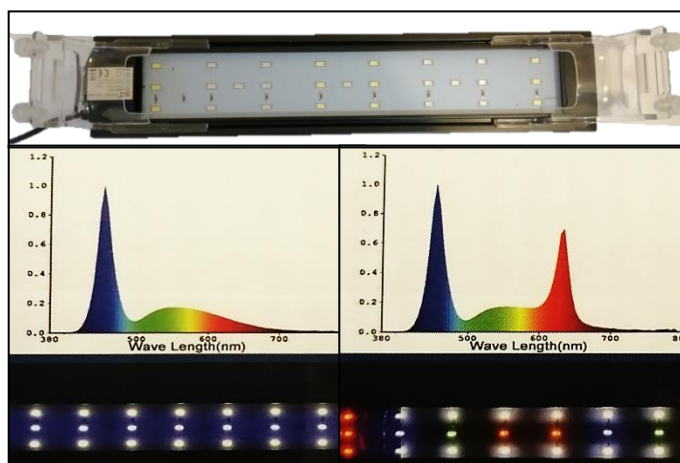


Рисунок 2.4 – лампа LED-1088 Aquarium light

Освещение подается сбоку, для равномерного освещения всего объема суспензии. Кроме того, такое расположение лампы не препятствует распространению ЭМИ, подаваемого сверху.

Внешний вид полученной установки представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Экспериментальная установка

Источник электромагнитного излучения миллиметрового диапазона

В качестве источника электромагнитного излучения использовался высокочастотный генератор Г4-141 (производства «Исток», г. Фрязино Московской области, СССР), рисунок 2.6. Данный генератор предназначен для настройки радиооборудования работающего в миллиметровом диапазоне. Питание: 220 В, 50 Гц; либо 115 В, 400 Гц. Потребляемая мощность 60 В*А. Габаритные размеры 360X190X355 мм, масса 13,5 кг.



Рисунок 2.6 – Генератор Г4-141

Генератор Г4-141 работает в диапазоне частот 37,5-53,57 ГГц (длина волны 7,99 – 5,6 мм) с погрешностью установки частоты в 1%.

Также обладает следующими характеристиками:

- Нестабильность частоты за 15 мин 15 МГц;
- Паразитная девиация частоты в режиме НГ 6 МГц;
- Плавная расстройка частоты не менее 100 МГц;
- Выходная мощность не менее $4 \cdot 10^{-3}$ Вт;
- Пределы регулировки выходной мощности 0 - 30 дБ;

- Плотность потока мощности $0,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/м² на расстоянии 0,1 м;
- Акустические шумы 60 дБ (на расстоянии 1 м).

Генератор обеспечивает сохранение рабочих значений в течении 8 часов непрерывной работы. Время прогрева прибора после включения 30 минут. Время перестройки при переключении частот 15 минут.

Прибор работает в трех режимах генерации:

- Режим непрерывной генерации сигнала;
- Режим внутренней модуляции прямоугольными симметричными импульсами с частотой следования 1 кГц и скважностью 2;
- Внешняя перестройка сигнала;
- Генерируемый сигнал подается по волноводному каналу. Волновод представляет собой трубку прямоугольного сечения из латуни с размером внутреннего сечения 5.2*2.6 мм. Такой размер сечения обусловлен испускаемым диапазоном частот. Открытый конец волновода оснащен фланцевым соединением для состыковки с прочим оборудованием. Внешний вид волновода и фланцевого соединения представлены на рисунке 2.7.

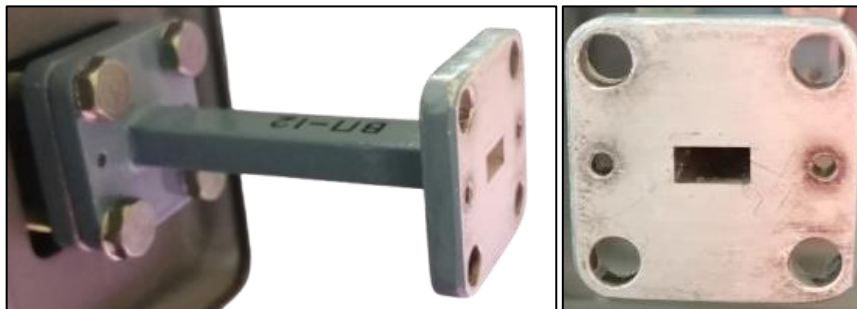


Рисунок 2.7 – Выход волновода

Для облучения исследуемых объектов нам была необходима рупорная антенна. В качестве антенны использовались волновод длиной 14.2 см., угловой волновод с углом поворота 90° и медный рупор. Антенна в сборе представлена на рисунке 2.8. Соединения элементов осуществлено за счет металлических струбцин и болтов с гайками, идущих в комплекте с генератором.



Рисунок 2.8 – Рупорная антенна

Размеры рупора:

- Внутренний размер волноводов = 2.6×5.2 мм.
- Размеры раскрыва рупора = 12.5×22 мм.
- Длина рупора $R = 35$ мм.

Данная конструкция обладает следующими заданными характеристиками:

- Центральная частота f 44 ГГц
- Длина волны в свободном пространстве $\lambda = 7$ мм
- Усиление антенны: 15.3 dBi
- Входное сопротивление: 50 Ω
- Полоса пропускания волновода $\Delta F = 36,667\text{-}55,000$ ГГц
- Длина волны в волноводе λ_g : 9 мм.

Такая конструкция и заданные характеристики позволят облучать исследуемый объект сверху в созданной нами установке.

При проведении экспериментов не применялись защитные экраны, и другие способы устранения фоновых электромагнитных полей. Так как применение подобного оборудования снизило бы значения электромагнитного излучения естественного происхождения [87], что могло бы привести к появлению других эффектов и затруднить интерпретацию результатов.

Раскрыв рупора зафиксирован на расстоянии 25 см над поверхностью суспензии водоросли и на расстоянии 35 см от дна кювет. Расстояние было выбрано исходя из конфигураций антенны и частот таким образом, чтобы изучаемый объект находился в дальней зоне излучения, что обеспечивает однородность удельного поглощения мощности излучения и снижает влияние

объектов на источник излучения. Дальняя зона излучения рассчитывалась по формуле 2.1:

$$R \geq 2D^2 / \lambda \quad (2.1)$$

Где R – начало дальней зоны излучения; D – максимальный размер апертуры; λ – длина волны излучения.

Для заданных параметров при частоте 37.5 ГГц начинается на расстоянии 12.11 см, для частоты 53.57 соответствует 17.29 см. Расстояние 25 см было взято на перспективу дальнейших исследований из расчета, что на частоте 78 ГГц дальняя зона начинается на расстоянии 25.2 см.

Плотность потока энергии во всех экспериментах составляла 11,69 мкВт/см².

Размер облучаемой области на расстоянии 35 см при заданных параметрах составляет 17.08*10.2 см. Кюветы располагались таким образом, что 70% суспензии находились в области покрытия излучения. При этом во время экспериментов происходило постоянное перемешивание суспензии потоком воздуха от аэратора, поэтому можно считать, что излучение равномерно воздействовало на весь объем суспензии.

В радиусе 1 метра от кювет других электрических приборов не было, кроме источника излучения, лампы и нагревателя.

Контрольные эксперименты проводились в тех же условиях, что и рабочие, а именно в том же месте, при тех же условиях работы приборов, за исключением генератора, который находился в выключенном состоянии во время контрольных экспериментов.

Подготовка культуры микроводоросли

В качестве исходной культуры использовалась суспензия, состоящая из микроводоросли *Chlorella vulgaris* и водной среды. Данная культура хранится при температуре 5-25°C в темноте.

Перед проведением экспериментов проба подготавливалась следующим образом. К 100 мл 50% среды Тамия, приготовленной на дистиллированной воде, добавлялось 0,5 мл суспензии микроводоросли.

Данная смесь культивировалась в нормальных условиях, то есть при комнатной температуре, естественном освещении, без дополнительной аэрации, в течение 7 дней. Подобная подготовка применялась для инициации процессов размножения у микроводоросли.

После культивирования полученная среда использовалась для проведения серии опытов. Хранение готовой суспензии осуществлялось в нормальных условиях без попадания прямых солнечных лучей.

Для проведения эксперимента на дистиллированной воде приготавливалось 1.2 литра 50% среды Тамия, в которую вносилось 6 мл культуры водоросли *Chlorella vulgaris*. Полученный раствор делился на 4 равные части по 300 мл. Одна часть отбиралась сразу, как контрольный образец, оставшиеся 3 части разливались по лабораторным стаканам и помещались в экспериментальную установку для проведения опыта.

Модель экспериментов

Три стакана с суспензией хлореллы помещались в аквариум, в котором поддерживалась заданная температура 30 ± 1 °С. Температура суспензии на начало эксперимента равняется 20 °С. К каждому из стаканов подводилась трубка подачи воздуха, а также освещение, создаваемое одной лампой для всех стаканов. Излучающая антенна располагалась без преград на высоте 14 см над стаканами и 25 см над поверхностью суспензии.

В описанных условиях было проведено две серии экспериментов. Первая серия была направлена на выявление действующей частоты облучения в диапазоне 38-53 ГГц. Вторая на установление оптимальной длительности воздействия для наращивания биомассы.

Модель эксперименты №1.1. Поиск резонансных частот в диапазоне 37,5-53,53 ГГц

Для эксперимента подготавливалось 1,2 литра 50% среды Тамия на дистиллированной воде, в которую добавляли 6 мл маточной культуры *Chlorella vulgaris*, оптическая плотность которой составляла $D=0,378$ при длине волны 560 нм. Полученную маточную суспензию делили на 4 части по 300 мл. Первую часть

сразу отбирали для анализа в качестве контрольного образца. Оставшиеся три части культивировали в течение 24 часов. Первые 8 часов культивирования суспензия подвергалась воздействию ЭМИ КВЧ.

Эксперименты проводились с тремя параллельно идущими повторами. Один контрольный эксперимент по культивированию без воздействия проводился с пятью повторами. Всего проведено 17 экспериментов. По одному эксперименту для каждой частоты в диапазоне 38 - 53 ГГц с шагом 1 ГГц и контрольный эксперимент без облучения согласно таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Количество экспериментов и повторов опытов

№ экс-та	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ф ГГц	0	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
Кол-во повторов	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Модель эксперимента №1.2. Выявление оптимального времени воздействия ЭМИ КВЧ

Пробы культивировали 24 час, облучая ЭМИ КВЧ 40ГГц от 0 до 480 мин. в начале культивирования.

Было проведено 2 контрольных эксперимента, в которых культура выращивалась без воздействия ЭМИ КВЧ и 9 экспериментов с различным временем экспозиции: 5, 10, 15, 30, 45, 60, 120, 240, 480 минут. Все эксперименты проводились в трех повторах.

Таблица 2.2 – Количество экспериментов и повторов опытов

№ экс-та	1*	2*	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длительность облучения, мин	0	0	5	10	15	30	45	60	120	240	480
Кол-во повторов	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

*Эксперименты № 1 и 2 проводились, как контрольные, без воздействия.

Отбор и хранение отобранных проб

После завершения опыта все составляющие установки отключались. Стаканы с суспензией изымались из аквариума. Затем суспензию откачивали из стакана шприцом 60 мл (рисунок 2.9.).



Рисунок 2.9 – Сбор суспензии

С помощью шприца суспензию пропускали через мембранный фильтр Владипор типа МФАС-ОС-2С (Рисунок 2.10.). Диаметр мембраны 47 мм, средний размер пор 0,45 мкм.



Рисунок 2.10 – Мембраны Владипор

Фильтродержатель 47 мм, ПП, GVS (Рисунок 2.11.) использовался для фиксации мембраны при прокачке суспензии.



Рисунок 2.11 – Фильтродержатель GVS, 47 мм с отфильтрованным фильтром

В процессе фильтрации вся биомасса оседала на фильтре. После прокачки фильтр складывали пополам с биомассой внутрь и подсушивались на бумажном фильтре в течение 1-2 минут для удаления лишней влаги. Затем фильтр складывался пополам второй раз и помещался в зип-лок пакет. На пакете предварительно указывались номер пробы и эксперимента.

В таком виде пробы могут храниться при комнатной температуре не более трех суток. В случае, если необходимо хранить пробы дольше, они замораживались в морозильной камере при температуре -18°C . В условиях лабораторных исследований отобранные пробы анализировались в течение 1 часа после сбора, либо замораживались и анализировались позднее.

Методика определения концентрации биомассы.

Полученные в экспериментах образцы анализировались по «методике спектрофотометрического определения хлорофилла а» ГОСТ 17.1.4.02 – 90 [130].

Методика основана на спектрофотометрировании ацетонового экстракта проб. С помощью методики определяли концентрацию биомассы водоросли ($\langle\Delta V\rangle$), содержание хлорофилла “а” (С а), “b” (С b), “c1+c2” (С c1+c2), каротиноидов (С k).

Для анализа использовался спектрофотометр ПЭ-5400УФ (ООО «Экохим», г. Санкт-Петербург, Россия).



Рисунок 2.12 – Спектрофотометр ПЭ-5400УФ

Анализ экстрактов проводился на длинах волн 480, 630, 647, 663, 750 нм в соответствии с методикой [130].

Ход проведения анализа:

- Подготовленные фильтры помещают в пробирки и заливают 10 мл. 90% ацетона, взбалтывают;
- выдерживаются в темноте 1 час;
- Центрифугируются на 6000 оборотах/мин в течение 15 минут;
- Полученный экстракт переливается в пробирки 10мл и отправляются на измерение;
- Измерение проводится на спектрофотометре ПЭ-5400УФ, экстракты переливаются в кюветы 10 мм. Измерение проходит с 1 холостой кюветой и 3 кюветами с экстрактом.

Полученные значения оптической плотности записываются в таблицу 2.3. Дальнейший расчет концентрации биомассы и пигментов производится в Excel.

Таблица 2.3 – Показания спектрофотометра

№	Дата Эксп-а.	Дата Анализа	Описание	V _{проб} мл	V _{экстр} мл	D ₄₈₀	D ₆₃₀	D ₆₄₇	D ₆₆₃	D ₇₅₀
1			0		10					
2			1		10					
3			2		10					
4			3		10					

Расчет концентрации биомассы

Значение оптической плотности при длине волны $\lambda = 750$ нм - D_{750} используется для устранения погрешности.

Концентрация хлорофилла а - C_a (мкг/дм³) вычисляется по формуле 2.2:

$$C_a = \frac{(11,85*(D_{664}-D_{750})-1,54*(D_{647}-D_{750})-0,08(D_{630}-D_{750}))V_3}{V_{\Pi}} \quad (2.2)$$

Где, C_a – Концентрация хлорофилла а мкг/дм³;

D_x – оптические плотности экстракта в белых на длине волны X нм;

V_n – объем пропущенной через фильтр пробы, л;

$V_э$ – объем ацетонового экстракта, мл;

l – длина кюветы, см.

Концентрация хлорофилла b – C_b ($мкг/Дм^3$) вычисляется по формуле 2.3:

$$C_b = \frac{(-5.43*(D_{664}-D_{750})+21.03*(D_{647}-D_{750})-2.66(D_{630}-D_{750}))V_э}{V_n*l} \quad (2.3)$$

Концентрация хлорофилла c1 и c2 - C_{c1+c2} ($мкг/Дм^3$) вычисляется по формуле 2.4:

$$C_{c1+c2} = \frac{(-1,67*(D_{664}-D_{750})-7,6*(D_{647}-D_{750})+24,52(D_{630}-D_{750}))V_э}{V_n*l} \quad (2.4)$$

Концентрация каротиноидов – C_k ($мкг/Дм^3$) вычисляется по формуле 2.5:

$$C_k = \frac{4(D_{480}-D_{750})V_э}{V_n*l} \quad (2.5)$$

Концентрация биомассы водоросли B ($г/м^3$) вычисляется по формуле 2.6:

$$B = \frac{302,6*c_a^{1,26}}{1000} \quad (2.6)$$

Обработка данных спектрофотометрии

По значениям от трех повторов экспериментов рассчитывалась средняя концентрация биомассы. По среднему значению относительно исходного значения на начало эксперимента рассчитывался прирост биомассы за сутки. Полученный прирост биомассы в эксперименте сравнивался со значением в контрольных экспериментах.

Обработка данных и расчеты производились в программе MS Excel с заполнением таблиц и построением графиков экспериментов.

2.4. Материалы и методы изучения утилизации соединений азота хлореллой

Подготовка культуры водоросли к эксперименту

Подготовка маточной культуры микроводоросли *Chlorella vulgaris* Beyer. проходила в течение 7 дней. Водоросль выращивалась на среде Тамия. Во все исследуемые пробы на 200 мл исследуемой воды добавлялось 10 мл маточной культуры микроводоросли. Все пробы находились в колбах с узким горлышком, закрытым алюминиевой фольгой в ходе экспериментов.

Для контроля количества биомассы водоросли измерялась оптическая плотность проб воды с добавленной суспензией перед началом эксперимента. Среднее значение оптической плотности для всех проб составило $0,022 \pm 0,003$.

Характеристика источника загрязненных сточных вод

Работа проводилась на образцах сточных вод, поступающих с предприятия АО "Карельский окатыш", расположенного в г. Костомукша (Республика Карелия, Россия). Предприятие занимается добычей и переработкой железной руды и производит 20 % всех железорудных окатышей в России. Всего было отобрано два образца воды из отстойника карьера и один образец из отстойника хвостохранилища.

Данное предприятие занимается добычей и переработкой железной руды, и его доля составляет 20% всех железорудных окатышей в России. Предприятие оказывает техногенное воздействие на озерно-речные системы Карелии. Так, в качестве хвостохранилища для захоронения хвостов и оборотного водоснабжения комбината используется озеро Костомукшское, из которого с 1994 г. осуществляется регулируемый сброс воды в систему реки Кенти. Деятельность ГОК привела к изменению химического состава воды в озерно-речной системе. Произошло увеличение концентрации частности NO_3^- , а также K^+ , SO_4^{2-} , Li, Ni [1, 2].

На производстве нет эффективной системы очистки техногенных сточных вод от азотсодержащих соединений, поэтому требуется разработка технологий очистки сточных вод от неорганического азота.

Для исследования были отобраны образцы воды из отстойника карьера. Пробы воды отбирались после отстаивания взвеси в воде. Ниже 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.

Проба воды №3 изучалась в исходном виде и после разбавления в 2 и 4 раза, для оценки возможности очистки при разной степени загрязнения. Разбавление проб осуществлялось дистиллированной водой в указанных пропорциях. Исходная концентрация загрязняющих веществ определялась перед началом серии экспериментов. Внесение суспензии микроводоросли производилось непосредственно перед началом эксперимента, после разбавления и подготовки проб воды.

Контроль условий эксперимента

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

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

В ходе экспериментов пробы воды разделялись на три группы, различающиеся по условиям культивирования водоросли в процессе эксперимента:

- условия, приближенные к неблагоприятным в зимний период: температура 7 °С в холодильнике без аэрации и освещения;
- промежуточные условия, имитирующие летний период в естественных условиях: 17 °С, без аэрации с освещением работающем в лаборатории по рабочему графику 9/15 часов;

- оптимальный для вида условия культивирования: 26 °С, с аэрацией и освещением.

Всего было проведено 9 вариантов экспериментов, согласно таблице 2.4. Все варианты проводились параллельно.

Таблица 2.4 – Варианты проведенных экспериментов №2.1.

Температура	Обозначение пробы				
	3	3/2	³ / ₄	4	1
7 °С	3.7	3/2.7	-	-	-
17 °С	3	3/2	³ / ₄	4	1
26 °С	3.26	3/2.26	-	-	-

Продолжительность экспериментов составила 9 суток. В ходе всего периода ежедневно измерялась концентрация аммония, нитратов и биомассы водоросли. Измерение нитритов проводилось на старте экспериментов и после 4 и 8 суток. Все эксперименты были запущены в одно время и шли параллельно. Для экспериментов отбирались пробы в объеме 200 мл с добавлением 10 мл суспензии микроводоросли. Все пробы находились в колбах с узким горлышком. Горлышко в ходе экспериментов было закрыто алюминиевой фольгой.

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

Общая модель эксперимента соответствовала эксперименту №2.1. Рассматривались пробы № 3 и №3/2. Условия культивирования были аналогичны предыдущей серии экспериментов и добавлен вариант эксперимента при температуре 1 °С. Дополнительная вариация эксперимента при более низкой температуре проводилась для оценки потенциала водоросли к очистке и выживаемости в самых суровых условиях.

Общее количество проведенных экспериментов 8, в соответствии с таблицей 2.5

Таблица 2.5 – 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 серий экспериментов №2.2. от №2.1. является подготовка культуры перед началом экспериментов. Если серия №2.1. проводилась с водорослью, выращенной на классической среде Тамия. То для серии №2.2. использовалась модифицированная среда без источников азота, чтобы добиться дефицита азота водоросли для лучшей утилизации загрязняющих веществ. Состав среды культивирования представлен в таблице 2.6:

Таблица 2.6 – Среда культивирования без источников азота

№ п/п	Компонент: Component:	Навеска г/100мл Suspension g/100ml	V раствора на 1 Дм ³ среды мл: V solution per 1 Dm ³ of medium ml:
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. Подбор оптимальной концентрации водоросли для удаления азота

В рамках эксперимента было поставлено 4 параллельно идущих опыта длительностью 13 суток. Процесс подготовки и проведения эксперимента был схож с экспериментом №2.1. с той разницей, что после подготовки культуры водоросль высушивалась, а в образцы воды вносилась сухая навеска водоросли в концентрации: 0; 0,5; 1; 2 г/л. Все опыты проводились с образцом воды 3 – отстойник карьера №1.

Эксперименты проводились с целью выявить возможность использования сухой навески водоросли для очистки и оценить оптимальную концентрацию водоросли для проведения процесса очистки.

Модель эксперимента №2.4. Облучение водоросли с последующей очисткой вод

Целью эксперимента №2.4. является установление возможности использовать ЭМИ КВЧ для повышения эффективности удаления азота водорослью *Chlorella vulgaris*.

В рамках эксперимента было проведено 8 вариантов опытов, согласно таблице 2.7. в 4 вариантах культивирование происходило при температуре 17 °С, без аэрации и освещения – пробы 1, 3, 5, 7. Остальные 4 варианта эксперимента проводились с температурой 26 °С, постоянными аэрацией и освещением – пробы 2, 4, 6, 8.

Таблица 2.7 – Варианты проведения экспериментов №2.4.

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

Для вариантов опытов 1-4 подготовка водоросли проводилась на среде Тамия. В опытах 5-8 подготовка проводилась на безазотной среде. Состав среды приведен таблице 2.6.

Перед началом культивирования после внесения 10мл культуры водоросли на 200мл воды № 3 (отстойник карьера №1) пробы 1, 2, 5, 6 подвергались облучению ЭМИ КВЧ 40ГГц. Продолжительность облучения составляла 2 часа. Процесс облучения соответствует проводимым ранее экспериментам из раздела «2.3. Материалы и методы изучения действия ЭМИ КВЧ на *Chlorella vulgaris*». Пробы 3, 4, 7, 8 в это время находились вне зоны воздействия излучения и считаются контрольными. После облучения начинался процесс культивирования в соответствующих для пробы условиях.

Продолжительность экспериментов составляла 14 суток.

Оборудование для проведения анализа

Оценка концентрации биомассы водоросли и определения нитритов в воде проводилась калориметрическим методом. Для оценки использовались кюветы 10 мм и фотоэлектрический концентрационный колориметр модели КФК-2 (Россия, г. Сергиев Посад, АО «ЗОМЗ») рисунок 2.13:

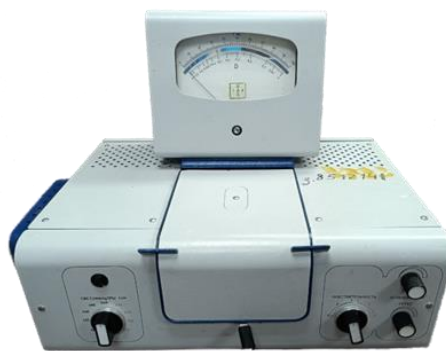


Рисунок 2.13 – колориметр КФК-2

Оценка концентрации нитратов и аммония проводилась ионоселективным методом с использованием иономера модели Мультитест ИПЛ-112 (Россия, г. Новосибирск, ООО НПП "СЕМИКО") рисунок 2.14., электрода сравнения ЭСр-10103/3.0. Концентрация аммония определялась с помощью электрода ЭЛИТ-051, концентрация нитратов с помощью электрода ЭЛИТ-021. Перед началом серии экспериментов электрод был откалиброван. Электроды представлены на рисунке 2.15.



Рисунок 2.14 – иономер Мультитест ИПЛ-112



Рисунок 2.15 – Измерительные электроды: а) электрода ЭЛИТ-021; б) электрода сравнения ЭСр-10103/3.0

Методики определения загрязняющих веществ и концентрации биомассы водоросли

Определение концентрации водоросли

Концентрация биомассы микроводоросли проводилась колориметрическим методом. Измерения оптической плотности проводились на колориметре модели КФК-2 с кюветой на 10 мм. Предварительно спектрофотометрическим методом ГОСТ 17.1.4.02-90 «Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М., 1999» определялась концентрация биомассы водоросли. На основе показателей концентрации и оптической плотности проб на длине волны 540 нм строился калибровочный график рисунок 2.16. на основе линейного уравнения (формула 2.7), с помощью которого в дальнейшем определялась концентрация биомассы микроводоросли

$$y = 0,4628x + 0,001; R^2 = 0,9999, \quad (2.7)$$

Где y – оптическая плотность пробы D в кювете 10 мм при длине волны 540 нм, x – концентрация биомассы водоросли в пробе B , г/м³, R^2 – коэффициент детерминации.

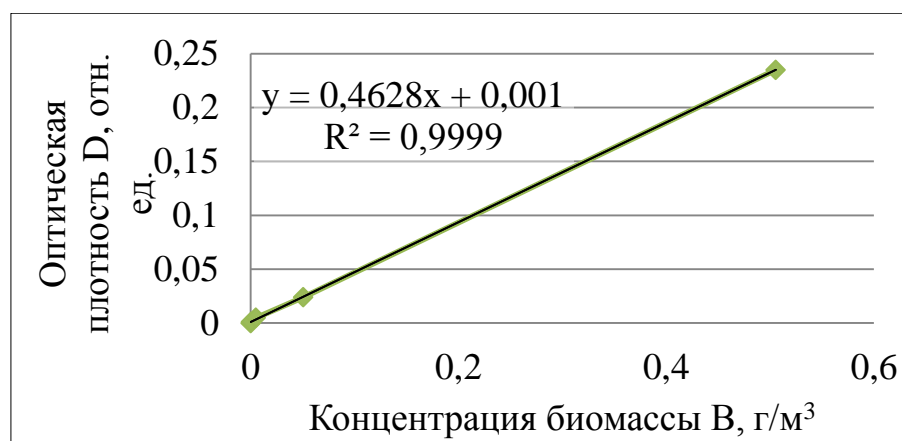


Рисунок 2.16 – Калибровочный график отношения оптической плотности раствора D, к концентрации биомассы B

Определение концентрации азота

Для оценки концентрации аммония и нитратов в воде использовались ионоселективные методы.

Концентрация аммония определялась по методике РД 52.24.394-95 с помощью электрода ЭЛИТ-051, концентрация нитратов – по методике РД 52.24.367-95 с помощью электрода ЭЛИТ-021. Перед началом серии экспериментов электрод был откалиброван.

Ход проведения анализа на аммоний и нитраты:

- включить иономер, подключить ионоселективные электроды и электрод сравнения, открыть заглушку на электроде сравнения, перевести иономер в режим измерения;
- поместить один из электродов и электрон сравнения в изучаемый раствор, выдержать 2 минуты и снять показания;
- промыть электроды дистиллированной водой, поместить в следующий анализируемый раствор;
- После окончания измерений переключить второй канал, переключить электрод сравнения;
- Провести измерения по следующему веществу, как описано выше;
- После окончания анализа промыть электроды дистиллированной водой, закрыть заглушку электрода сравнения, отключить иономер.

При регулярном проведении анализов электрод сравнения хранится погруженный в дистиллированную воду, ионоселективные электроды хранятся в 10^{-3} моль/дм³ KNO₃ (NaNO₃) или NH₄Cl соответственно каждому электроду.

Концентрацию нитритов в воде рассчитывали колориметрическим методом ПНД Ф 14.1:2:43-95 на колориметре модели КФК-2 с кюветой на 20 мм. Перед началом экспериментов был построен калибровочный график рисунок 2.17. для определения концентрации нитритов (уравнение 2.8):

$$y = 1,9517x; R^2 = 0,998 \quad (2.8)$$

где, y – оптическая плотность пробы D в кювете 20 мм при длине волны 520 нм, x – концентрация нитритов в пробе, мг/л, R^2 – коэффициент детерминации.

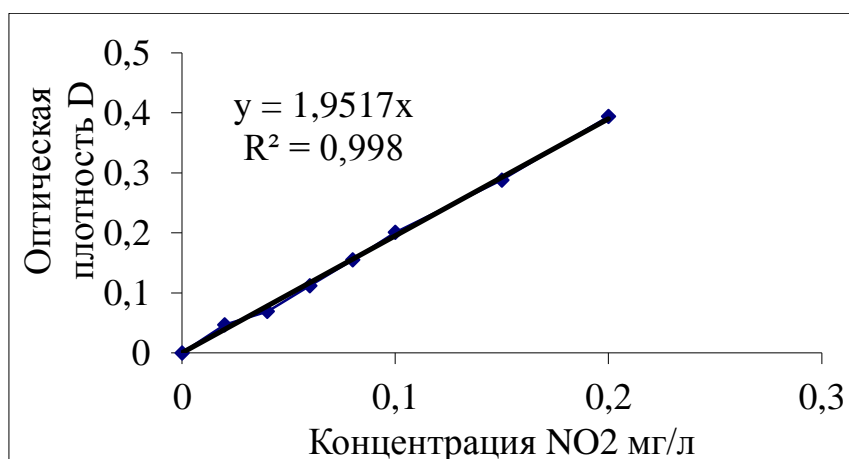


Рисунок 2.17 – Калибровочный график отношения оптической плотности раствора D , к концентрации нитритов мг/л

Подготовка калибровочного графика:

- Через фильтр белая лента профильтровываем 10 г. реактива Грисса 100 мл 12% уксусной кислоты. После фильтрации раствор хранится в холодильнике;
- Для калибровки понадобится два раствора:
 1. Основной: 0,1 мг/мл NO₂;
 2. Рабочий: 0,001 мг/мл NO₂;

- Основной раствор NO_2 : 0,150 г. NaNO_2 , высушенный при 105 °С, на 1 л дистиллированной воды;
- Готовим 8 колб 50мл для калибровочных растворов. В каждую колбу вносится рабочий раствор в соответствии с таблицей 2.8. Доводим до отметки 50мл дистиллированной водой, добавляем 2мл реактива Грисса.

Таблица 2.8 – Калибровочные растворы

№ р-ра	Концентрация NO_2 мг/л	Кол-во рабочего р-ра мл
1	0	0
2	0,02	1
3	0,04	2
4	0,06	3
5	0,08	4
6	0,1	5
7	0,15	7,5
8	0,2	10

- Закрываем колбы пробкой, перемешиваем, оставляем на 40 минут для проявления розового окраса;
- Измерения проводим на колориметре на $\lambda=540$ нм с кюветой 20мм.

Статистическая обработка данных

Для статистической обработки результатов экспериментов применены стандартные алгоритмы вариационного и регрессионного анализа, включенные в пакет MS Excel.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭМИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА МИКРОВОДОРОСЛЬ CHLORELLA VULGARIS

3.1. Поиск резонансных частот в диапазоне 37,5-53,53 ГГц

При подготовке раздела были использованы ранее опубликованные материалы статей автора диссертации [131].

Полученные в результате обработки данные представлены в виде сводных графиков (Рисунок 3.1-3.5). Черными горизонтальными линиями на графике показан доверительный интервал для контрольного значения, рассчитанный по пяти повторам эксперимента.

На рисунке 3.1. представлены экспериментальные данные изменения биомассы водоросли после культивирования в течение суток. По результатам экспериментов концентрация биомассы водоросли в контрольных экспериментах без воздействия возросла в 2,99; 5,41; 6,19; 2,88; 4,34 раз после 24 часового культивирования. Среднее значение составило 4,36. Т коэффициент Стьюдента составляет 2,13, относительная погрешность составила 31,89%, абсолютная погрешность $\pm 1,39$. Доверительный интервал для контрольного значения изменения биомассы водоросли составил $4,36 \pm 1,39$. Значения, лежащие в интервале 2,97 - 5,75, считались в пределах контрольных.

По экспериментальным данным было зафиксировано увеличение содержания биомассы водоросли в 2.37 раза после 24 часового культивирования с 8 часовым облучением по сравнению с контролем. Эффект зафиксирован при воздействии излучением с частотой 40 ГГц. Для частот 38, 39, 41, 43, 47, 50 ГГц не отмечено никакого эффекта. На частотах 42, 44, 45, 46, 48, 49, 51, 52, 53 ГГц наблюдается снижение биомассы относительно контроля.

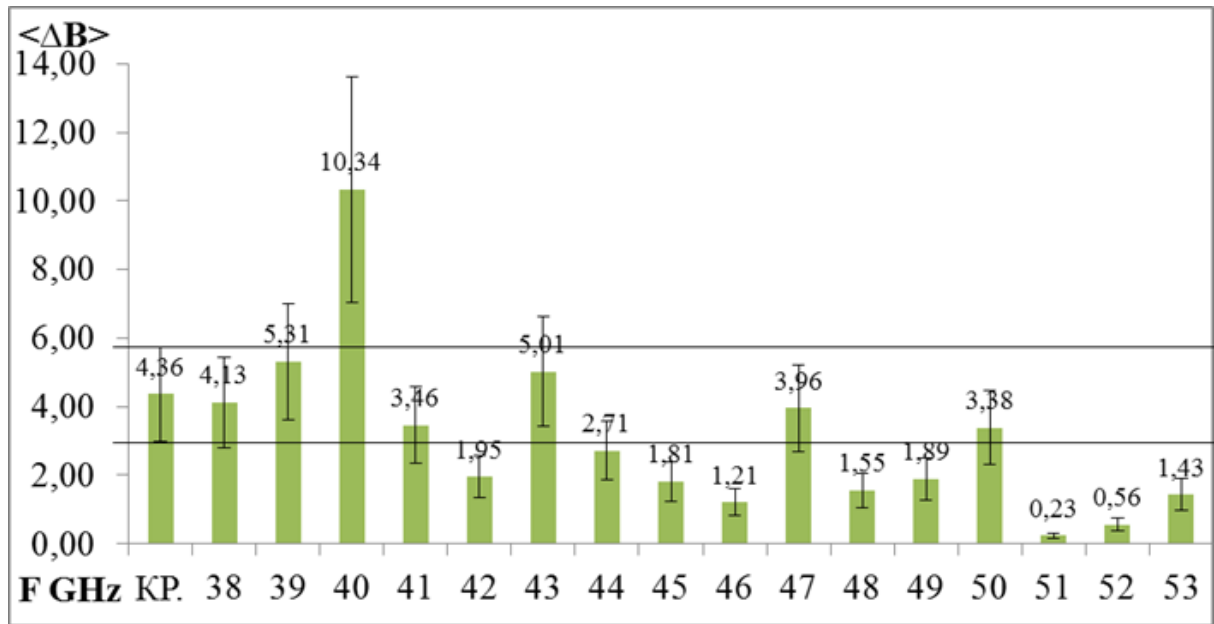


Рисунок 3.1 – Изменение концентрации биомассы *Chlorella vulgaris* под воздействие ЭМИ 38-53 ГГц

На рисунке 3.2. представлен график, показывающий результаты экспериментальных данных по содержанию хлорофилла “а” в биомассе микроводоросли.

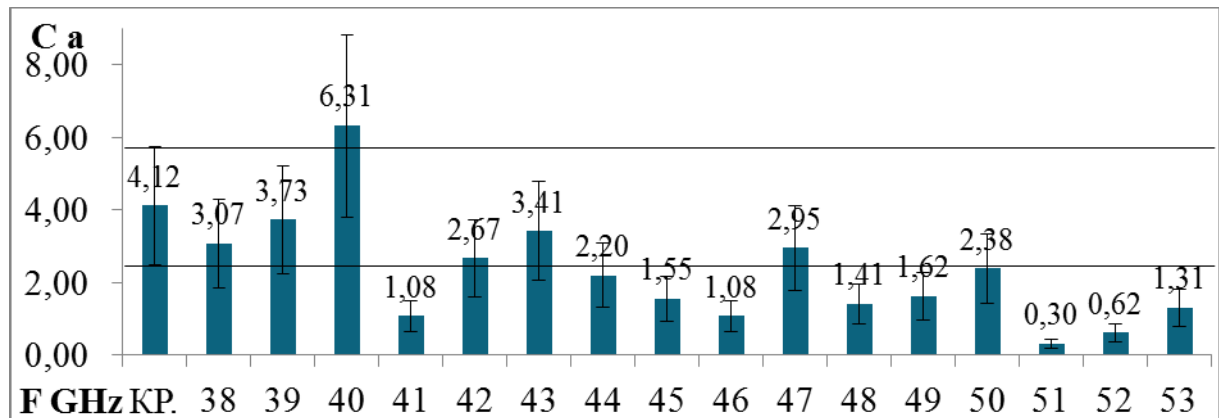


Рисунок 3.2 – Изменение содержания хлорофилла “а” *Chlorella vulgaris* под воздействие ЭМИ 38-53 ГГц

Контрольное значение без воздействия составило $4,12 \pm 1,64$. Доверительный интервал: 2,48 - 5,76. Для частот 38, 39, 42, 43, 47 ГГц результаты в пределах контрольных значений. При частоте 40 ГГц показатели превышают контрольное значение, что свидетельствует о стимулировании образования хлорофилла “а” в

водоросли. При частотах 41, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53 ГГц результаты ниже контрольных значений.

На рисунке 3.3. демонстрируется изменение хлорофилла “b” от частоты. Контрольное значение составило $3,86 \pm 1,81$, доверительный интервал 2,05 - 5,67. При воздействии частот 39, 41, 46, 48, 50, 51, 52, 53 отмечено снижение концентрации относительно контрольных значений. При воздействии остальных частот в изучаемом диапазоне значения концентрации хлорофилла “b” находятся в пределах контрольных значений. Стимулирующего эффекта обнаружено не было.

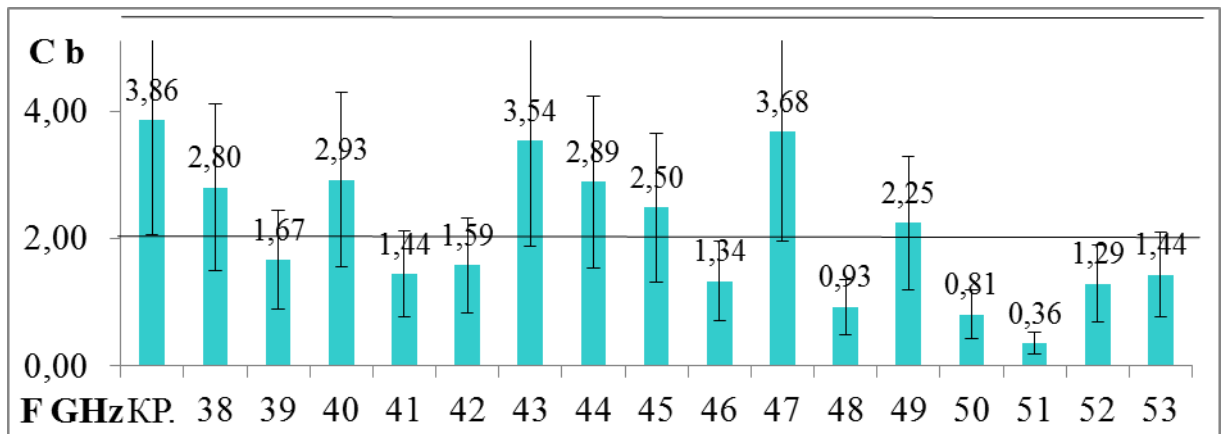


Рисунок 3.3 – Изменение содержания хлорофилла “b” *Chlorella vulgaris* под воздействие ЭМИ 38-53 ГГц

На рисунке 3.4. демонстрируется изменение хлорофиллов “c1” и “c2” при воздействии частот. Контрольное значение составило $2,88 \pm 2,16$, доверительный интервал 0,72-5,02. При воздействии частот 51, 52 отмечено снижение концентрации относительно контрольных значений. При воздействии остальных частот в изучаемом диапазоне значения концентрации хлорофилла “c1” и “c2” находятся в рамках контрольных значений. Стимулирующего эффекта также обнаружено не было.

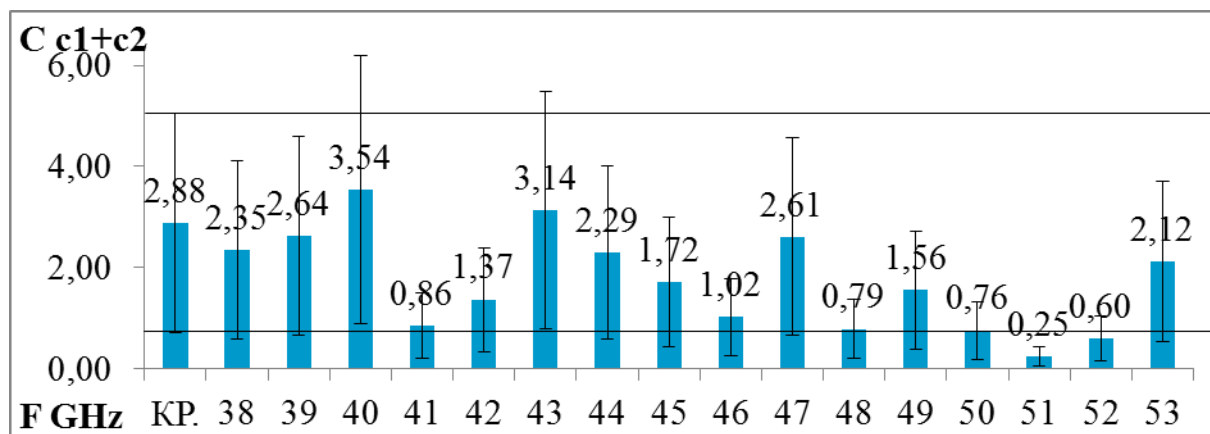


Рисунок 3.4 – Изменение содержания хлорофилла “с1+с2” *Chlorella vulgaris* под воздействие ЭМИ 38-53 ГГц

На рисунке 3.5. демонстрируется содержание каротиноидов в зависимости от частоты. Контрольное значение составило $2,55 \pm 1,57$, доверительный интервал лежит в диапазон 1,98-5,12. При воздействии частот 39, 41, 42, 46, 48-53 ГГц отмечено снижение концентрации относительно контрольных значений. Другие значения концентрации каротиноидов в пределах контрольных значениях. Стимулирующего эффекта также обнаружено не было. Но стоит выделить значение при 47 ГГц - близко к верхней границе доверительного интервала.

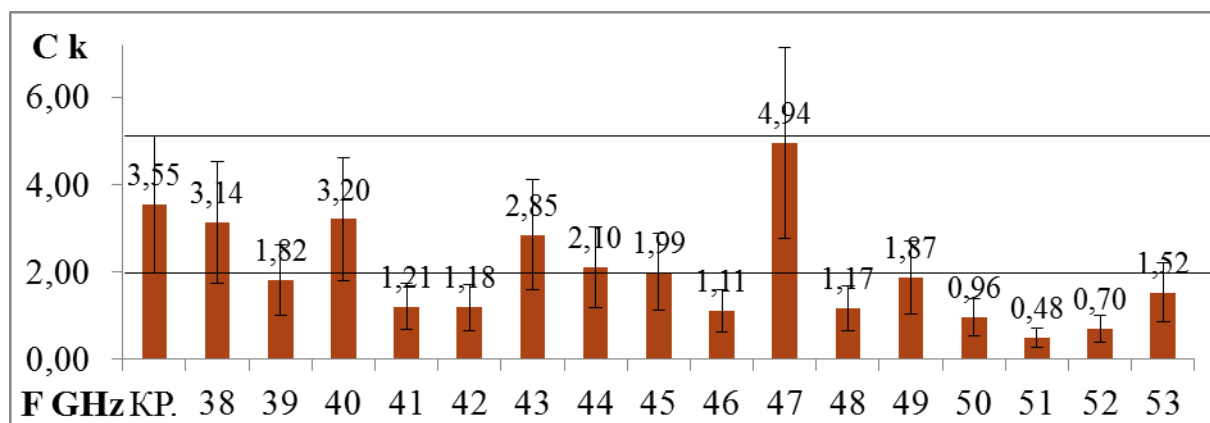


Рисунок 3.5 – Изменение содержания каротиноидов *Chlorella vulgaris* под воздействие ЭМИ 38-53 ГГц

Обсуждение полученных данных. По результатам исследования было выявлено действие ЭМИ КВЧ на микроводоросль *Chlorella vulgaris* в водной среде. В исследуемом диапазоне частот 37,5-53,53 ГГц было отмечен эффект от

частоты 40 ГГц. Концентрация биомассы водоросли увеличилась в 10,34 раз за сутки. Показатель превышает контрольное значение 2,37 раз.

Что касается других частот рассматриваемого диапазона, результаты не выявили воздействия. Вывод основан на том, что количество биомассы попадало в пределы контрольных значений, либо было ниже контрольных, но близко к нижней границе доверительного интервала.

Обнаруженный эффект наблюдается в узком диапазоне. Что подтверждает резонансный характер воздействия, описываемый авторами работы [123]. Однако стоит отметить, что шаг в 1 ГГц, применённый в работе, велик. Существует вероятность изменения картины при проведении исследования при более узком шаге частот.

Несмотря на то, что выделена только одна стимулирующая рост биомассы частота 40 ГГц, замечена некоторая периодичность в результатах. Через каждые 3-3.5 ГГц наблюдаются пики концентрации биомассы. Такие пики отмечены на частотах 40, 43, 47, 50, 53 ГГц.

В схожих работах Гапочки также изучалось действие электромагнитного излучение в диапазоне 37.5-53.57 ГГц. Действующие частоты: 37.5, 42.25, 46.95, 53.57 ГГц. Объектами исследования служили культуры зеленой микроводоросли *Scenedesmus quadricauda* Breb., инфузории *Spirostomum ambiguum* Ehrem., ракообразного *Daphnia magna* Straus, нефтеокисляющих бактерий *Rhodococcus erythropolis* E-15, люминесцентных бактерий *Escherichia coli* K12 TG1, почвенные сообщества, иммунокомпетентные клетки и органы человека и животных [128]. Было установлено влияние частоты 42.25 ГГц.

Результаты Гапочки расходятся с данными о стимулирующем действии на *Chlorella vulgaris* при частоте 40 ГГц. Можно сделать вывод о различном действии одних и тех же частот на разные организмы. То есть для одних организмов характерны одни стимулирующие частоты, для других другие. Вывод согласуется с результатами Гапочки, в которых наблюдаются различные эффекты одной частоты для разных организмов.

Кроме того, в работах Гапочки показано увеличение токсичности воды при воздействии частот 38.85, 41.55, 42.9 ГГц. При воздействии частоты 41.55 ГГц токсичность воды увеличивалась максимально. Хотя по нашим результатам нельзя судить о токсичности воды. Но отмечены низкие показатели биомассы и пигментов водорослей. На частоте 42 ГГц концентрация биомассы ниже контрольных значений. Что согласуется с результатами Гапочки.

Механизмы воздействия пока остаются не ясными. Сопоставление результатов работы с работами Гапочки [126, 127] показало различие частот, действующих на организмы и различие самих эффектов воздействия частот. Что согласуется с гипотезой Девяткова Н.Д. и Голанта М.Б [117-125] о мобилизующем действии миллиметрового излучения на организмы. Согласно которой, клетки организма имеют собственные частоты колебания, характерные для организма. А воздействие излучения соответствующей частоты способно мобилизовать и стимулировать.

Результаты сравнены с результатами Суховского [22]. В работе Суховского удалось ускорить рост хлореллы в 2 раза с помощью облучения электростатическим полем. По результатам нашего исследования ускорение роста составило 2.37 раза, что делает перспективным применение ЭМИ 40 ГГц для разработки методик стимулирования хлореллы.

Chlorella vulgaris успешно применяется для восстановления водоемов, а также имеются результаты [48], показывающие возможность очистки сточных вод горнодобывающих производств с помощью хлореллы. Поэтому стимулирование хлореллы для очистки вод и изучение комбинированного действия загрязнителей и электромагнитного излучения перспективное направление исследований.

Данные результаты были опубликованы в статье «Прирост биомассы *Chlorella vulgaris* при экспозиции электромагнитным излучением крайневысоких частот» [131].

3.2. Выявление оптимального времени воздействия ЭМИ КВЧ

При подготовке раздела были использованы ранее опубликованные материалы статей автора диссертации [132].

Результаты представлены в графическом виде на рисунке 3.6. По двум контрольным экспериментам с тремя повторами в каждом было рассчитано среднее значение концентрации биомассы, которое было принято за контрольное значение без воздействия и приравнено к 1.

Ось ординат показывает, во сколько раз относительно контроля изменилась концентрация биомассы за сутки – ΔB . Ось абсцисс показывает время экспозиции объекта – T , от 5 до 480 минут. На графике представлено 9 столбцов, каждый из которых отражает результаты одного из экспериментов с различным временем экспозиции. Культивирование во всех экспериментах проходило 24 часа вне зависимости от времени экспозиции.

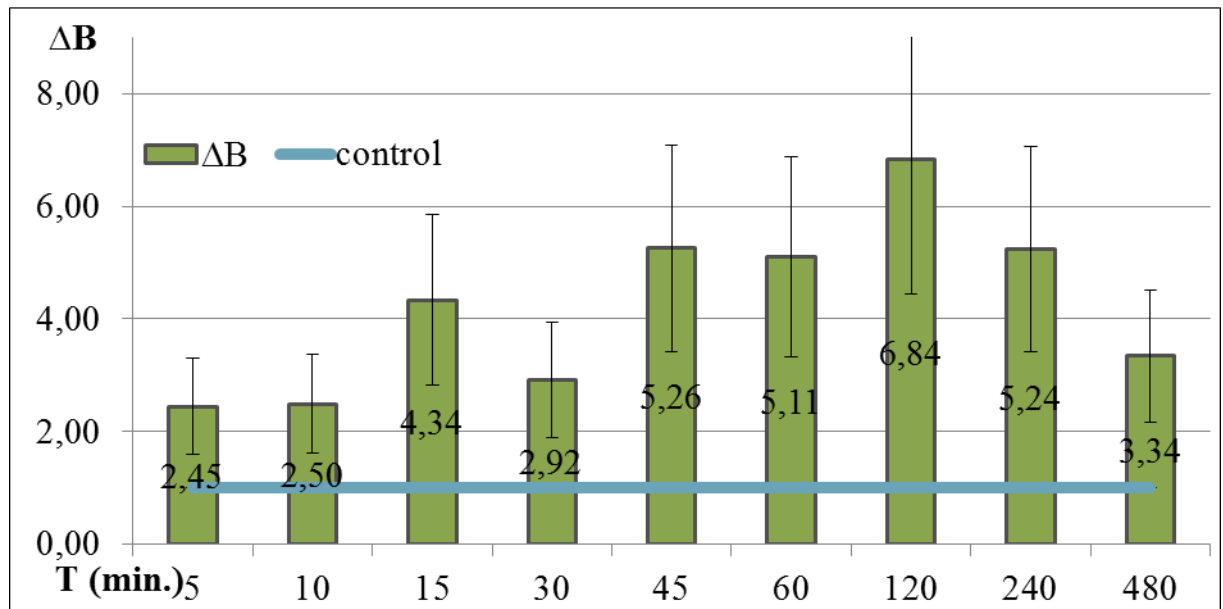


Рисунок 3.6 – Прирост концентрации биомассы *Chlorella vulgaris* после 24 часового культивирования в зависимости от времени экспозиции ЭМИ 40 ГГц, ППЭ 11.69мкВт/см²

Как видно из рисунка 3.6. в экспериментах наблюдается увеличение концентрации биомассы микроводоросли относительно контрольных значений, что подтверждает предварительно полученные результаты о стимулирующем действии ЭМИ КВЧ 40 ГГц на *Chlorella vulgaris* [131]. Результаты экспериментов, приведенные на графике, разделены на три сектора: 5-30 мин., 45-240 мин., 480 мин. В диапазоне от 5 до 30 минут наблюдается увеличение концентрации

биомассы относительно контроля. В диапазоне от 45 до 240 минут наблюдается резкое увеличение прироста биомассы с пиковым значением при времени экспозиции 120 мин. Затем прирост биомассы снижается и при 480 минутах укладывается в диапазон, наблюдаемый при 5-30 минутах.

По результатам исследования оптимальное время экспозиции ЭМИ КВЧ 40 ГГц для стимулирования роста одноклеточной микроводоросли *Chlorella vulgaris* лежит в диапазоне от 45 минут до 240 минут. Максимальный стимулирующий эффект был отмечен при времени экспозиции 120 минут (2 часа). Прирост биомассы за 24 часа выше контрольных значений в 6,84 раза при экспозиции 120 минут.

Полученные результаты важны для создания методик культивирования микроводорослей. Кроме того наличие данных о способности микроводоросли *Chlorella* к поглощению аммонийного и нитратного азота [48, 133] указывает на перспективность биологических методик очистки карьерных сточных вод от соединений неорганического азота. А данные о снижении токсичности загрязняющих веществ в стоках [126] свидетельствует о перспективности использования ЭМИ КВЧ не только для стимулирования роста микроводоросли, но и для снижения токсичности соединений азота, и, как следствие, повышения степени очистки карьерных сточных вод.

Для создания методов культивирования *Chlorella* необходимо подобрать оптимальные характеристики ЭМИ КВЧ. Описанные в статье эксперименты были проведены в режиме непрерывной генерации. В дальнейшей работе необходимо изучить действие ЭМИ КВЧ в режиме импульсной генерации и сравнить воздействие с воздействием непрерывного излучения.

Данные результаты были опубликованы в статье «Стимулирование роста *Chlorella* в зависимости от длительности воздействия электромагнитного излучения крайне высоких частот» [132].

Выводы по главе

1. По результатам исследования было выявлено действие ЭМИ КВЧ на микроводоросль *Chlorella vulgaris* в водной среде. В исследуемом диапазоне частот 37,5-53,53 ГГц был отмечен эффект от частоты 40 ГГц. Увеличение скорости роста 2,37 раза в первые сутки культивирования относительно контрольного эксперимента.

2. Оптимальное время экспозиции ЭМИ КВЧ 40 ГГц для стимулирования роста одноклеточной микроводоросли *Chlorella vulgaris* лежит в диапазоне от 45 минут до 240 минут. Оптимальная длительность облучения составила 120 минут. 120 минутное облучение водоросли перед началом культивирования позволило увеличить прирост биомассы за сутки в 6,84 раз по сравнению с контролем без облучения.

3. Облучение водоросли *Chlorella vulgaris* эффективно для увеличения скорости роста микроводоросли и может быть использовано для разработки методик культивирования микроводорослей.

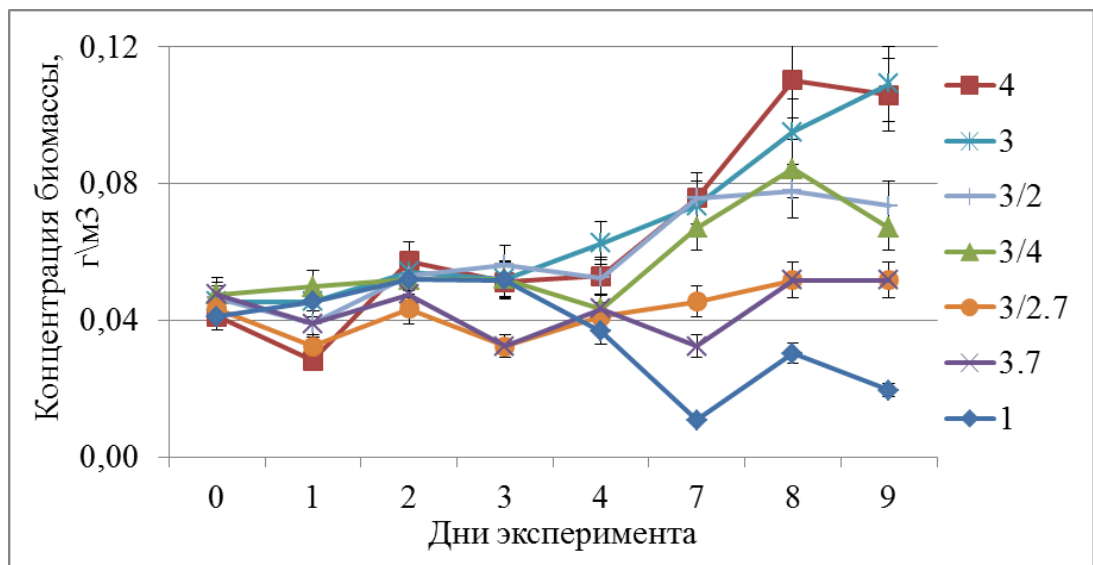
Полученные результаты важны для создания методик культивирования микроводорослей, а также могут быть полезны при создании методик очистки вод с помощью микроводорослей.

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОДОРОСЛИ *CHLORELLA*.

4.1. Утилизация азота из сточных вод водорослью *Chlorella vulgaris*

Результаты изменения концентрации биомассы водоросли *Chlorella vulgaris* представлены на двух графиках в связи с различным диапазоном значений биомассы в разных пробах.

На рисунке 4.1. представлены данные для проб 1; 3.7; 3/2.7; 3/4; 3/2; 4; 3. В данных пробах концентрация изменялась от 0,041 г/м³ до 0,11 г/м³, т. е. отмечено увеличение биомассы после 9 суток в 2,7 раза.



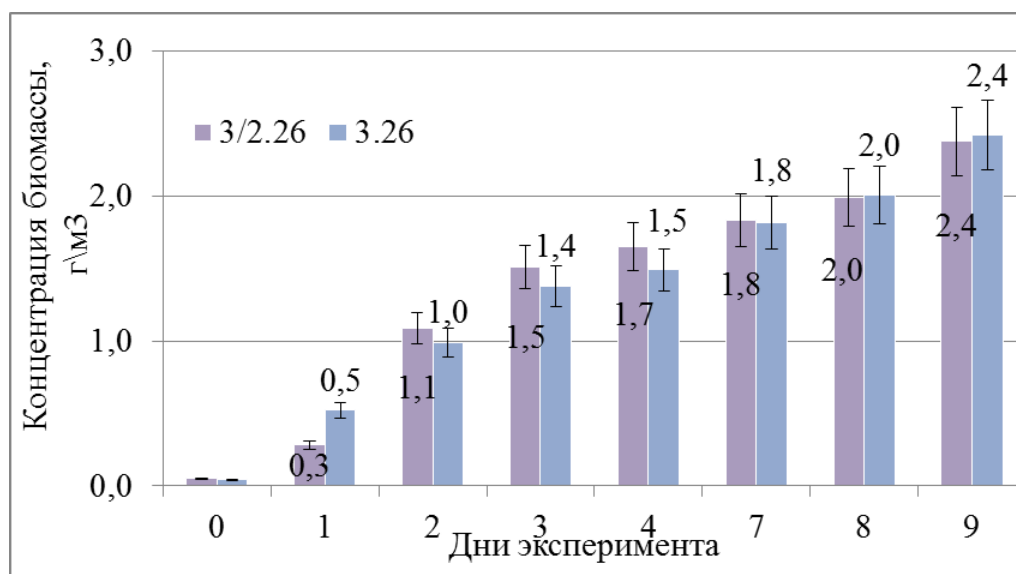
Пробы культуры хлореллы в эксперименте при постоянной температуре 17 °С, без аэрации и переменном освещении: 1 - пробы воды из отстойника хвостохранилища; 3 - пробы из отстойника карьера № 1; 3/2 - пробы воды из отстойника карьера № 1, разбавленные в 2 раза; 3/4 - пробы из отстойника карьера № 1, разбавленные в 4 раза; 4 – пробы из отстойник карьера № 2. Пробы культуры хлореллы в эксперименте при постоянной температуре 7 °С, без аэрации и освещения: 3.7 - пробы воды из отстойника карьера № 1; 3/2.7 - пробы из отстойника карьера № 1, разбавленные в 2 раза

Рисунок 4.1 – Концентрация биомассы культуры водоросли, тестируемой для проб воды с разной температурой

На рисунке 4.1. видно, что культивирование при температуре 17 °С, за исключением пробы 1, к концу эксперимента позволило накопить больше биомассы в пробах, чем в ходе культивирования при температуре 7 °С.

По сравнению с пробами хлореллы, культивируемой в "идеальных" условиях, пробы, культивируемые при температурах 7 и 17 °С, не показали существенного прироста биомассы, что объясняется низкой температурой для данного вида микроводоросли. Однако прирост биомассы все же был зафиксирован.

На графике ниже представлены гистограммы, отражающие изменения концентрации биомассы микроводоросли в пробах воды при температуре культивирования 26 °С. В пробах 3.26 и 3/2.26 исходная концентрация 0,04 г/м³ увеличилась к концу экспериментов до 2,4 г/м³, что составляет 60-кратный рост биомассы за 9 суток (рисунок 4.2).



3.26 – проба воды из отстойника карьера № 1; 3/2.26 – проба из отстойника карьера № 1, разбавленная в 2 раза.

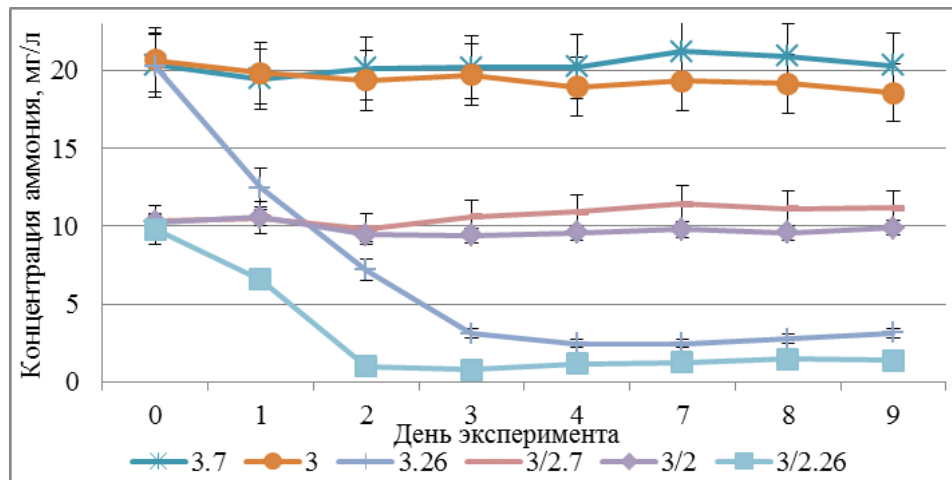
Рисунок 4.2 – Изменение концентрации биомассы микроводоросли *Chlorella vulgaris* в оптимальных условиях

При анализе зависимости изменения концентрации биомассы от концентрации форм азота можно отметить, что концентрация биомассы

возрастала не только при более высокой температуре, но и при больших исходных концентрациях азота в воде. Однако при температуре 26 °С концентрация биомассы уже не зависела от исходной концентрации азота (Рисунок 4.2).

Концентрация аммония

На рисунке 4.3. представлена графическая интерпретация результатов измерений содержания аммония в воде для двух групп проб воды: 3 и 3/2 в разных условиях.



Расшифровка обозначения проб соответствует индексации на предыдущих рисунках

Рисунок 4.3 – Концентрация аммония (мг/л) в пробах воды

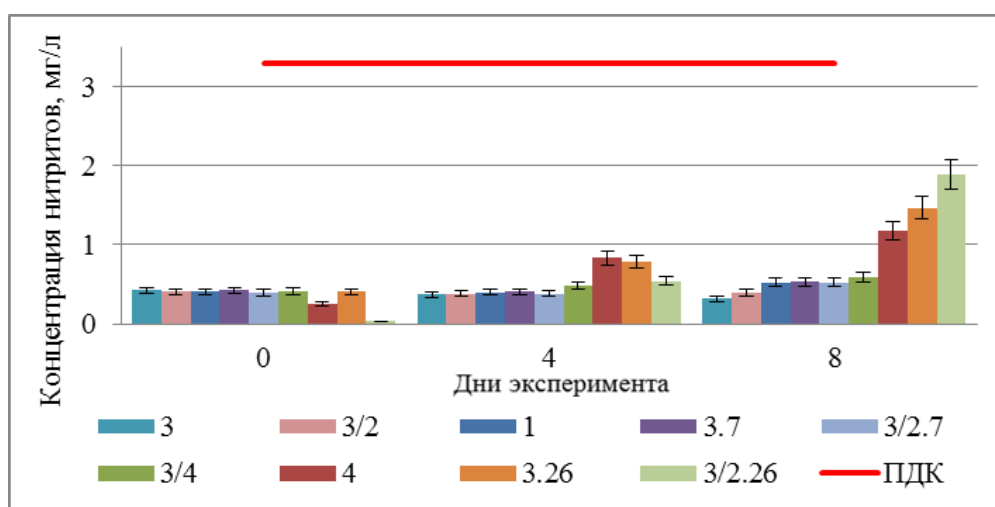
По результатам на рисунке 4.3. видно, что при температуре культивирования 7 °С концентрация аммония в пробах за 9 суток осталась неизменной, тогда как при температуре культивирования 17 °С концентрация аммония в пробах снизилась относительно исходной концентрации на 10,2 % для пробы 3 и на 3,5 % для пробы 3/2.

В пробах, культивируемых при температуре 26 °С с аэрацией и освещением, наблюдалось равномерное снижение концентрации аммония в воде. Для пробы 3.26 с большей исходной концентрацией аммония снижение соответствующих значений продолжалось в течение 3 суток и составило 84,6 % от исходного уровня. Для пробы 3/2.26 с меньшей исходной концентрацией аммония снижение продолжалось в течение 2 суток и составило 89,7 %. Далее концентрация аммония вышла на плато и колебалась в пределах 0,65мг/л. Для проб 3.26 и 3/2.26

наблюдался максимальный прирост биомассы водоросли и снижение ее концентрации. Это позволяет сделать вывод, что снижение концентрации аммония обусловлено его поглощением водорослью в процессе питания для поддержания процессов жизнедеятельности и последующего деления клеток.

Концентрация нитратов и нитритов

Графическая интерпретация концентрации нитритов в пробах воды представлена на рисунке 4.4.



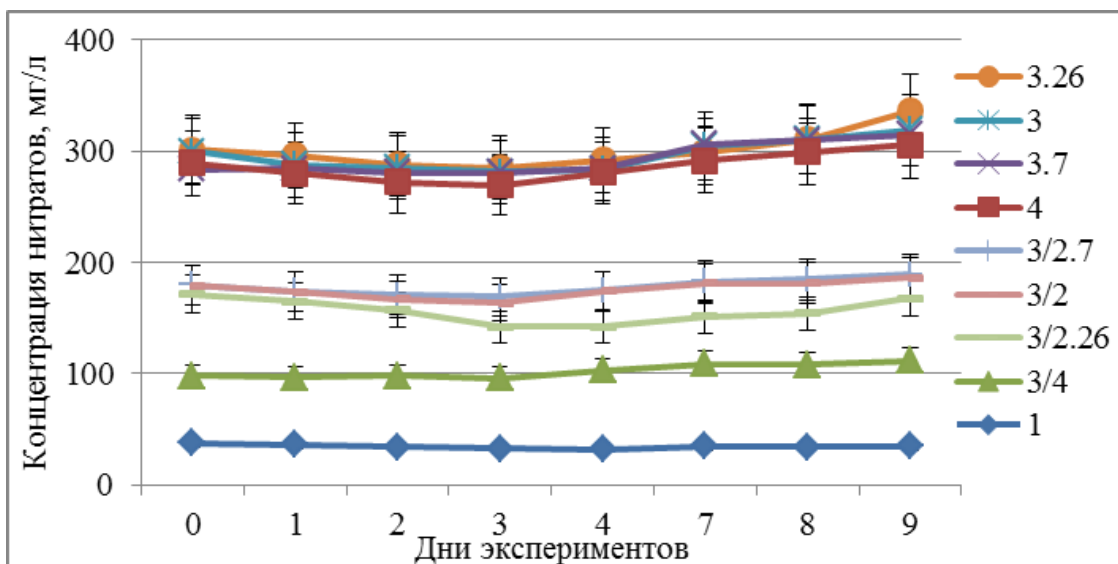
Расшифровка обозначения проб соответствует индексации на предыдущих рисунках

Рисунок 4.4 – Концентрация нитритов (мг/л) в пробах воды

Концентрация нитритов замерялась трижды: перед началом серии экспериментов, через 4 и 8 суток. Продолжительный перерыв между измерениями обусловлен необходимостью отбирать большой объем пробы воды по сравнению с общим объемом пробы.

В большинстве проб концентрация нитритов оставалась неизменной в ходе экспериментов. Рост значений наблюдался для проб 3.26, 3/2.26, 4. Рост концентрации объясняется переходом из одной формы неорганического азота в другую. Конечная концентрация не превышала уровень ПДК во всех пробах.

Графическая интерпретация концентрации нитратов в пробах воды представлена на рисунке 4.5.



Расшифровка обозначения проб соответствует индексации на предыдущих рисунках

Рисунок 4.5 – Концентрация нитратов (мг/л) в пробах воды

В ходе экспериментов было отмечено незначительное снижение концентрации нитратов в воде после 3 суток и последующий рост концентрации к начальному уровню.

Наиболее близкой к нашим исследованиям является работа [48], согласно которой при температуре воды 3 °С наблюдалось понижение концентрации нитратов с 200 мг/л до 45 мг/л за 8 дней, а при температуре 19 °С – за 7 дней. По нашим результатам статистически значимого снижения концентрации нитратов не зафиксировано даже при оптимальной для объекта температуре 26 °С. Результаты работы [48] показывают, что высокая эффективность очистки вод от азот-содержащих компонентов обусловлена выбором холодоустойчивого вида водоросли, а также специальной методикой подготовки культуры на среде без источников азота – "азотном голодании". Автором не приводятся данные по изменению концентрации аммонийной формы азота, которая существенно снижалась при культивировании при 26 °С согласно оригинальным результатам. Необходимо повторить проведенные эксперименты с культурой, выращенной в условиях "азотного голодания", для более объективного сопоставления результатов и изучения способа культивирования водорослей на их способность утилизировать нитраты и аммоний.

В работе [133] изучены особенности применения элодеи и сообществ активного ила для изменения концентрации аммония в сточных водах. Было показано, что культивирование элодеи совместно с активным илом позволило удалить весь аммоний из воды при исходной концентрации 6,5 мг/л и температуре 20 °С. Концентрация нитратов снижалась за 7 дней с 8,1 до 2,9 мг/л в аналогичных условиях. Данный метод превосходит эффективность утилизации азота, показанный в наших опытах, однако стоит отметить, что в полученных нами результатах скорость утилизации аммония была выше, а снижение концентрации на 85–90 % наступало уже через 2–3 дня (в зависимости от исходной концентрации аммония). При этом исходная концентрация азотсодержащих веществ в нашем исследовании была на порядки выше и составляла для аммония 10 и 20 мг/л, а для нитратов доходила до 300 мг/л, тогда как в работе [133] исходные концентрации аммония и нитратов не превышали 9 мг/л. Вместе с тем не известно, как рассмотренные автором организмы отреагируют на столь высокие концентрации азота в воде.

На основе сопоставления полученных результатов с работами других авторов [48, 133] можно сделать вывод о том, что различные организмы в совокупности с учетом методов их подготовки демонстрируют различную способность утилизации соединений азота. В зависимости от условий, в том числе климатических, и от характеристик предприятий (концентрации загрязнителей, объемы водосброса), на которых необходимо проводить очистку, эффективными могут оказаться различные методы очистки. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что применение хлореллы возможно при малых объемах водосброса, когда очистку можно проводить в биореакторах с оптимальными для водоросли условиями роста. Вместе с тем адекватный подбор вида водоросли и оптимизация условий подготовки культуры может способствовать расширению диапазона условий, в которых хлорелла будет наиболее эффективно справляться с загрязнениями.

Выводы по эксперименту: По результатам эксперимента в условиях 9-суточных экспериментов изучена способность культуры микроводоросли

Chlorella vulgaris наращивать биомассу, поглощая азот из сточных вод горнодобывающих производств в различных температурных условиях. Установлено, что хлорелла, выращенная на среде Тамия, успешно наращивает биомассу при постоянной температуре 26 °С, аэрации и освещении, а также снижает концентрацию аммония в воде в 10 раз уже через 2–3 суток. При температуре 7 и 17 °С без аэрации и с естественным освещением отмечены незначительные изменения в воде концентрации аммония и нитратов. Успешное поглощение аммония достигалось в идеальных для водоросли условиях с температурой 26 °С, аэрацией и освещением. Данный факт свидетельствует о возможности применения хлореллы для очистки сточных вод в регионах с благоприятным для водоросли климатом. При неблагоприятных климатических условиях может быть перспективна разработка биореакторов, искусственно поддерживающих необходимые для культивирования условия. Перспективным является также изучение способности микроводоросли *Chlorella vulgaris*, выращенной при азотном голодании, утилизировать азот, а также поглощать фосфор и тяжелые металлы из сточных вод.

Важно отметить, что по итогам экспериментов концентрация аммония в сосудах хотя и существенно снижалась, но все равно превышала уровень ПДК, что требует проведения дальнейших экспериментов и подбора таких условий культивирования (состав среды, сроки экспозиции, плотность культуры, температурный режим опытов, вторичный посев культуры), при которых итоговая концентрация соединений азота в очищаемой воде станет ниже значений ПДК.

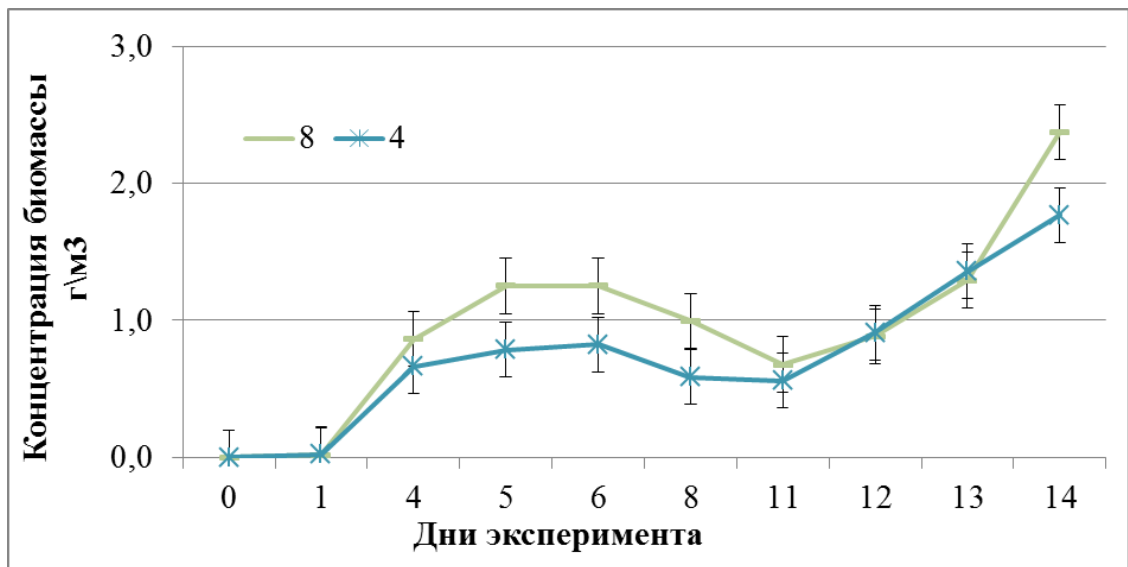
Данный раздел подготовлен на основе публикации автора диссертации [134].

4.2. Утилизация азота водорослью выращенной в условиях азотного голодания

Цель исследования заключается в изучении способности водоросли *Chlorella*, выращенной на безазотной среде, утилизировать соединения неорганического азота из сточных вод горнодобывающих производств в различных температурных условиях.

Концентрация биомассы водоросли

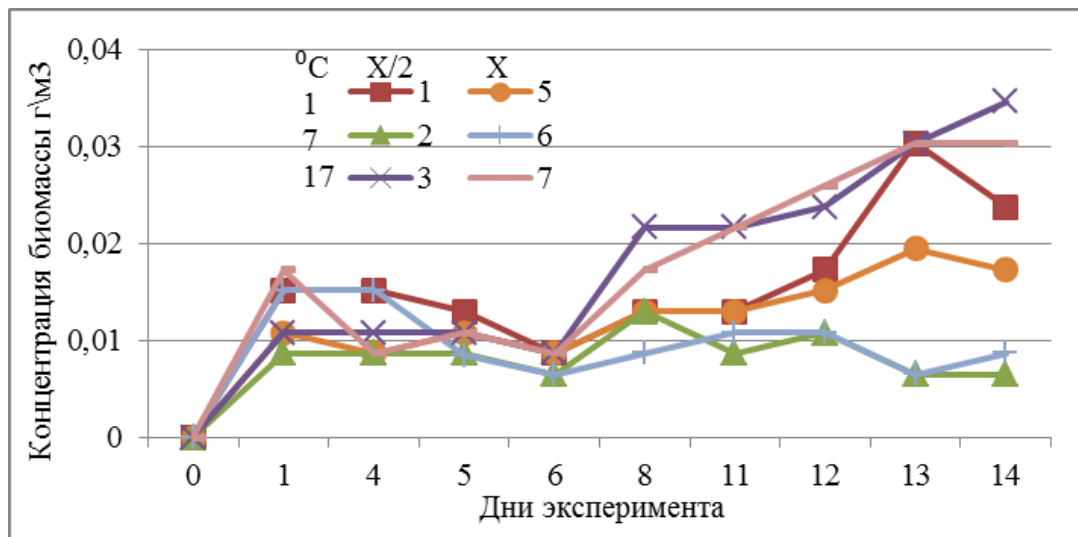
Результаты измерения концентрации биомассы водоросли *C. vulgaris* представлены на рисунках 4.6 и 4.7.



Проба 8 – вода из отстойника карьера; Проба 4 – вода из отстойника карьера, разбавленная в 2 раза дистиллированной водой; обе пробы культивировались при $T 26^{\circ}\text{C}$ с постоянным освещением и аэрацией

Рисунок 4.6 – Концентрация *C. vulgaris* выращенной при азотном голодании после культивирования на сточных водах в оптимальных условиях

В условиях азотного голодания у водорослей *C. vulgaris* наблюдается низкое содержание хлорофилла, что приводит к отсутствию зеленой окраски в клетках. Это особенность, которая повлияла на оценку концентрации биомассы в начальный момент эксперимента (0 день). В связи с этим, для получения точной оценки концентрации биомассы водорослей в пробах воды, было принято во внимание, что верная оценка становится возможной после 1 дня эксперимента, когда водоросль начинает восстанавливать свою зеленую окраску и продолжает наращивать биомассу.



Пробы культуры хлореллы при постоянной температуре 17⁰С, без аэрации и переменном освещении: 3 – из отстойника карьера; 7 – пробы воды из отстойника карьера, разбавленные в 2 раза; Пробы культуры хлореллы при постоянной температуре 7⁰С, без аэрации и освещения: 2 – пробы воды из отстойника карьера; 6 – пробы из отстойника карьера, разбавленные в 2 раза; Пробы культуры хлореллы при постоянной температуре 1⁰С, без аэрации и освещения: 1 – пробы воды из отстойника карьера; 5 – пробы из отстойника карьера, разбавленные в 2 раза

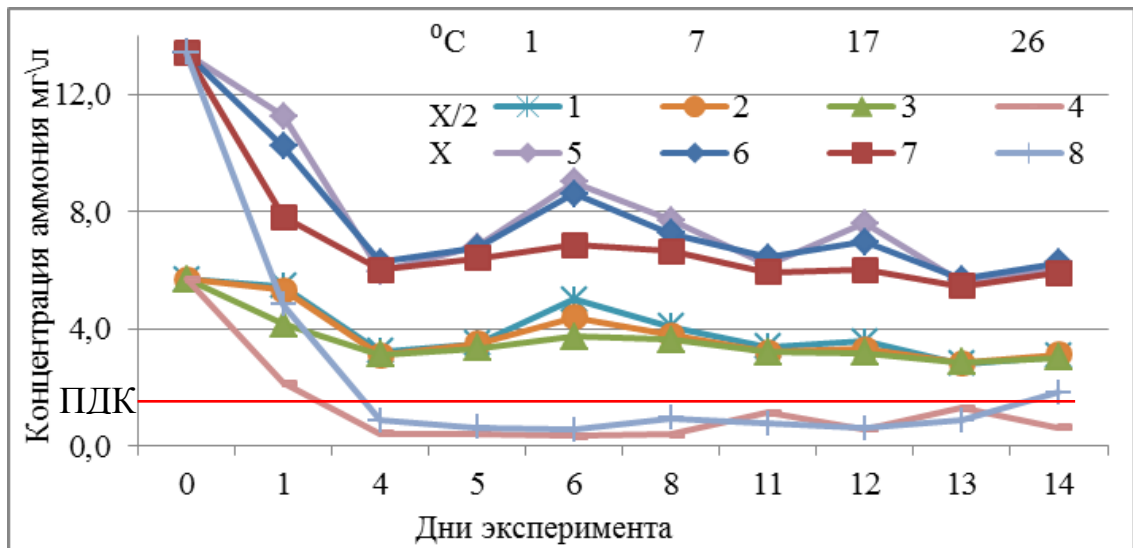
Рисунок 4.7 – Концентрация биомассы *C. Vulgaris*, выращенной на азотном голодании после культивирования на сточных водах при различных температурных режимах

Результаты, представленные на рисунке 4.7, показывают увеличение биомассы во всех пробах. Средняя концентрация биомассы после первого дня культивирования составила $0,013 \pm 0,004$ г/м³, к 14 дню эксперимента среднее значение увеличилось до $0,2 \pm 0,01$ г/м³, прирост составил 53,8%, что свидетельствует о жизнеспособности водоросли *C. vulgaris* в диапазоне температур от 1 до 17 ⁰С без интенсивного наращивания биомассы. Кроме того, конечная концентрация биомассы оказалась выше в пробах с более высокой температурой. Таким образом, можно сделать вывод, что повышение температуры способствует увеличению конечной концентрации биомассы водоросли.

Отмечается, что не была обнаружена зависимость скорости роста биомассы от концентрации загрязнения. Например, при температурах 1 и 17 ⁰С конечная

концентрация биомассы микроводоросли оказалась выше в неразбавленных образцах воды, в то время как при температурах 7 и 26 °С биомасса оказалась выше в разбавленных пробах воды. Это может указывать на то, что влияние загрязнения на рост биомассы микроводоросли зависит от температуры и проявляется по-разному.

Результаты измерения концентрации аммония и нитратов в сточных водах представлены на рисунках 4.8 и 4.9.



Расшифровки обозначений совпадают с предыдущими графиками

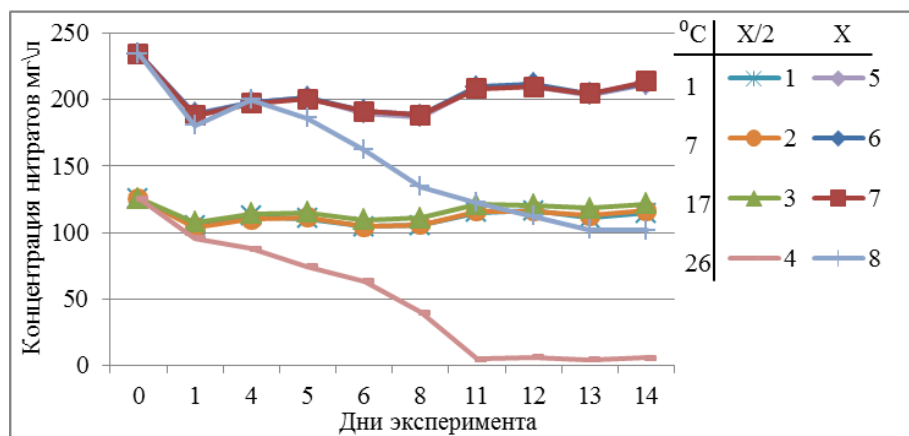
Рисунок 4.8 – Концентрация аммония в образцах воды при культивировании *C. Vulgaris* выращенной на азотном голодании

Из данных на рисунке 4.8. видно, что при всех вариантах эксперимента наблюдается статистически значимое снижение концентрации аммония в пробах воды. Интенсивное снижение концентрации аммония происходит в первые 4 дня эксперимента, после чего концентрация выходит на плато и остается практически неизменной.

При температуре 1, 7 и 17 °С концентрация аммония не зависела от температуры. В пробах 1, 2 и 3 с исходной концентрацией аммония 13,4 мг/л, концентрация снижается до 6 мг/л после 4 дней эксперимента и остается на этом уровне до конца эксперимента. В пробах 5, 6 и 7 с исходной концентрацией аммония 5,7 мг/л также наблюдается значимое снижение концентрации в первые

4 дня, после чего концентрация составляет около 3,1 мг/л и остается стабильной с незначительными колебаниями.

Более эффективное удаление аммония в воде наблюдается в пробах 4 и 8, которые культивировались при температуре 26 °С с аэрацией и освещением. В пробе 4 с исходной концентрацией аммония 5,7 мг/л, она снижается до 0,4 мг/л после 4 дней эксперимента. В пробе 8 с исходной концентрацией аммония 13,4 мг/л, наблюдается её уменьшение до 0,9 мг/л. В обоих случаях содержание ионов аммония остается на стабильном уровне с отклонением, не превышающим $\pm 0,9$ мг/л. Полученные концентрации аммония были ниже предельно допустимой концентрации (ПДК) по аммонiu. Таким образом, в пробах 4 и 8 удалось снизить концентрацию аммония на 93% за 4 дня эксперимента.



Расшифровки обозначений совпадают с предыдущими графиками

Рисунок 4.9 – Концентрация нитратов в образцах воды при культивировании *S. Vulgaris*, выращенной на азотном голодании

Из данных на рисунке 4.9 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.

Другая ситуация наблюдалась при культивировании при температуре 26 °С. В пробе 4 с исходным количеством нитратов 125,5 мг/л уровень предельно допустимой концентрации (ПДК) был достигнут через 8 дней эксперимента.

Затем содержание нитратов продолжало снижаться, и к 11-му дню было на уровне $5 \pm 1,5$ мг/л. В пробе 8 с исходным содержанием нитратов 234,5 мг/л концентрация снизилась до 122,5 мг/л к 11-му дню эксперимента. На 14-м дне эксперимента количество нитратов в пробе 8 снижалось до 101,5 мг/л.

В процентном соотношении из пробы 4 с исходной концентрацией 125,5 мг/л удалено 68% нитратов за 8 дней и 96% за 11 дней эксперимента. Из пробы 8 с исходным содержанием 234,5 мг/л удалено 48% нитратов за 8 дней и 57% за 14 дней эксперимента.

Предполагается, что при исходной концентрации нитратов в 234,5 мг/л достижение уровня ПДК должно наступить на 19-й день. Однако необходимо проверить данное предположение, так как при длительном культивировании может произойти насыщение водорослей азотом или быть достигнута критическая отметка биомассы водоросли, что может привести к остановке снижения концентрации нитратов или даже к их увеличению за счет вторичного загрязнения.

В эксперименте № 2.1. проведенного 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 26⁰С с аэрацией и освещением. Однако существенного снижения аммония при температурах 7 и 17 ⁰С 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 ⁰С с аэрацией и освещением. Кроме того, удалось достичь утилизации аммония с эффективностью 45-55% при различных температурных режимах от 1 до 17 ⁰С, что не было достигнуто при культивировании водорослей на среде Тамия.

Для дальнейших исследований следует изучить зависимость эффективности утилизации азотных соединений в сточных водах от объема вносимой культуры водорослей и определить оптимальный объем для различных концентраций

загрязнителей. Это позволит повысить эффективность и ускорить процесс поглощения нитратов в воде.

Кроме того, благодаря выращиванию водорослей на безазотной среде удалось добиться степени утилизации нитратов от 48% за 8 дней до 96% на 11-й день. В то время как эксперименты №2.1. показали, что хлорелла, выращенная на среде Тамия, не поглощает нитраты в значительной степени.

На основе проведенного сравнения можно сделать вывод, что выращивание хлореллы на среде без источников азота увеличивает ее эффективность в утилизации азотных соединений и расширяет диапазон температур, при которых наблюдается снижение концентрации не только аммония, но и нитратов. Однако следует проверить, какое влияние на эффективность очистки оказывает наличие азотных соединений, которые попадают в очищаемую воду при внесении суспензии, выращенной на среде Тамия. Существует вероятность, что повышение эффективности очистки суспензией водоросли, выращенной на азотном голодании, связано с тем, что такая суспензия не загрязняет воду азотом, содержащимся в классической среде Тамия. Для проверки этой гипотезы необходимо провести эксперименты по очистке воды не с помощью суспензии, а с использованием отделенной от среды биомассы водоросли. Разделение водоросли от среды можно достичь путем центрифугирования или высушивания.

Согласно данным [48] описана возможность использования *Chlorella kislteri* (ВКПМ А1-11 ARW 2015) для утилизации аммония из сточных вод горнодобывающего предприятия в Мурманской области. Согласно результатам этой работы, при температуре воды 3 °С наблюдалось снижение концентрации нитратов с 200 мг/л до 45 мг/л за 8 дней, а при температуре 19 °С – за 7 дней. В наших же результатах статистически значимого снижения концентрации нитратов при температуре 19 °С не наблюдалось, в то время как при оптимальной для *S. vulgaris* температуре 26 °С концентрация нитратов снизилась с 125,5 мг/л до значения ПДК 40 мг/л за 8 дней, а за 11 дней – до 5 мг/л. Согласно материалам [48] показана высокая эффективность очистки воды от нитратов в более широком диапазоне температур, чем показано в нашей работе. Эти результаты обусловлены

выбором холодоустойчивого вида водоросли *C. kislери*. Однако автором не представлены данные по изменению концентрации аммонийной формы азота, которая существенно снижалась при культивировании при 26 °С согласно оригинальным результатам. Поэтому необходимо повторить проведенные эксперименты с культурой, адаптированной к различным температурным условиям.

Выводы по серии экспериментов: В условиях 14-суточного эксперимента была изучена способность культуры микроводоросли *C. vulgaris*, выращенной в условиях азотного голодания, наращивать биомассу, поглощая азот из карьерных вод предприятий горнопромышленного комплекса в различных температурных условиях. Установлено, что хлорелла, выращенная на среде Тамия без источников азота, успешно наращивает биомассу при постоянной температуре 26 °С, аэрации и освещении, а также снижает концентрацию нитратов в воде с эффективностью до 96% за 11 дней. Эффективность очистки вод от ионов аммония в аналогичных условиях составила 93% за 4 дня. При температуре 1, 7 и 17 °С без аэрации и с естественным освещением наблюдался неинтенсивный рост культуры, отсутствие поглощения нитратов и наблюдалось снижение концентрации аммония, менее эффективное, чем при 26 °С.

Полученные результаты демонстрируют увеличение эффективности удаления азота из сточных вод при подготовке водоросли азотным голоданием и возможность применения подобной культуры для очистки сточных вод в регионах с благоприятным для водоросли климатом. В регионах с суровым климатом хлорелла, выращенная в условиях азотного голодания, способна снижать концентрацию аммония в естественных условиях и может быть использована для разработки систем биологической очистки сточных вод в биореакторах, поддерживающих необходимые для водоросли условия.

В будущих исследованиях необходимо выяснить оптимальный расход культуры для наиболее эффективной утилизации азота при различной степени загрязненности воды. Для этого необходимо сравнить степень очистки при добавлении различного объема культуры. Также необходимо продолжить

изучение роли среды культивирования водоросли в утилизации азота, а именно провести эксперименты, в которых будет исключен вклад среды в изменение концентрации исследуемых соединений. Для этого целесообразно вносить при посеве концентрат суспензии после центрифугирования, или после высушивания.

Перспективным является изучение способности микроводоросли *C. vulgaris* утилизировать не только азот, но и поглощать фосфор и тяжелые металлы из сточных вод. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности широкого использования микроводоросли *C. vulgaris* для снижения содержания аммонийного азота в сточных водах предприятий горнопромышленного комплекса.

Раздел подготовлен на основе публикации автора диссертации [135].

4.3. Подбор оптимальной концентрации водоросли для удаления азота

В рамках экспериментов в образцы воды вносилась сухая навеска водоросли *C. vulgaris* в различных концентрациях. Всего было проведено 4 варианта эксперимента:

- 1 – контрольный без внесения сухой навески;
- 2 – внесение 0,5 г/л навески водоросли *C. vulgaris*;
- 3 – внесение 1,0 г/л навески водоросли *C. vulgaris*;
- 4 – внесение 2,0 г/л навески водоросли *C. vulgaris*;

Целью эксперимента являлось установить принципиальную возможность использования для очистки сточных вод от азота сухой навески водоросли *C. vulgaris* вместо жидкой суспензии.

На рисунке 4.10. представлены результаты изменения биомассы микроводоросли ходе культивирования. Измерения проводились колориметрическим методом. Данные на графике демонстрируют меньшую концентрацию биомассы, чем внесено изначально. Это связано с тем, что колориметр фиксирует оптическую плотность раствора с взвешенными частицами. Таким образом, показания колориметрии можно интерпретировать, как концентрацию живых клеток в суспензии без учета осажденных мертвых клеток.

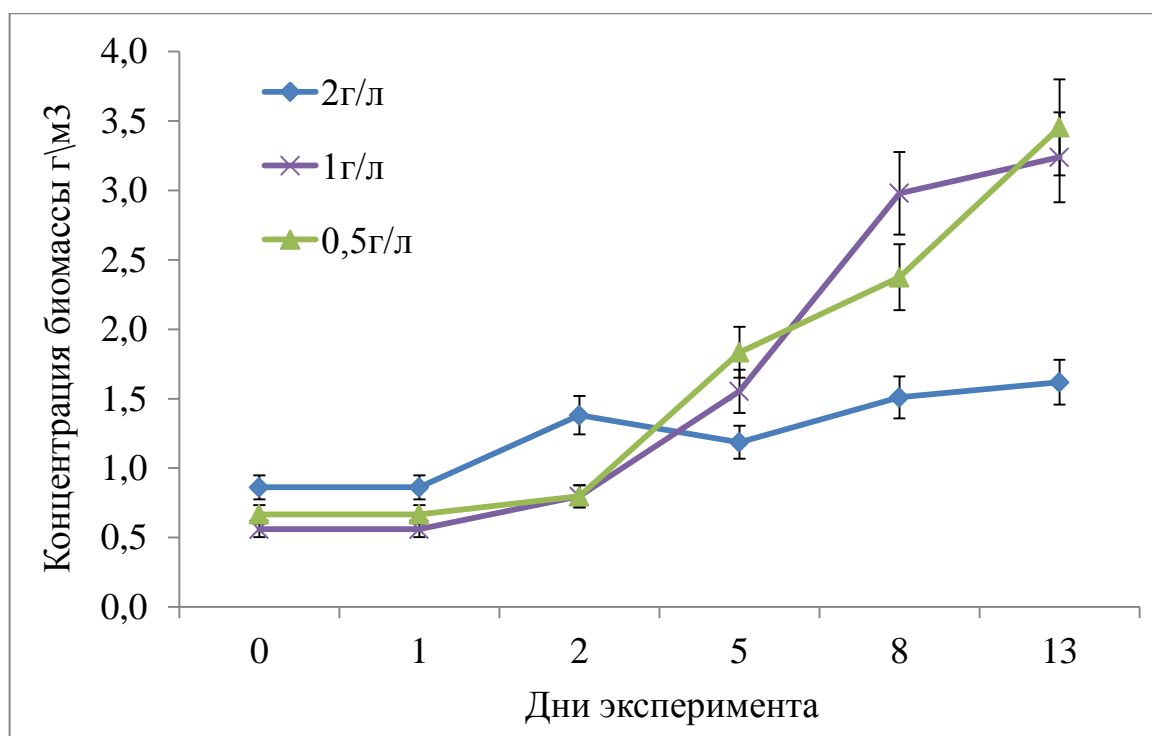
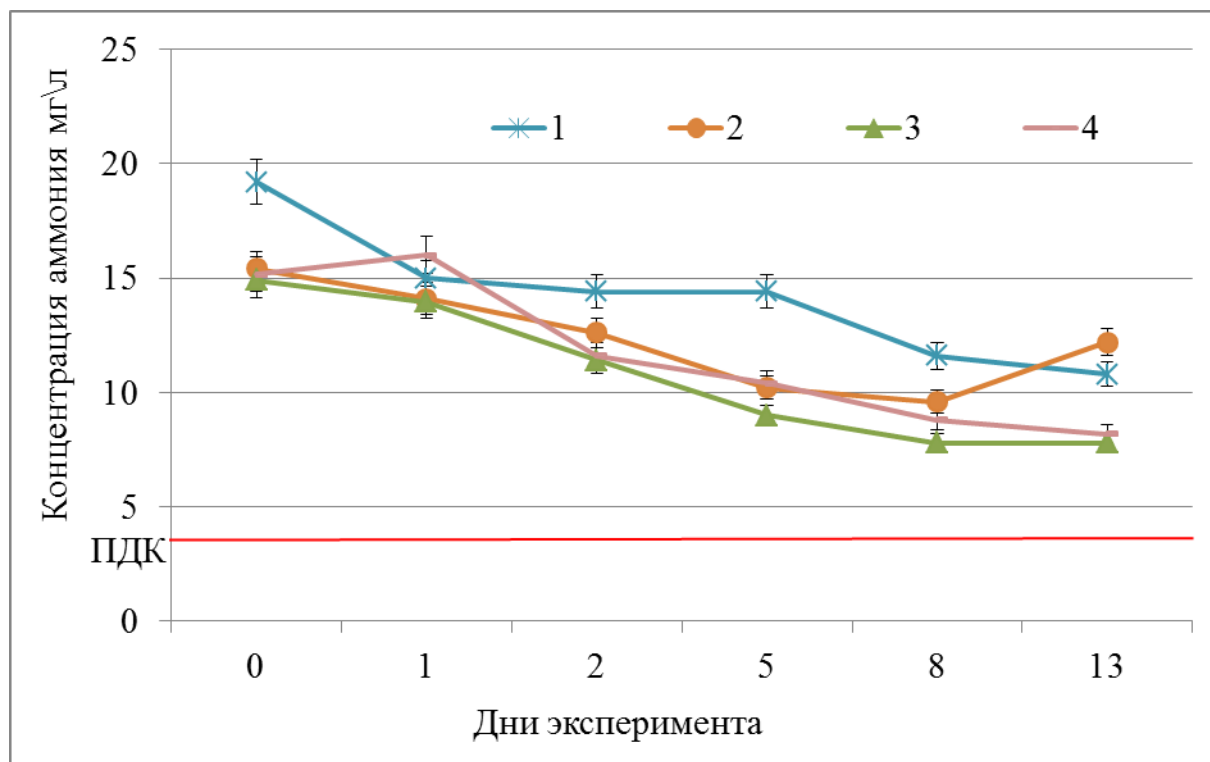


Рисунок 4.10 – Концентрация биомассы водоросли *C. vulgaris* в процессе культивирования

Как видно из рисунка 4.10. концентрация биомассы начинает интенсивно расти со 2 дня. К 13 дню концентрация взвешенных клеток достигаете 3,2-3,5 г/л. Исходная концентрация взвешенных клеток была выше при внесении 2г/л сухой биомассы и составляла 0,9 г/м³ против 0,6 и 0,7 г/м³ при внесении 1 и 0,5 г/л сухой биомассы соответственно. При этом водоросль показывал большую жизнеспособность при внесении 1 и 0,5 г/л и на 5 сутки концентрация взвешенных клеток оказывалась выше, чем при внесении 2 г/л. Вероятно, это связано с тем, что в сухой биомассе сохраняются компоненты среды культивирования, которые в совокупности с загрязненной водой оказывают негативное воздействие на рост культуры.

Результаты измерения концентрации биомассы демонстрируют, что водоросль сохраняет свою жизнеспособность после высушивания, но жизнеспособными остаются не все клетки, часть из них выпадают в осадок.

Результаты измерения концентрации аммония в ходе эксперимента представлены на рисунке 4.11.



Пробы: 1 – контроль; 2 – 0,5г/л; 3 – 1,0г/л; 4 – 2,0г/л сухой биомассы водоросли

Рисунок 4.11 – Изменение концентрации аммония в образцах воды

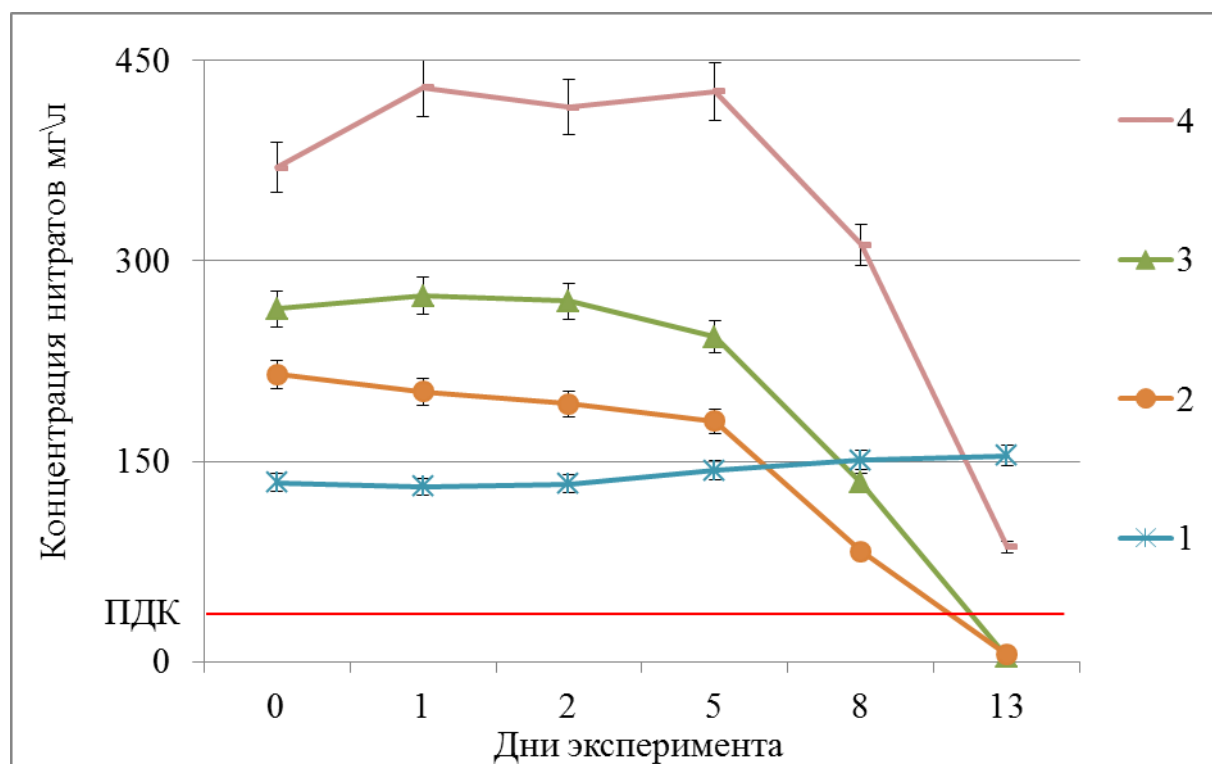
Как видно из графика (рисунок 4.11), внесение навески привело к снижению концентрации аммония. В контрольной пробе №1 исходная концентрация аммония составила 19.2 мг/л, тогда как среднее значение концентрации аммония после внесения сухой навески водоросли в пробах № 2, 3 и 4 составило 15.48 мг/л, что на 19,37% меньше исходного значения.

Далее на протяжении эксперимента наблюдалось плавное снижение аммония. Снижение концентрации аммония к концу эксперимента варьировалось от 20 до 43% от исходных значений, статистически не отличалось от контрольного эксперимента. Значений ПДК достигнуто не было. Поэтому можно сделать вывод, что изменение было связано не с деятельностью водоросли, а с процессом перехода аммония в нитраты в процессе нитрификации в присутствии кислорода.

На рисунке 4.12 представлены результаты измерения концентрации нитратов в ходе эксперимента. Исходная концентрация нитратов в воде

составляла 134 мг/л. Внесение сухой биомассы водоросли привело к увеличению концентрации нитратов пропорционально внесенной биомассе.

В контрольной пробе №1 без водоросли наблюдается отсутствие изменения концентрации за 2 дня эксперимента с последующим незначительным ростом концентрации нитратов, которое можно объяснить переходом аммония в нитраты.



Пробы: 1 – контроль; 2 – 0,5г/л; 3 – 1,0г/л; 4 – 2,0г/л сухой биомассы водоросли

Рисунок 4.12 – Концентрация нитратов в образцах воды

В пробах № 2, 3, 4 наблюдается отсутствие изменений или слабая динамика концентрации нитратов за 5 дней эксперимента. После чего наблюдается равномерное снижение концентрации нитратов.

После 8 дня эксперимента в образцах №1 и №2 концентрация нитратов опускается ниже контрольных значений, а после 13 дня ниже ПДК. Тогда как в пробе №4 к 13 дню концентрация нитратов становится ниже контрольных значений, но остается выше уровня ПДК. При сохранении положительной динамики можно спрогнозировать, что в варианте эксперимента №4 концентрация нитратов также станет ниже ПДК позднее.

Сравнивая результаты пробы №2, 3, 4 с контрольной пробой №1 можно сделать вывод о том, что вклад в снижение концентрации нитратов вносит именно деятельность водоросли *Chlorella vulgaris*.

Внесение 2 г/л является избыточным, так как за счет побочного загрязнения снижается скорость утилизации нитратов. Внесение 0.5 и 1г/л показало свою эффективность для утилизации нитратов, так как финальная концентрация была ниже ПДК.

Что касается принципиальной возможности использования сухой навески микроводоросли для утилизации азота. Подобный способ подготовки водоросли может быть удобен для транспортировки водоросли к месту использования. Однако сухая навеска хуже справлялась с удалением аммония, но сохраняла эффективность утилизации нитратов. Оптимальным в данном случае является использование навески 1г/л, так как при ее использовании наблюдалась минимальная конечная концентрация аммония и нитратов.

Возможно, для улучшения показателей утилизации аммония следует подготавливать сухую навеску после выращивания на безазотной среде.

4.4. Облучение водоросли с последующей очисткой вод

В рамках эксперимента №2.4 проводились повторы опыта с культурой, выращенной на среде Тамия и безазотной среде. Половина проб выращивалась при температуре 17°C без аэрации и освещения, вторая половина при 26°C с аэрацией и освещением. Половина проб облучалась ЭМИ КВЧ 40ГГц 2 часа до начала культивирования, вторая половина не облучалась для контроля. Условия для каждой пробы представлены в таблице 7. Продолжительность эксперимента составила 14 суток.

На рисунке 4.13 представлен график концентрации изменения биомассы водоросли в ходе эксперимента.

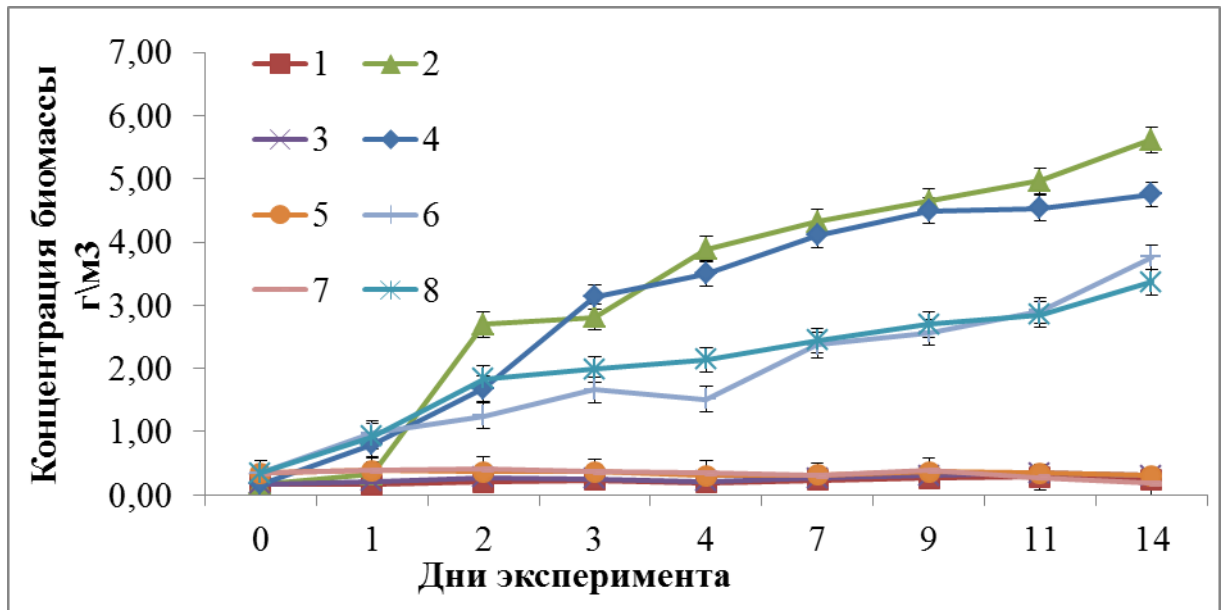


Рисунок 4.13 – Концентрация биомассы водоросли в эксперименте №2.4

Как видно из графика при температуре культивирования 26°C наблюдается равномерный рост биомассы во всех четырёх вариантах опытов: 2, 6, 4, 8. При этом концентрация биомассы оказывалась ниже в пробах, выращенных на безазотной среде: 6 и 8. При сравнении вариантов экспериментов по облучённости видим, что в облученных пробах концентрация биомассы к концу эксперимента была выше, чем в необлученных. Так в вариантах опытов со средой Тамия: 2 концентрация биомассы была выше, чем в варианте 4 на 18,18%, а в вариантах опытов со средой без азота: 6 концентрация биомассы была выше, чем в варианте 8 на 11,54%. Что свидетельствует о наличии стимулирующего действия ЭМИ КВЧ на рост водоросли *Chlorella vulgaris*.

При температуре культивирования 17°C изменение концентрации биомассы менее выражено. Так в пробах 1 и 3, выращенных на среде Тамия, конечная концентрация биомассы оказалась выше исходной, как в случае облучения, так и без него. Тогда как в пробах 5 и 7, выращенных на среде без азота, концентрация практически не изменилась относительно исходного значения.

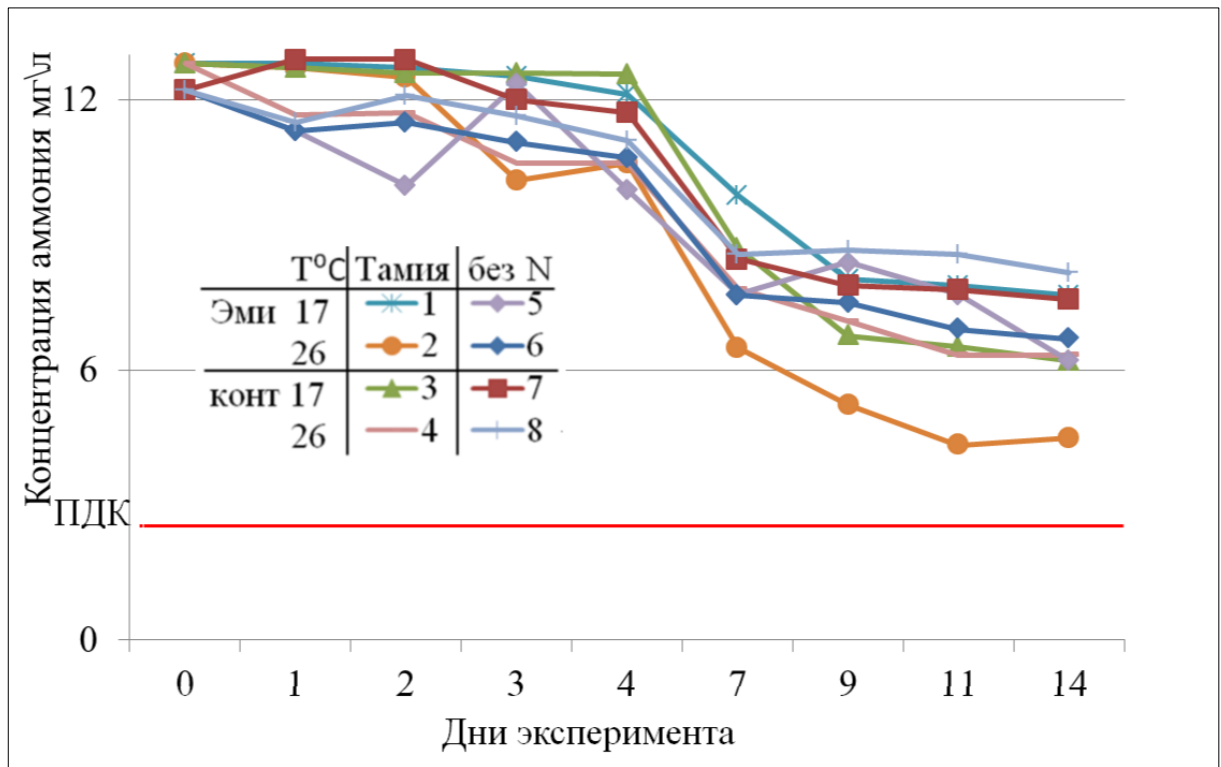


Рисунок 4.14 – Концентрация аммония в воде в эксперименте №2.4

На рисунке 4.14 представлен график концентрации аммония в ходе эксперимента.

В первые 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 чего за 7-14 сутки эксперимента концентрация аммония продолжает снижаться с меньшей скоростью.

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

Так же установлено, что в большинстве экспериментов 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%. Тогда, как в эксперименте 2 с облучением, концентрация аммония оказалась 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%, также как и при сравнении экспериментов 6 и 8. Таким образом, в среднем при облучении эффективности утилизации аммония водорослью *Chlorella vulgaris* после 14 дней выросла на 10% по сравнению с аналогичными экспериментами без облучения.

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

На рисунке 4.15 представлен график концентрации нитратов в ходе эксперимента.

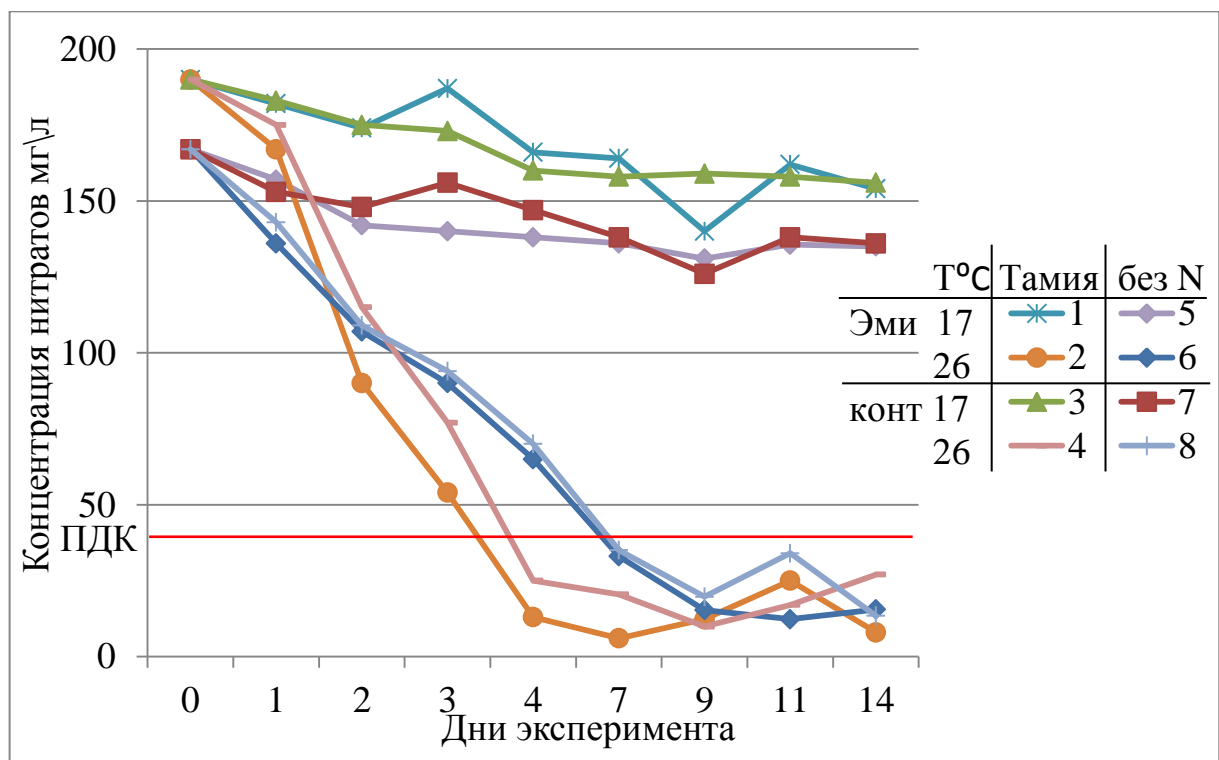


Рисунок 4.15 – Концентрация нитратов в воде в эксперименте №2.4

Как было показано в предыдущих экспериментах концентрация нитратов успешно утилизируется водорослью при температуре 26 °С, чего нельзя сказать об экспериментах при температуре 17 °С. Эти данные были подтверждены и в текущей серии экспериментов.

При температуре 17 °С было установлено планомерное снижение концентрации нитратов во всех пробах в среднем на 19% вне зависимости от прочих факторов. Тогда как при температуре 26 °С в среднем к концу экспериментов был удален 91% нитратов и достигнуто значение ниже ПДК. При этом максимальная эффективность в 96% удаления нитратов была зафиксирована в эксперименте с облучением, культивированием на среде Тамия при температуре 26 °С.

При этом отмечается, что показания ниже ПДК были достигнуты быстрее в экспериментах, где водоросль культивировали на среде Тамия (4 дня), чем на безазотной среде (7 дней). Однако концентрация нитратов к концу эксперимента статистически не отличалась при различных средах культивирования.

Сравнивая результаты всех экспериментов по облучению, в вариантах с облучением пробы конечная концентрация нитратов оказывалась меньше на 4%.

В результате серии экспериментов был получен вывод о том, что облучение водоросли в загрязненных водах дает увеличение скорости роста в 15%, что меньшей чем это было показано на «чистой» водной среде. Данный эффект позволил повысить эффективность утилизации аммония на 10% и эффективность утилизации нитратов на 4%. Для понимания целесообразности применения ЭМИ для повышения утилизации азота из сточных вод требуется дальнейшее экономическое обоснование.

Прямое сравнение данных концентрации биомассы при культивировании на двух вариантах сред: Тамия и новой без азотной среды, показало, что водоросль *Chlorella vulgaris* хуже набирает биомассу, если была подготовлена на среде без азота.

Выводы по главе

1. Установлено, что *Chlorella vulgaris* способна выживать и успешно наращивать биомассу при культивировании в различных условиях на сточных водах карьера и отстойника предприятия ОАО «Карельский окатыш».

2. *Chlorella vulgaris* в процессе наращивания биомассы способна снижать концентрацию неорганического азота в сточных водах с различной эффективностью, зависящей от условий и среды культивирования.

3. В рамках эксперимента была подобрана среда культивирования без источников азота, которая позволила достичь удаления 96% нитратов за 11 дней и 93% аммония за 4 дня в случае, когда водоросль культивировалась в оптимальных для вида условиях. Однако водоросль хуже наращивает биомассу на данной среде.

4. Результаты по удалению азота из сточных вод свидетельствуют о возможности применения водоросли *Chlorella vulgaris* для использования в процессах очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганического азота открытым способом, когда климатические условия позволяют наращивать биомассу, либо в биореакторах.

5. Облучение водоросли вместе со сточными водами ЭМИ КВЧ 40ГГц в течение 2 часов перед культивированием позволило увеличить концентрацию биомассы на 15%, что повысило эффективность утилизации аммония на 10% и нитратов на 4%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное диссертационное исследование представляет законченную научно-квалификационную работу по научной специальности 1.5.15. «Экология» (Технические науки). В работе описано технологическое решение проблемы загрязнения озерно-речных систем Карелии сточными водами горнодобывающих предприятий.

В работе изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения, имеющие существенное значение для развития горнодобывающей отрасли страны на территориях Крайнего Севера. 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 технические 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 ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

Термины:

Зеленые водоросли – Отдел из царства Растений. Включает в себя одноклеточные и колониальные планктонные водоросли, одноклеточные и многоклеточные формы бентосных водорослей.

Микроводоросль – они же микрофиты. Это водоросли микроскопических размеров, обитающие в донных отложениях, пресных и морских водах.

Хлорелла (*Chlorella vulgaris*) – одноклеточная пресноводная зелёная водоросль, относимая к отделу Chlorophyta.

Тест-объект – организмы, применяемые при оценки токсичности веществ и состоянии загрязнения вод, почв и др.

Суспензия – взвесь, в которой твёрдое вещество равномерно распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном состоянии.

Культивирование – Выращивание микроорганизмов в искусственных условиях.

Биореактор – установка для культивирования микроорганизмов или среды, способная поддерживать оптимальные условия выращивания.

Биомасса – совокупность массы живых организмов в биогеоценозе.

Фотобиореактор – биореактор в котором применяется искусственное освещение для культивирования фототрофных микроорганизмов.

Фотосинтез – химико-биологический процесс, использующий энергию света для преобразования воды и углекислого газа в сахар и кислород.

Миллиметровый диапазон частот – миллиметровое излучение – излучение с длиной волны 1-10мм. Такой длине волны соответствует частота колебаний 30-300ГГц, которая относится к крайне высоким частотам (КВЧ).

Скважность – безразмерная величина, один из классификационных признаков импульсных систем, определяющий отношение периода следования (повторения) импульсов к длительности импульса.

Спектрофотометрия – физико-химический метод анализа. Основан на зависимости интенсивности поглощения падающего света от длины волны

Фитопланктон – способный к фотосинтезу компонент сообщества планктона и основная его часть водных экосистем.

Пигмент – вещества придающие цвет, в растениях отвечающие за фотосинтез.

Хлорофилл – основной пигмент фотосинтеза, дающий зеленый цвет хлоропластам растений.

	Хлорофилл a	Хлорофилл b	Хлорофилл c1	Хлорофилл c2	Хлорофилл d	Хлорофилл f
Формула	$C_{55}H_{72}O_5N_4$ Mg	$C_{55}H_{70}O_6N_4$ Mg	$C_{35}H_{30}O_5N_4$ Mg	$C_{35}H_{28}O_5N_4$ Mg	$C_{54}H_{70}O_6N_4$ Mg	$C_{55}H_{70}O_6N_4$ Mg
Распространение	Везде	Большинство наземных растений	Некоторые водоросли	Некоторые водоросли	Цианобактерии	Цианобактерии

Каротиноиды – природные пигменты жёлтого, оранжевого или красного цвета, в зеленых растениях, бактериях и грибах. Делятся на каротины и ксантофиллы. Дополнительные пигменты фотосинтеза.

Феофитин – $C_{55}H_{74}N_4O_5$, молекула хлорофилла с недостающим ионом Mg^{2+} . химическое соединение, служащее одним из первых акцепторов электрона в цепи переноса электронов в реакционном центре (РЦ) фотосистемы II (ФСII) у растений, и в реакционном центре (РЦ) пурпурных бактерий.

Обозначения:

Лк – Люкс – единица измерения освещённости в Международной системе единиц (СИ). Люкс равен освещённости поверхности площадью 1 м^2 при световом потоке падающего на неё излучения, равном 1 лм.

МэВ – Мегаэлектронвольт – внесистемная единица энергии кратная электронвольту. По определению, электронвольт – это энергия, необходимая для переноса элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов в 1 В.

Гц – Герц – единица измерения частоты. 1 Гц соответствует периоду колебаний 1 колебание в секунду.

Сокращения:

ЭМП – электромагнитное поле(я).

ЛЭП – линия электропередач.

ЭМИ – электромагнитное излучение(я).

SAR (Specific Absorbed Rate) – удельная поглощенная мощность (УПМ), описывает количество поглощенной энергии на массу объекта и выражается в Вт/кг либо мВт/г.

КВЧ – крайне высокие частоты – 30-300ГГц, миллиметровый диапазон с длиной волны 1-10мм.

Хл а (б/с) – хлорофилл, а/б/с соответственно – фотосинтетические пигменты зеленых растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозовик, П. А. Изменение химического состава воды системы р. Кенти в результате техногенного влияния / П. А. Лозовик, Н. Е. Галахина // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2017. – № 3. – С. 21–35. – DOI 10.17076/lim309
2. Галахина, Н. Е. Оценка воздействия техногенных вод предприятия железорудной промышленности на систему водных объектов северной Карелии с учетом природных условий : автореф. дис. ... канд. хим. наук / Н. Е. Галахина. – Петрозаводск., 2018. – 24 с.
3. Аужанова, Н. Б. Морфологическая и систематическая характеристика хлореллы. Ее производство и применение / Н. Б. Аужанова // Научный вестник. – 2014. – № 1. – С. 113.
4. Пат. 2263141 С2 Рос. Федерация. Способ борьбы с "цветением" водоемов синезелеными водорослями / Н. И. Богданов, Б. В. Абрамов, В. К. Парамонов ; заявл. 18.08.2003 ; опубл. 27.10.2005, Бюл. № 30. – 7 с.
5. Большая медицинская энциклопедия : в 30 т. / гл. ред. Б. В. Петровский. – 3-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1974–1989. – 30 т.
6. Манукян, В. Хлорелла: зеленый корм круглый год / В. Манукян, В. Цой // Животноводство России. – 2013. – № 8. – С. 21–23.
7. Azocar, J. Efficacy and safety of Chlorella supplementation in adults with chronic hepatitis C virus infection / J. Azocar, A. Diaz // World Journal of Gastroenterology. – 2013. – Vol. 19, № 7. – P. 1085–1090. – DOI 10.3748/wjg.v19.i7.1085.
8. Kwak, J. H. Beneficial immunostimulatory effect of short-term Chlorella supplementation: enhancement of Natural Killer cell activity and early inflammatory response (Randomized, double-blinded, placebo-controlled trial) / J. H. Kwak [et al.] // Nutrition Journal. – 2012. – Vol. 11, № 1. – Art. 53. – DOI 10.1186/1475-2891-11-53.
9. Гаева, В. А. Морфология щитовидной железы свиней при включении в рацион микроводоросли хлореллы / В. А. Гаева, В. Н. Минченко, Л. Н. Гамко //

Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 2. – С. 56–60.

10. Ошуркова, Ю. Л. Влияние кормовой добавки хлореллы на некоторые показатели крови телят / Ю. Л. Ошуркова [и др.] // Молочнохозяйственный вестник. – 2015. – № 3 (19). – С. 92–100.

11. Волшенкова, Е. С. Возможность применения суспензии хлореллы как альтернатива антибиотикам в животноводстве / Е. С. Волшенкова, Д. И. Фролов // Инновационная техника и технология. – 2018. – № 2. – С. 19–22.

12. Дмитриевич, Н. П. Применение суспензий хлореллы и сценедесмуса как добавки в комбикорма для ленского осетра (*acipenserbaeri* Brandt) и клариевого сома (*clariasgariepinus* Burchell) / Н. П. Дмитриевич // Вестник Полесского государственного университета. Серия: Природоведческие науки. – 2017. – № 1. – С. 15–20.

13. Корнилова, В. А. Суспензия хлореллы в рационах кроликов / В. А. Корнилова, А. С. Ищеряков // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. – 2016. – № 5. – С. 52–56.

14. Плутахин, Г. А. Биотехнология получения хлореллы и ее применение в птицеводстве как функциональной кормовой добавки / Г. А. Плутахин [и др.] // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 31. – С. 101–104.

15. Бутова, С. Н. Использование микроводоросли хлорелла в технологии косметических средств / С. Н. Бутова, И. Д. Щеголева, К. А. Тхоржевская // Передовые пищевые технологии: состояние, тренды, точки роста. – 2018. – С. 28–36.

16. Fott, B. A monograph of the genus *Chlorella*. The fresh water species / B. Fott // *Studies in Phycology*. – 1969. – P. 10–74.

17. Колчина, О. Е. Биологическая реабилитация сточных вод при помощи водоросли хлореллы / О. Е. Колчина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2019. – № 4. – С. 126–134.

18. Семенов, Ю. В. Использование микроводоросли-хлореллы для биологической очистки воды от загрязнений нефтепродуктами / Ю. В. Семенов, Т. А. Харламова, А. В. Бодров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 11. – С. 284–290.

19. Методика определения токсичности проб поверхностных пресных, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных вытяжек из почвы, осадков сточных вод и отходов по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) : ПНД Ф Т. 14.1:2:3:4.10-04, Т 16.1:2:2.3:3.7-04 / Ю. С. Григорьев. – Утв. 2014.

20. Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению относительного показателя замедленной флуоресценции (ОПЗФ) культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) : ПНД Ф 14.1:2:4.16-09 / 16.1:2.3.3.14-09 / Ю. С. Григорьев, Е. С. Власова. – Утв. 2009.

21. Методика определения индекса токсичности нанопорошков, изделий из наноматериалов, нанопокровов, отходов и осадков сточных вод, содержащих наночастицы, по изменению оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) : ФР.1.39.2010.09103 / Ю. С. Григорьев, Ю. Н. Моргалёв, Т. Г. Моргалёва. – Утв. 2010.

22. Лазукова, А. С. Водоросль хлорелла в оперативном контроле качества очистки сточных вод // Инновационные тенденции развития российской науки. Часть II [Электронный ресурс]: мат-лы XII междунар. науч.-практ. конф. молод. учен. (8-9апреля 2019 г.) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2019. – 274 с.

23. Суховский, Н. А. Стимулирование прироста микроводоросли хлореллы электростатическим полем : дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Суховский. – М., 2015. – 145 с.

24. Сальникова, М. Я. Хлорелла – новый вид корма / М. Я. Сальникова. – М. : Колос, 1977. – 112 с.

25. Гладышев, П. А. Разработка фотобиореакторов для замкнутых экологических систем жизнеобеспечения : дис. ... канд. техн. наук / П. А. Гладышев. – 2007. – 168 с.
26. Богданова, А. А. Технологическая разработка культиватора по производству хлореллы / А. А. Богданова // Сборник научных трудов по материалам XXXIV Международной научно-практической студенческой конференции "НИРС-первая ступень в науку". – 2011. – С. 84–87.
27. Пат. 2017142638 Рос. Федерация. Способ культивирования микроводоросли *Chlorella* / Н. А. Политаева [и др.] ; заявл. 26.09.2017 ; опубл. 26.09.2018. – 8 с.
28. Тахтаджян, А. Л. Жизнь растений : в 6 т. / А. Л. Тахтаджян. – М. : Рипол Классик, 1974. – 6 т.
29. Пат. 2203938 Рос. Федерация. Установка для выращивания одноклеточных водорослей / Н. И. Богданов, А. Г. Сидорин ; заявл. 10.05.2002 ; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13. – 5 с.
30. Пат. 2218392 Рос. Федерация. Установка для выращивания хлореллы / Н. И. Богданов, М. В. Куницын ; заявл. 15.07.2003 ; опубл. 10.12.2003. – 6 с.
31. Пат. 2268923 Рос. Федерация. Установка для выращивания микроводорослей / Н. И. Богданов, М. В. Куницын ; заявл. 20.05.2005 ; опубл. 20.01.2006. – 7 с.
32. Пат. 2477040 Рос. Федерация. Установка для культивирования хлореллы / Г. Ю. Иванов, А. В. Мирзоян ; заявл. 28.06.2011 ; опубл. 10.03.2013. – 6 с.
33. Пат. 2668162 Рос. Федерация. Способ культивирования микроводоросли *Chlorella* / Н. А. Политаева [и др.] ; заявл. 21.08.2017 ; опубл. 27.09.2018. – 9 с.
34. Пат. 191241 Рос. Федерация. Установка для выращивания хлореллы / В. В. Мелихов ; заявл. 15.03.2019 ; опубл. 30.07.2019, Бюл. № 22. – 5 с.
35. Нагорнов, С. А. Исследование условий культивирования микроводоросли хлорелла в трубчатом фотобиореакторе / С. А. Нагорнов, Ю. В.

Мещерякова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 788–794.

36. Старовойтов, С. В. Влияние внешних факторов на скорость биохимических реакций микроводорослей / С. В. Старовойтов, А. С. Халил // Известия высших учебных заведений. – 2017. – № 2 (45). – С. 88–95.

37. Мещерякова, Ю. В. Культивирование микроводоросли хлорелла с целью получения биотоплива / Ю. В. Мещерякова, С. А. Нагорнов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 4 (43). – С. 33–36.

38. Заболотских, В. В. Разработка технологических подходов к получению альтернативного биотоплива из водорослей / В. В. Заболотских [и др.] // Академический вестник ELPIT. – 2019. – Т. 4, № 1 (7). – С. 12–15.

39. Нагорнов, С. А. Получение биодизельного топлива из непищевого растительного сырья / С. А. Нагорнов, Ю. В. Мещерякова, А. Г. Мещеряков // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2017. – Т. 7, № 3 (22). – С. 105–112.

40. Нагорнов, С. А. Экспериментальное исследование работы дизельного двигателя на смесевом топливе / С. А. Нагорнов, Ю. В. Мещерякова, А. Г. Мещеряков // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 1. – С. 9–11.

41. Зазуля, А. Н. Получение и испытание смесевое дизельного топлива / А. Н. Зазуля [и др.] // Наука в центральной России. – 2015. – № 4 (16). – С. 62–69.

42. Нагорнов, С. А. Улучшение свойств дизельного топлива за счет применения биодобавок / С. А. Нагорнов, Ю. В. Мещерякова, И. В. Ерохин // Инновации и инвестиции. – 2015. – № 9. – С. 148–151.

43. Кашулин, Н. А. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, Д. Б. Денисов, С. А. Валькова, О. И. Вандыш, П. М. Терентьев, А. Н. Кашулин // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 98–107.

44. Мирзаев, Г. Г. Экология горного производства : учебник для вузов / Г. Г. Мирзаев, Б. А. Иванов, В. М. Щербаков, Н. М. Проскуряков. – М. : Недра, 1991. – 320 с.
45. Сластунов, С. В. Горное дело и окружающая среда : учебник / С. В. Сластунов [и др.]. – М. : Логос, 2001. – 272 с.
46. Пашкевич, М. А. Геохимия техногенеза : учебное пособие / М. А. Пашкевич. – СПб. : СПГГИ (ТУ), 2007. – 72 с.
47. Певзнер, М. Е. Горное дело и охрана окружающей среды : учебник для вузов / М. Е. Певзнер, А. А. Малышев, А. Д. Мельков, В. П. Ушань. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та, 2001. – 300 с.
48. Солнышкова, М. А. Снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающих предприятий Мурманской области : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. А. Солнышкова. – СПб., 2020. – 24 с.
49. Рыбникова, Л. С. Оценка состояния гидросферы в верховьях бассейна реки Тагил (Свердловская обл.) / Л. С. Рыбникова, В. Ю. Наволокина // Проблемы недропользования. – 2020. – № 2 (25). – С. 81–89. – DOI 10.25635/2313-1586.2020.02.081.
50. Хохряков, А. В. Исследование процессов формирования химического загрязнения дренажных вод соединениями азота на примере карьера крупного горного предприятия / А. В. Хохряков, А. Г. Студенок, Г. А. Студенок // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 4 (44). – С. 35–37. – DOI 10.21440/2307-2091-2016-4-35-37.
51. Пашкевич, М. А. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений / М. А. Пашкевич, А. Э. Коротаева // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 170–182. – DOI 10.46698/VNC.2021.87.18.014.
52. Jermakka, J. Potential technologies for the removal and recovery of nitrogen compounds from mine and quarry waters in subarctic conditions / J. Jermakka, L. Wendling, E. Sohlberg, H. Heinonen [et al.] // Critical Reviews in Environmental

Science and Technology. – 2015. – Vol. 45, Iss. 7. – P. 703–748. – DOI 10.1080/10643389.2014.900238.

53. Гогина, Е. С. Удаление биогенных элементов из сточных вод : монография / Е. С. Гогина ; Моск. гос. строит. ун-т. – М. : МГСУ, 2010. – 120 с.

54. Швецов, В. Н. Нитрификация и денитрификация сточных вод / В. Н. Швецов, К. М. Морозова, И. А. Нечаев, Л. А. Петрова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – № 11. – С. 16–18.

55. Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учебник для вузов / Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 704 с. – ISBN 5-93093-043-8.

56. Егорова, М. А. Очистка карьерных сточных вод от соединений азота с помощью искусственно сконструированных болотных экосистем в холодных климатических условиях / М. А. Егорова, М. А. Пашкевич // Материалы 6-ой Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Тула : ТулГУ, 2016. – С. 111–114.

57. Albold, A. Constructed Wetlands. Sustainable Wastewater Treatment for Rural and Peri-Urban Communities in Bulgaria / A. Albold, C. Wendland, B. Mihaylova, A. Ergünel, H. Galt. – WECF, 2011. – 98 p.

58. Calheiros, C. S. C. Treatment of industrial wastewater with two-stage constructed wetlands planted with *Typha latifolia* and *Phragmites australis* / C. S. C. Calheiros, A. O. S. S. Rangel, P. M. L. Castro // Bioresource Technology. – 2009. – Vol. 100. – P. 3205–3213. – DOI 10.1016/j.biortech.2009.02.017.

59. Shrestha, R. Constructed Wetlands Manual / R. Shrestha [et al.]; United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT). – Kathmandu, 2008. – 88 p.

60. Gikas, G. D. Municipal wastewater treatment using constructed wetlands / G. D. Gikas, V. A. Tsihrantzis // Water Utility Journal. – 2014. – № 8. – P. 57–65.

61. Vymazal, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment / J. Vymazal // Water. – 2010. – Vol. 2, № 3. – P. 530–549. – DOI 10.3390/w2030530.

62. Пат. 2186738 Рос. Федерация. Способ биологической доочистки сточных вод / В. Н. Алешечкин, М. В. Кумани ; заявл. 09.10.2000 ; опубл. 10.08.2002, Бюл. № 22. – 6 с.

63. Пат. 2293064 Рос. Федерация. Система очистки сточных вод / О. К. Калантаров, С. М. Чесалов, Ю. Г. Симаков ; заявл. 27.07.2005 ; опубл. 10.02.2007, Бюл. № 4. – 5 с.

64. Пат. 2100292 Рос. Федерация. Способ очистки сточных вод с использованием элементов естественной экологической системы / Л. П. Овцов [и др.] ; заявл. 05.03.1996 ; опубл. 27.12.1997, Бюл. № 36. – 7 с.

65. Сиваков, Д. О. Тенденции правового регулирования водохозяйственной деятельности : монография / Д. О. Сиваков. – М. : Инфотропик Медиа, 2012. – 256 с.

66. Пат. 2397149 Рос. Федерация. Способ и сооружение очистки хозяйственно-бытовых сточных вод с использованием элементов экологической системы / В. И. Толстограй [и др.] ; заявл. 25.11.2008 ; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23. – 11 с.

67. Пат. 2356855 Рос. Федерация. Способ очистки сточных вод и устройство для его осуществления / А. В. Друцкий, А. Л. Гарсия, В. Л. Гарсия, Ю. А. Друцкая ; заявл. 31.10.2007 ; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 15. – 12 с.

68. Евдокимова, Г. И. Плавающие биоплато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в арктических условиях / Г. И. Евдокимова, Л. А. Иванова, Н. П. Мозгова, В. А. Мязин, Н. П. Фокина // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19, № 9. – С. 35–41.

69. Сивкова, Е. Е. Влияние рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.) и компонентов фильтрующей загрузки на эффективность удаления соединений азота в системах почвенно-болотной очистки сточных вод / Е. Е. Сивкова, Е. В. Прибыткова // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2010. – № 2 (14). – С. 141–149.

70. Пат. 2322399 Рос. Федерация. Способ очистки сточных вод от аммонийных солей, нитратов и нитритов / Я. И. Вайсман, Л. В. Рудакова, Е. В. Калинина ; заявл. 03.07.2006 ; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11. – 5 с.

71. Пат. 2504519 Рос. Федерация. Способ биологической доочистки сточных вод и система для его осуществления / Е. Б. Шевкун [и др.] ; заявл. 29.10.2012 ; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2. – 9 с.

72. Petrov, D. S. Phytoremediation efficiency of duckweed communities for mining enterprises wastewater treatment from nitrogen compounds / D. S. Petrov, M. A. Zhuravkova, M. A. Solnyshkova // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10, № 3. – P. 1027–1033.

73. Petrov, D. S. Phytoremediation efficiency of duckweed communities for mining enterprises wastewater treatment from nitrogen compounds / D. S. Petrov, V. S. Kuznecov, I. K. Suprun, M. A. Zhuravkova, M. A. Solnyshkova // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – Art. 055044. – DOI 10.1088/1742-6596/1399/5/055044.

74. Пат. 2572577 Рос. Федерация. Система очистки сточных вод (варианты) / Д. В. Ульрих [и др.] ; заявл. 10.06.2014 ; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2. – 7 с.

75. Пат. 2061663 Рос. Федерация. Способ биологической доочистки сточных вод / И. А. Золотохин, Е. А. Балахонова ; заявл. 10.08.1993 ; опубл. 10.06.1996, Бюл. № 16. – 5 с.

76. Пат. 2081852 Рос. Федерация. Способ очистки сточных вод / В. И. Матвеев, Н. Е. Чистяков ; заявл. 24.11.1994 ; опубл. 20.06.1997, Бюл. № 17. – 6 с.

77. Эйно́р, Л. О. Макрофиты в экологии водоема / Л. О. Эйно́р. – М. : ИВП РАН, 1992. – 255 с.

78. Сивкова, Е. Е. Использование технологии «Constructed wetlands» для очистки сточных вод малых населенных пунктов и предприятий / Е. Е. Сивкова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 8. – С. 45–50.

79. Верещагина, И. Ю. Искусственное биоплато в арктических широтах / И. Ю. Верещагина, Н. В. Василевская // Экология производства. – 2004. – № 4. – С. 18–21.
80. Korneykova, M. V. Development and optimization of biological treatment of quarry waters from mineral nitrogen in the Subarctic / M. V. Korneykova, V. A. Myazin, L. A. Ivanova, N. V. Fokina, V. V. Redkina // Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – Vol. 12, № 2. – P. 97–105. – DOI 10.24057/2071-9388-2019-5.
81. Иванова, Л. А. Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота / Л. А. Иванова [и др.]. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2021. – 145 с.
82. Семенов, С. Ю. Водно-болотная очистка сточных вод / С. Ю. Семенов, Л. И. Шелепова // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 1. – С. 37–38.
83. Ксенофонтов, Б. С. Усовершенствование технологической схемы физико-химической очистки сточных вод / Ксенофонтов Б., Козодаев А., Таранов Р., Виноградов М. // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – №. 4. – С. 10-13.
84. Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz): Environmental Health Criteria 137 / World Health Organization (WHO) [et al.]. – Geneva: WHO, 1993. – 250 p.
85. Верещако, Г. Г. Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на состояние репродуктивной системы и потомство / Г. Г. Верещако. – М. : Litres, 2022. – 198 с.
86. Сподобаев, Ю. М. Основы электромагнитной экологии / Ю. М. Сподобаев, В. П. Кубанов. – М. : Радио и связь, 2000. – 240 с.
87. Довгуша, В. В. Влияние естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности / В. В. Довгуша, М. Н. Тихонов, Л. В. Довгуша // Экология человека. – 2009. – № 12. – С. 45–50.

88. Kimball, G. C. The growth of yeast in a magnetic field / G. C. Kimball // *Journal of Bacteriology*. – 1938. – Vol. 35, № 2. – P. 109–122.
89. Глущенко, Н. А. О некоторых эффектах влияния электронно-ионной обработки на дрожжевые микроорганизмы / Н. А. Глущенко // *Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого*. – 2013. – Т. 2, № 71. – С. 56–59.
90. Yusupov, R. Disinfection of grain by electromagnetic field energy / R. Yusupov, G. Yusupova // *Motoryzacja i energetyka rolnictwa*. – 2004. – Vol. 6. – P. 289–295.
91. Бабенкова, М. А. Влияние электрофизических методов воздействия на развитие дрожжей и патогенных микроорганизмов при обработке виноградных вин / М. А. Бабенкова, В. Т. Христюк, В. Е. Струкова // *Научные труды Государственного научного учреждения Северо-Кавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства Российской академии сельскохозяйственных наук*. – 2013. – Т. 4. – С. 207–216.
92. Lipiec, J. Effect of oscillating magnetic field pulses on the survival of selected microorganisms / J. Lipiec, P. Janas, W. Barabasz // *International Agrophysics*. – 2004. – Vol. 18, № 4. – P. 361–364.
93. Al-Barzenji, H. A. The effect of static magnetic field on some oral microorganisms (an in vitro study) / H. A. Al-Barzenji, Z. Taher, R. Al-Jubouri // *The Medical Journal of Tikrit University*. – 2010. – Vol. 2, № 162. – P. 45–50.
94. Cellini, L. Bacterial response to the exposure of 50 Hz electromagnetic fields / L. Cellini, R. Grande, E. Campli [et al.] // *Bioelectromagnetics*. – 2008. – Vol. 29. – P. 302–311. – DOI 10.1002/bem.20391.
95. Zrimec, A. Alternating electric fields stimulate ATP synthesis in *Escherichia coli* / A. Zrimec, I. Jerman, G. Lahajnar // *Cellular & Molecular Biology Letters*. – 2002. – Vol. 7. – P. 172–174.
96. Chang, Y. Augmentation of mass transfer through electrical means for hydrogel-entrapped *Escherichia coli* cultivation / Y. Chang, A. Grodzinsky, D. Wang //

Biotechnology and Bioengineering. – 1995. – Vol. 48. – P. 149–157. – DOI 10.1002/bit.260480208.

97. Hirano, M. Magnetic field effects on photosynthesis and growth of the cyanobacterium *Spirulina platensis* / M. Hirano, A. Ohta, K. Abe // *Journal of Fermentation and Bioengineering*. – 1998. – Vol. 86, № 3. – P. 313–316. – DOI 10.1016/S0922-338X(98)80135-9.

98. Li, Z. Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an air-lift photobioreactor / Z. Li, S. Guo, L. Lin [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2007. – Vol. 98. – P. 700–705. – DOI 10.1016/j.biortech.2006.01.018.

99. Singh, S. Magnetobiological effects on a cyanobacterium, *Anabaena doliolum* / S. Singh, S. Tiwari, J. Abraham // *Electromagnetic Biology and Medicine*. – 1994. – Vol. 13, № 3. – P. 227–235.

100. Del Re, B. Various effects on transposition activity and survival of *Escherichia coli* cells due to different ELF-MF signals / B. Del Re, F. Bersani, C. Agostini [et al.] // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 2004. – Vol. 43. – P. 265–270. – DOI 10.1007/s00411-004-0258-3.

101. Dutta, S. Frequency-dependent alterations in enolase activity in *Escherichia coli* caused by exposure to electric and magnetic fields / S. Dutta, M. Verma, C. Blackman // *Bioelectromagnetics*. – 1994. – Vol. 15. – P. 377–383. – DOI 10.1002/bem.2250150503.

102. Justo, O. Growth of *Escherichia coli* under extremely low-frequency electromagnetic fields / O. Justo, V. Pérez, D. Alvarez, R. Alegre // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2006. – Vol. 134. – P. 155–163. – DOI 10.1385/ABAB:134:2:155.

99. Belyaev, I. Cell density dependent response of *E. coli* cells to weak ELF magnetic fields / I. Belyaev, Y. Alipov, A. Matronchik // *Bioelectromagnetics*. – 1998. – Vol. 19. – P. 300–309. – DOI 10.1002/(SICI)1521-186X(1998)19:5<300::AID-BEM4>3.0.CO;2-5.

100. Zavalin, A. Compensation Zone of Multipolar System of EM Fields Stimulates Bacterial Growth / A. Zavalin, W. Collins, S. Morgan // Proceedings of the 24th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society. – Quebec, Canada, 2002. – P. 8–9.

101. Erygin, G. Influence on microorganism growth and development of nutrient medium treatment with magnetic field / G. Erygin, V. Pchedlkina, A. Kulikova [et al.] // Prikladnaia biokhimiia i mikrobiologiiia. – 1988. – Vol. 24, № 2. – P. 257–263.

102. Ramon, C. Low-level, magnetic-field-induced growth modification on *Bacillus subtilis* / C. Ramon, J. Martin, M. Powell // Bioelectromagnetics. – 1987. – Vol. 8, № 3. – P. 275–282. – DOI 10.1002/bem.2250080306.

103. Moore, R. L. Biological effects of magnetic fields: Studies with microorganisms / R. L. Moore // Canadian Journal of Microbiology. – 1979. – Vol. 25, № 10. – P. 1145–1151. – DOI 10.1139/m79-178.

104. Hönes, I. Electrostimulation of proliferation of the denitrifying bacterium *Pseudomonas stutzeri* / I. Hönes, A. Pospischil, H. Berg // Bioelectrochemistry and Bioenergetics. – 1998. – Vol. 44, № 2. – P. 275–277. – DOI 10.1016/S0302-4598(97)00185-8.

105. Kerns, G. Electrostimulation of cellulase fermentation by pulsatile electromagnetically induced currents / G. Kerns, E. Bauer, H. Berg // Bioelectrochemistry and Bioenergetics. – 1993. – Vol. 32, № 2. – P. 89–94. – DOI 10.1016/0302-4598(93)80081-6.

106. Perov, S. Yu. Effects of 171 MHz low-intensity electromagnetic field on glucocorticoid and mineral corticoid activity of the adrenal glands of rats / S. Yu. Perov, N. B. Rubtsova, Q. Balzano // Bioelectromagnetics. – 2019. – Vol. 40, № 8. – P. 578–587. – DOI 10.1002/bem.22218.

107. Grosse, H. H. Electrostimulation during fermentation / H. H. Grosse // Bioelectrochemistry and Bioenergetics. – 1988. – Vol. 20. – P. 279–285. – DOI 10.1016/0302-4598(88)80063-0.

108. Филиппов, Е. С. Влияние электромагнитных полей на биологические объекты / Е. С. Филиппов, Е. Л. Ткачук // Сибирский медицинский журнал (Иркутск). – 2001. – Т. 24, № 1. – С. 68–71.
109. Lei, C. Electromagnetic window effects on proliferation rate of *Corynebacterium glutamicum* / C. Lei, H. Berg // *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*. – 1998. – Vol. 45, № 2. – P. 261–265. – DOI 10.1016/S0302-4598(98)00092-1.
110. Yamaoka, Y. Effect of magnetism on growth of *Dunaliella salina* / Y. Yamaoka, O. Takimura, H. Fuse [et al.] // *Research in Photosynthesis: Proceedings of the IX International Congress on Photosynthesis*. – Nagoya, Japan, 1992. – Vol. 3. – P. 87–90.
111. Wang, H. Y. Effects of magnetic field on the antioxidant defense system of recirculation-cultured *Chlorella vulgaris* / H. Y. Wang, X. B. Zeng, S. Y. Guo [et al.] // *Bioelectromagnetics*. – 2008. – Vol. 29, № 1. – P. 39–46. – DOI 10.1002/bem.20360.
112. Takahashi, F. Effect of magnetism of growth of *Chlorella* / F. Takahashi, T. Kamezaki // *Hakkokogaku*. – 1985. – Vol. 63, № 2. – P. 71–74.
113. Козьмин, Г. В. Устойчивость биоценозов в условиях изменяющихся электромагнитных свойств биосферы / Г. В. Козьмин, Е. И. Егорова // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. – 2006. – № 3. – С. 61–72.
114. Мальцев, Н. И. Хлорелла в высокочастотных полях / Н. И. Мальцев, А. Г. Шеин, Ю. Г. Яременко // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2012. – № 5. – С. 35–40.
115. Вдовина, Н. В. Аппаратно-программные средства снижения резистентных свойств условно-патогенных микроорганизмов : дис. ... канд. техн. наук / Н. В. Вдовина. – СПб., 2016. – 182 с.
116. Григорьев, Ю. Г. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России / Ю. Г. Григорьев, О. А. Григорьев, В. С. Степанов, Ю. П. Пальцев ; под ред. А. К. Демина // *Серия докладов в области охраны здоровья населения*. – М., 1997. – 56 с.

117. Девятков, Н. Д. Доклад на сессии отделения общей физики и астрономии АН СССР, 17-18 января 1973 г. / Н. Д. Девятков // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110, № 3. – С. 452–469.

118. Бецкий, О. В. Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии / О. В. Бецкий, Н. Д. Девятков, В. В. Кислов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 12. – С. 3–15.

119. Бессонов, А. Е. Концептуальные основы информационной медицины / А. Е. Бессонов, Е. А. Калмыкова. – М. : НЦИМ «Лидо», 2006. – 656 с.

120. Зацепина, Г. Н. Свойства и структура воды / Г. Н. Зацепина. – М. : Изд-во МГУ, 1974. – 166 с.

121. Уоттерсон, Д. Г. Роль воды в функционировании клетки / Д. Г. Уоттерсон // Биофизика. – 1991. – Т. 36, вып. 1. – С. 5–30.

122. Хургин, Ю. И. Медикобиологические аспекты миллиметрового излучения / Ю. И. Хургин, В. А. Кудряшова, В. А. Завизион [и др.] ; под ред. Н. Д. Девяткова. – М. : ИРЭ АН СССР, 1987. – 246 с.

123. Бецкий, О. В. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты / О. В. Бецкий, Н. Н. Лебедева // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 3 (24). – С. 5–19.

124. Бецкий, О. В. Лечение электромагнитными полями. Ч. 2 / О. В. Бецкий, Н. Д. Девятков, Н. Н. Лебедева // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 10. – С. 3–13.

125. Бецкий, О. В. Механизмы воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты (биофизический подход) / О. В. Бецкий, В. В. Кислов, Н. Н. Лебедева // Сборник докладов 11-й Росс. симп. с междунар. участием «Миллиметровые волны в медицине и биологии». – М. : ИРЭ РАН, 1997. – Т. 14. – С. 207–210.

126. Гапочка, М. Г. Влияние электромагнитного излучения низкой интенсивности на токсичность водной среды / М. Г. Гапочка // Вестник

Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2009. – № 1. – С. 55–58.

127. Гапочка, Л. Д. Механизмы функционирования водных биосенсоров электромагнитного излучения / Л. Д. Гапочка [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 3. – С. 48–55.

128. Гапочка, М. Г. Экологические аспекты взаимодействия электромагнитных полей миллиметрового диапазона с биологическими объектами : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / М. Г. Гапочка. – М., 2013. – 48 с.

129. Щеглов, Г. А. Методы исследования эффектов электромагнитного излучения на микроорганизмы / Г. А. Щеглов, В. А. Маслобоев // 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.

130. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. – Введ. 1990-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 12 с.

131. Щеглов, Г. А. Прирост биомассы *Chlorella vulgaris* при экспозиции электромагнитным излучением крайне высоких частот / Г. А. Щеглов, В. А. Маслобоев // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 11. – С. 101–106. – DOI 10.17513/use.37935.

132. Щеглов, Г. А. Стимулирование роста *Chlorella* в зависимости от длительности воздействия электромагнитного излучения крайне высоких частот / Г. А. Щеглов // 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.

133. Кирилина, Т. В. Оценка эффективности доочистки сточных вод с использованием одноклеточных и многоклеточных гидробионтов / Т. В. Кирилина, До Тхи Тху Ханг, А. С. Сироткин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 8. – С. 200–203.

134. Щеглов, Г. А. Изменение концентраций неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего предприятия микроводорослью *Chlorella vulgaris* / Г. А. Щеглов // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 191–199. – DOI 10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199.

135. Щеглов, Г. А. Возможность использования *Chlorella* для снижения антропогенной нагрузки горного производства на озерно-речную систему Карелии / Г. А. Щеглов // Труды Карельского научного центра РАН. – 2023. – № 6. – С. 107–116. – DOI 10.17076/lm1789.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Документы, подтверждающие использование результатов
диссертационной работы

Акт о внедрении ООО «Ловозерский ГОК»

Генеральный директор
ООО «Ловозерский ГОК»


«08»  2025

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Результаты диссертационного исследования Щеглова Глеба Андреевича на тему «Разработка технологии очистки сточных вод от неорганических соединений азота в условиях северных широт России (на примере предприятия АО «Карельский окатыш»», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, представляют практический интерес и будут использованы при разработке технических решений на ООО «Ловозерский ГОК».

Главный эколог



Ю.В. Степанов

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

АОУП «Мурманскводоканал»

А.А. Березин

11.01.2025 г.



АКТ

о внедрении (использовании) результатов
кандидаткой диссертации
Щеглова Глеба Андреевича

Результаты диссертационного исследования Щеглова Глеба Андреевича на тему «Разработка технологии очистки сточных вод от неорганических соединений азота в условиях северных широт России (на примере предприятия АО «Карельский окатыш»)», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, носят прикладной характер и будут рассмотрены для внедрения в цикл предприятия.

Начальник цеха АВКС

подпись

Д.Г. Терех



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Филиал федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Мурманский арктический университет»
в г. Апатиты
(Филиал МАУ в г. Апатиты)

ул. Лесная, 29, г. Апатиты,
Мурманской обл., 184209
Тел. 8(8 1555) 7 45 00 Факс: 8(8 1555) 7 40 66
e-mail: apatity@arcticsu.ru

ИНН/КПП 5190100176/511802001

03.09.2025 № 36/1/509

На № _____ от _____

Российский химико-технологический
университет имени Д.И. Менделеева

Диссертационный совет
1.5.15. Экология (технические науки)

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования

Щеглова Глеба Андреевича
в образовательном процессе

Диссертационное исследование Г.А. Щеглова на тему: «Разработка технологии очистки сточных вод от неорганических соединений азота в условиях северных широт России (на примере предприятия АО «Карельский окатыш»)» выполнено в Институте проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.

Научные результаты исследования внедрены в учебный процесс Апатитского филиала Мурманского арктического университета, в частности используются:

– на кафедре физики, биологии и инженерных технологий в качестве компонентов образовательной программы 06.03.01 Биология (профиль Биофизика), в том числе, в рамках учебных дисциплин «Радиационная биофизика», «Основы бионанотехнологии» и в процессе прохождения производственной практики (научно-исследовательской работы);

– на кафедре горного дела, наук о Земле и природообустройства в качестве компонентов образовательной программы 21.05.04 Горное дело (профиль Обогащение полезных ископаемых) в рамках учебного курса «Очистка сточных вод и оборотное водоснабжение» и пр.

Использованы следующие результаты диссертационного исследования:

1. Технология стимулирования скорости роста микроводорослей электромагнитным излучением Крайне Высоких частот.

2. Технология очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота с применением микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

3. Методика культивирования микроводорослей на безазотной среде.

Практические результаты диссертационной работы Г.А. Щеглова используются в рамках лабораторных практикумов и практических занятий студентов.

Использование указанных результатов в учебном процессе позволяет студентам расширить свои знания и навыки применения современных экологически безопасных технологий очистки сточных вод в горнодобывающей отрасли, актуальных методах проектирования и разработки новых биотехнологий; а также освоить биофизические основы технологий очистки.

Директор филиала МАУ в г. Апатиты

Подпись *Островской О.М.*

ЗАВЕРЯЮ

ПОМОЩНИК ДИРЕКТОРА *Чемарева Р.М.*
ФИЛИАЛА МАУ В Г. АПАТИТЫ



О.М. Островская



Тел. + 7 (812) 660-57-13
E-mail: TK113@eipc.center

30.04.2025 № 07-2/TK113/506

Диссертационный совет
РХТУ. 1.5.01
Российский химико-технологический
университет имени Д.И. Менделеева
125047 Российская Федерация,
г. Москва,
Миусская пл. д. 9

Об использовании результатов
диссертационного исследования

Технический комитет по стандартизации ТК 113 «Наилучшие доступные технологии» подтверждает, что результаты научных исследований Щеглова Глеба Андреевича, изложенные в диссертационной работе на тему «Разработка технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота в условиях северных широт России», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.5.15 – Экология (технические науки), рассмотрены членами Экспертного сообщества по наилучшим доступным технологиям.

Подтверждаем, что результаты научных исследований Щеглова Глеба Андреевича нашли применение при актуализации информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 8-2022 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях».

Заместитель председателя ТК 113

М.В. Бегак

Акт о внедрении МурманЭКОпроект

МурманЭКОпроект

ИНН 5102002060/КПП 510201001,
 ОГРН 1165190057471,
 Юр. адрес: 184207, Российская Федерация,
 Мурманская область, г. Апатиты,
 ул. Строителей д. 93 оф. 36,
 Эл. почта: MURMANECO@YANDEX.RU,
 Корп. тел. +7 (911)-308-03-01

Диссертационный совет
 РХТУ. 1.5.01
 Российский химико-
 технологический
 университет имени Д.И. Менде-
 лева
 125047 Российская Федерация,
 г. Москва,
 Миусская пл.. д. 9

№ 77 от 04.12.25 г.

на № _____

«Об использовании результатов диссертационного исследования»

Проектной организацией ООО Мурманэкопроект были рассмотрены результаты научных исследований Щеглова Глеба Андреевича, изложенные в диссертационной работе на тему «Разработка технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота в условиях северных широт России», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.5.15 – Экология (технические науки).

Настоящим заключаем, что внедрение результатов исследования на горнодобывающих предприятиях позволит достигнуть значительный и обоснованный эколого-экономический эффект в части снижения стоимости платы за негативное воздействие что, как следствие, снизит негативные финансовые риски для существующего производства.

Руководитель



Р.И. Гайнанова



Общество с ограниченной ответственностью «Мурманэкопроект»,
 ФИЛИАЛ "ЦЕНТРАЛЬНЫЙ" БАНКА ВТБ (ПАО), р/с 40702810228500001646,
 БИК 044525411, к/с 30101810145250000411

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2025625718

«ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ЗА 1997-2024 ГОДЫ»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (RU)*

Авторы: *Щеглов Глеб Андреевич (RU), Маслобоев Андрей Владимирович (RU)*



Заявка № 2025625372

Дата поступления 27 ноября 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 04 декабря 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение 2. Сводная таблица содержания элементов и свойств воды

Показатель	Точки отбора						Норматив*
	min	среднее	max	3(поступ)	4	1(сброс)	
T, °C	0,9	11,56	20,9	18	18,8	18,9	-
pH	7,3	7,95	9,4	7,4	7,5	7,4	6.9-9,0
O ₂ , мг/л (пов.сл)	8,4	10,61	13,2	8,7	8,5	8,4	>6
ОВП, мВ	52	161,55	214	188	170	183	-
TDS, ppm	507	579,00	638	638	574	610	-
ЕС, мкСм/см	1014	1142,88	1234	1210	1150	1160	-
NH ₄ ⁺	0,05	0,37	1,07	0,2	0,05	0,08	0,5
NO ₂ ⁻	0,04	0,19	0,36	0,18	0,17	0,12	0,08
NO ₃ ⁻	8,4	29,7	72,0	28,9	25,8	27,1	26,2
PO ₄ ³⁻	0,002	0,01	0,01	<0.25	<0.25	<0.25	0,15
SO ₄ ²⁻	384	492	556	526	511	522	300
K	82	177	228	210	203	200	50
Li	0,039	0,132	0,43	0,076	0,076	0,075	0,08
Mn	0,003	0,057	0,18	0,01	0,005	0,003	0,01
Fe	0,05	0,1	0,442	0,06	0,05	0,05	0,1
Na	33	33,5	34	-	-	-	26,4
Ca	74	74,5	75	-	-	-	60,1
Mg	32	32	32	-	-	-	25,8
Cl	22	22,5	23	-	-	-	300
Ni	0,01	0,01	0,01	-	-	-	0,01
БПК ₅	0,89	0,96	1,02	-	-	-	2,43
ХПК	11,13	11,47	11,8	-	-	-	30
Нефтепродукты	0,01	0,01	0,01	-	-	-	0,04
Взвеш. в-ва	0,8	19	79	22	15	0,8	4
Сухой ост.	963	1049	1174	1037	1033	1174	1000

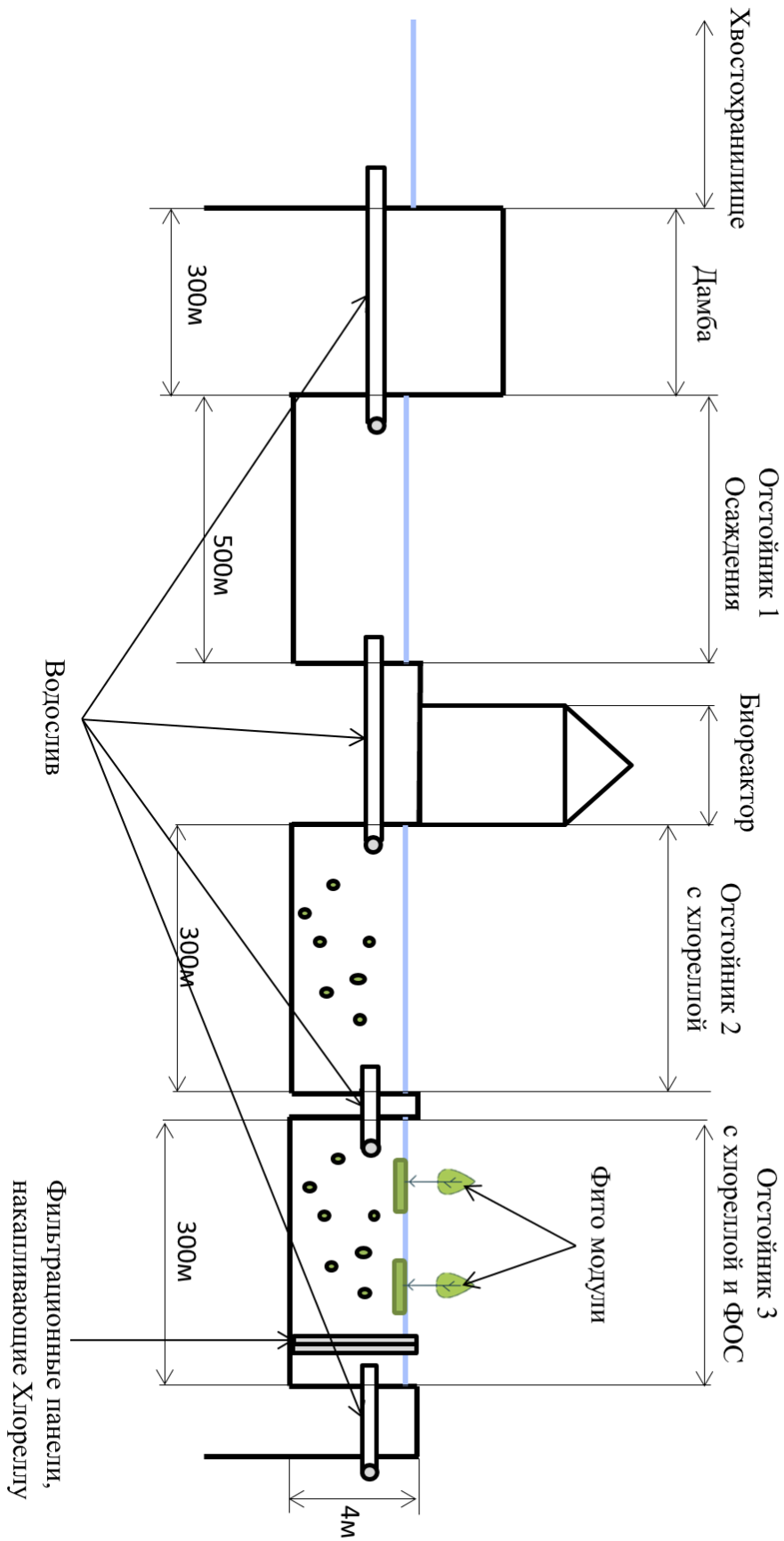
Расчет среднего, максимального и минимального значения по значениям отбора воды в 2021, 2022, 2023 года в июле, сентябре, октябре, декабре; по трем точкам отбора.

Концентрации в точках отбора в таблице по результатам анализа проб воды отобранных в июле 2023 года.

* - согласно норматива предельно допустимых сбросов, установленных для субъекта хозяйственной деятельности.

Приложение 3. Схема модернизации очистных сооружений

Принципиальная схема системы предлагаемого очистного сооружения (вспомогательные конструкции и устройства не отражены)



Приложение 4. Экономическое обоснование технологии

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОВОДОРОСЛИ *CHLORELLA VULGARIS* И СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА ОТСТОЙНИКА СБРОСНЫМ ТЕПЛОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»

Введение. В работе представлено комплексное экономическое обоснование внедрения ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод от соединений азота. Технология основана на стимуляции естественных биологических процессов в существующем отстойнике хвостохранилища №3 за счет поддержания оптимальной температуры воды +26°C. Нагрев осуществляется с использованием сбросного тепла обжиговой машины производства окатышей. Проведенные расчеты демонстрируют высокую экономическую эффективность проекта: срок окупаемости капитальных вложений составляет 2,7 года при годовом чистом экономическом эффекте 75,6 млн рублей.

Актуальность решения проблемы очистки сточных вод горно-обогатительных комбинатов (ГОК) от соединений азота обусловлена ужесточением экологического законодательства и значительными финансовыми издержками предприятий, связанными со сверхнормативными экологическими платежами. Традиционные методы очистки зачастую требуют высоких капитальных и эксплуатационных затрат. В качестве альтернативы предлагается технология, сочетающая:

- Биологический компонент: Использование микроводоросли *Chlorella vulgaris*, эффективно утилизирующей соединения азота в процессе роста.
- Теплотехнический компонент: Поддержание температуры воды в открытом отстойнике на уровне +26°C, что является оптимальным для метаболизма гидробионтов.
- Ресурсосберегающий компонент: Утилизация сбросного низкопотенциального тепла от технологического оборудования предприятия (обжиговой машины), что минимизирует эксплуатационные расходы.

Целью данного обоснования является расчет экономических показателей внедрения данной технологии на примере отстойника №3 хвостохранилища АО «Карельский окатыш».

Исходные данные и методика расчета:

Объем отстойника №3 (V): 80 000 м³.

Целевая температура воды: +26°C.

Среднегодовая температура воды в отстойнике без подогрева: +8°C

Период работы системы: круглогодично (365 дней).

Протяженность теплотрассы от источника тепла до отстойника (L): 10 км.

Годовой объем сброса сточных вод: 15,224 млн м³ (по данным 2021 г.).

Фактическая концентрация нитрат-иона (NO₃⁻): 34,7 мг/дм³.

Фактическая концентрация аммоний-иона (NH₄⁺): 1,07 мг/дм³.

Норматив ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза №552):

NO_3^- : 26,2 мг/дм³.

NH_4^+ : 0,5 мг/дм³.

Ставка платы за сброс 1 тонны азота аммонийного и нитратного в пределах лимита на 2024 г. (с учетом коэффициента 1,21 для бассейна Балтийского моря): 133 769 руб./т.

Расчет платы за сверхлимитные выбросы

На основе данных объема водосброса и содержания поллютантов выполнен помесечный расчет платы за сверхлимитный сброс аммоний-иона и нитрат-иона.

Исходные данные для расчета:

Нормативы ПДК р.х. (согласно Отчету и Приказу Минсельхоза № 552):

Аммоний-ион (NH_4^+): 0.5 мг/дм³

Нитрат-ион (NO_3^-): 26.2 мг/дм³

Фактические концентрации:

Аммоний-ион (NH_4^+): 1.07 мг/дм³

Нитрат-ион (NO_3^-): 34.7 мг/дм³

Ставки платы за сброс 1 тонны в пределах лимита на 2024 год (с учетом коэффициента 1,21 для бассейна Балтийского моря):

Аммоний-ион (в пересчете на азот, N): 110 553 руб. * 1,21 = 133 769 руб./т

Нитрат-ион (в пересчете на азот, N): 110 553 руб. * 1,21 = 133 769 руб./т

Примечание: Поскольку сброс исключительно сверхлимитный, ставка умножается на 5.

Формула для расчета помесечной платы по каждому веществу:

Плата = (Факт. конц. - ПДК) * Объем сброса * Ставка * 5

Расчет для Аммоний-иона (NH_4^+):

Превышение концентрации = 1.07 - 0.5 = 0.57 мг/дм³ = 0.57 г/м³

Масса сверх лимита (т) = (0.57 г/м³ * Объем сброса (м³)) / 1 000 000

Расчет для Нитрат-иона (NO_3^-):

Превышение концентрации = 34.7 - 26.2 = 8.5 мг/дм³ = 8.5 г/м³

Масса сверх лимита (т) = (8.5 г/м³ * Объем сброса (м³)) / 1 000 000

Таблица 7.1. Объемы водоотведения по месяцам за 2021 год

Месяц 2021 года	Объем сброса, тыс. м ³	Аммоний-ион (NH_4^+)		Нитрат-ион (NO_3^-)		Сумма платы за месяц, руб.	Температура воды, °С
		Масса сверх лимита, т	Плата, руб.	Масса сверх лимита, т	Плата, руб.		
Январь	625.09	0.356	238 200	5.313	3 553 900	3 792 100	1
Февраль	575.61	0.328	219 400	4.893	3 272 500	3 491 900	1
Март	561.61	0.320	214 100	4.774	3 193 100	3 407 200	1
Апрель	1 130.43	0.644	430 800	9.609	6 426 400	6 857 200	5
Май	1 660.72	0.947	633 200	14.116	9 440 600	10 073 800	11
Июнь	1 872.05	1.067	713 700	15.912	10 642 900	11 356 600	15
Июль	2 034.97	1.160	775 900	17.297	11 569 500	12 345 400	18

Август	2 365.77	1.348	901 800	20.109	13 448 300	14 350 100	19
Сентябрь	1 831.65	1.044	698 300	15.569	10 413 500	11 111 800	14
Октябрь	878.01	0.500	334 500	7.463	4 991 500	5 326 000	5
Ноябрь	874.81	0.499	333 600	7.436	4 973 200	5 306 800	2
Декабрь	813.59	0.464	310 200	6.915	4 625 300	4 935 500	1
ИТОГО	15 223.90	8.68	5 805 500	129.41	86 550 700	92 356 200	1

Суммарная годовая плата: Предприятие ежегодно выплачивает около 92,4 миллиона рублей только за сверхлимитный сброс соединений азота (аммонийного и нитратного).

Ярко выраженная сезонность: Платежи напрямую зависят от объема сточных вод. В летние месяцы (июль, август) они достигают пика, превышая 14 миллионов рублей в месяц, тогда как в зимний период (январь-март) снижаются до 3,5-4 миллионов рублей.

Структура платежей: Основную долю в платежах (около 94%) составляет плата за нитрат-ион. Это связано с гораздо большей массой его сверхлимитного сброса, несмотря на то, что ставка для азота аммонийного и нитратного одинакова.

Экономический стимул: Данный расчет наглядно показывает, что инвестиции в эффективные системы очистки, способные работать в период паводка и интенсивного сброса (апрель-сентябрь), окупятся быстрее всего за счет сокращения именно этих пиковых платежей.

Экономическая оценка внедрения системы очистки.

На основе анализа диссертации подготовлено комплексное экономическое обоснование внедрения технологии биологической очистки с использованием *Chlorella vulgaris* и ЭМИ КВЧ.

Годовая плата за сверхлимитный сброс соединений азота составляет: 92,4 млн рублей/год. Основной объем платежей (94%) приходится на нитраты. Пиковые платежи наблюдаются в летние месяцы (июль-август) и достигают 14,3 млн руб./мес.

Предлагаемое технологическое решение: Использование микроводоросли *Chlorella vulgaris* с предварительной стимуляцией ЭМИ КВЧ частотой 40 ГГц в течение 2 часов.

Ключевые преимущества технологии:

- Ускорение роста биомассы в 6,84 раза
- Эффективность удаления аммония: 93% за 4 дня
- Эффективность удаления нитратов: до 96% за 11 дней

Ключевые недостатки:

- Эффективная работа при температуре 26°C.

Расчет потребности в биомассе водорослей:

Исходные данные:

Объем сточных вод за период май-сентябрь: 15 223,9 тыс. м³

Средняя концентрация нитратов: 34,7 мг/дм³

Требуемое снижение концентрации: до ПДК (26,2 мг/дм³)

Необходимое удаление нитратов: 8,5 мг/дм³ = 8,5 г/м³

Общая масса нитратов для удаления:

$$15\,223\,900\text{ м}^3 \times 8,5\text{ г/м}^3 = 129\,403\text{ кг} = 129,4\text{ тонны N-NO}_3$$

Потребность в биомассе водорослей:

Согласно экспериментальным данным, 1 г биомассы водоросли способен утилизировать до 0,15 г азота.

$$129\,403\text{ кг N} \div 0,15\text{ кг N/кг биомассы} = 862\,687\text{ кг биомассы} = 863\text{ тонны}$$

С учетом стимуляции ЭМИ КВЧ (ускорение роста в 6,84 раза):

$$863\text{ т} \div 6,84 = 126\text{ тонна биомассы}$$

Расчет стоимости биореактора с ЭМИ КВЧ

Таблица 7.2. Компоненты системы

Компонент	Количество	Стоимость, руб.	Общая стоимость, руб.
Биореакторы (емкости 100 м ³)	10 шт.	500 000	5 000 000
Система аэрации	10 компл.	150 000	1 500 000
Система освещения LED	10 компл.	200 000	2 000 000
Генераторы ЭМИ КВЧ 40 ГГц	10 шт.	200 000	2 000 000
Система фильтрации (биотекстиль)	1 компл.	1 000 000	1 000 000
Монтаж и пусконаладка	-	-	2 500 000
ИТОГО			14 000 000

Таблица 7.3. Эксплуатационные расходы

Статья расходов	Стоимость за год, руб.
Электроэнергия (ЭМИ, аэрация, освещение)	800 000
Техническое обслуживание	500 000
Замена фильтров	300 000
Приготовление питательной среды	400 000
ИТОГО	2 000 000

Экономический эффект:

Текущие платежи: 92,4 млн руб.

Ожидаемое снижение концентраций: 90%

Экономия: $58,2 \times 0,9 = 83,16$ млн руб.

Годовой экономический эффект:

$$83\,160\,000 - 2\,000\,000 = 81\,160\,000\text{ руб.}$$

Выводы и рекомендации. Технология показывает высокую эффективность, однако для достижения высокой степени очистки круглогодично требуется внедрение системы подогрева воды. Экологическая безопасность - биомасса может утилизироваться как удобрение.

Подбор способа подогрева.

Внедрение биологических методов очистки требует поддержания температуры воды 26°C. Поэтому для внедрения технологии требуется подобрать источник тепла для соблюдения температурного режима.

Ключевые вводные:

Целевая температура для эффективной очистки: +26°C

Объем очищаемых стоков (Отстойник №3): 80 000 м³

Период работы: Круглогодичный

Протяженность теплотрассы для вариантов с подогревом: 10 км.

Эффективность очистки (для всех вариантов): 90%
 Годовые платежи за сверхлимит по азоту: 92.4 млн руб.

Таблица 7.4. Сравнения вариантов подогрева

Критерий	Вариант 1: Биореакторы на месте	Вариант 2: Подогрев отстойника (Сбросное тепло)	Вариант 3: Подогрев отстойника (Тепловые насосы)	Вариант 4: Подогрев отстойника (Котельная)
Суть технологии	Создание замкнутых биореакторов полного цикла очистки рядом с отстойником.	Нагрев воды в открытом отстойнике №3 до +26°C с использованием сбросного тепла обжиговой машины.	Нагрев воды в открытом отстойнике №3 с помощью тепловых насосов, утилизирующих тепло вентиляционных выбросов.	Нагрев воды в открытом отстойнике №3 от собственной котельной.
Капзатраты (CAPEX), млн руб.	~657	~190	~180	~195
Эксплуатационные расходы (OPEX), млн руб./год	~46.7 (Электричество, реагенты, зарплата, ремонт)	~5.5 (Только электричество на насосы, тепло - бесплатно)	~8.5 (Электричество на насосы и ТН, COP=3.5)	~50.2 (Покупка тепла ~38.7 млн + эл-во ~7.5 млн + ремонт ~4 млн)
Годовая экономия на платежах, млн руб.	~83.2 млн (90% от 92.4 млн)	~83.2 млн (90% от 92.4 млн)	~83.2 млн (90% от 92.4 млн)	~83.2 млн (90% от 92.4 млн)
Чистый годовой экономический эффект, млн руб.	36.5 (83.2 - 46.7)	77.7 (83.2 - 5.5)	74.7 (83.2 - 8.5)	33.0 (83.2 - 50.2)
Срок окупаемости, лет	~18.0	~2.45	~2.54	~5.9
Технологические риски	Высокие. Сложность поддержания культуры в 92 реакторах.	Низкие. Простая и надежная схема теплообмена.	Средние. Зависимость от КПД тепловых насосов.	Низкие. Отработанная технология.
Ключевой вывод	Крайне высокая стоимость создания "искусственной среды".	Наилучший вариант. Использование "дармового" тепла.	Очень хорошая альтернатива, если нет доступа к сбросному теплу.	Дорогой в эксплуатации из-за стоимости покупного тепла.

Анализ способов подогрева и рекомендация:

1. Ранжирование вариантов по экономической эффективности:

Вариант 2 (Подогрев от сбросного тепла): Лучший. Обладает самым низким сроком окупаемости (~2,5 года) и высочайшим годовым экономическим эффектом благодаря практически нулевой стоимости тепловой энергии.

Вариант 3 (Подогрев от тепловых насосов): Эффективная альтернатива. Но срок окупаемости немного дольше (2.54 года).

Вариант 4 (Подогрев от Котельной): Приемлемый, но значительно менее эффективный. Высокие ОРЕХ снижают экономическую эффективность. Срок окупаемости почти 6 лет.

Вариант 1 (Биореакторы): Наименее эффективный. Крайне высокие CAPEX и высокие ОРЕХ приводят к самому долгому сроку окупаемости (18 лет), несмотря на ту же эффективность очистки.

2. Ключевое преимущество вариантов с подогревом отстойника:

Все варианты с подогревом (2, 3, 4) используют отстойник как готовый биореактор. Это позволяет избежать колоссальных капитальных затрат на создание искусственных сооружений (Вариант 1) и сократить операционные расходы до минимума, сводя их в основном к затратам на энергоноситель для самого подогрева.

3. Чувствительность к стоимости энергоносителя:

Вариант 2 нечувствителен к росту тарифов на газ/мазут.

Варианты 3 и 4 напрямую зависят от тарифов на электроэнергию и топливо соответственно. Их экономика может ухудшиться при их значительном росте.

Итоговая рекомендация для АО «Карельский окатыш»

Реализация Варианта 2 – подогрев отстойника №3 за счет сбросного тепла обжиговой машины.

Обоснование:

Максимальная окупаемость: ~2,5 года.

Минимальные риски: Используется надежная теплотехника и проверенный источник тепла.

Использование внутреннего ресурса: Превращает статью технологических потерь (сбросное тепло) в инструмент заработка (сокращение экологических платежей).

Устойчивость: Экономика проекта не зависит от внешних тарифов на энергоносители.

План действий:

Провести детальный энергоаудит обжигового цеха для точного определения параметров сбросного тепла (температура, расход).

Выполнить технико-коммерческое предложение на проектирование узла отбора тепла и теплотрассы.

Включить проект в инвестиционную программу предприятия. Это решение не только экологическую задачу, но и экономически целесообразно.

Методика расчета:

Эффективность очистки (η): Принята равной 90% исходя из лабораторных данных по работе *Chlorella vulgaris* при температуре +26°C.

Капитальные затраты (CAPEX): Рассчитывались как сумма затрат на строительство теплотрассы и монтаж узла отбора тепла.

Эксплуатационные расходы (ОРЕХ): Включают затраты на электроэнергию для циркуляционных насосов и техническое обслуживание системы. Стоимость тепловой энергии принята равной нулю, так как используется сбросное тепло.

Экономия: Определяется как произведение годовых сверхлимитных платежей на эффективность очистки.

Срок окупаемости (T_r): Рассчитывался по формуле: $T_r = \text{CAPEX} / (\text{Экономия} - \text{ОРЕХ})$.

Расчет капитальных затрат (CAPEX):

Капитальные затраты включают создание системы транспорта тепла и интеграцию ее с источником.

Таблица 7.5. Строительство теплотрассы (L = 10 км):

Наименование работ и материалов	Ед. изм.	Кол-во	Стоимость, руб.	Сумма, руб.
Труба в ППУ изоляции Ду150	м	10 000	5 000	50 000 000
Опоры и компенсаторы	шт.	400	25 000	10 000 000
Земляные работы (траншея 2м)	м ³	60 000	800	48 000 000
Устройство каналов (ж/б лотки)	м	10 000	4 000	40 000 000
Монтаж и сварка труб	м	10 000	2 000	20 000 000
Опрессовка и пуско-наладка	комл.	1	5 000 000	5 000 000
ИТОГО по теплотрассе				173 000 000

Таблица 7.6. Оборудование для подогрева отстойника и узла отбора тепла:

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Стоимость, руб.	Сумма, руб.
Пластинчатый теплообменник (доп. на источнике)	шт.	1	3 500 000	3 500 000
Теплообменник для отстойника	шт.	1	4 000 000	4 000 000
Циркуляционные насосы	шт.	4	500 000	2 000 000
Запорная арматура	комл.	1	1 500 000	1 500 000
Автоматика и КИП	комл.	1	3 000 000	3 000 000
Монтаж и обвязка	комл.	1	4 500 000	4 500 000
ИТОГО по оборудованию				18 500 000

Общие капитальные затраты (CAPEX):

$$\text{CAPEX} = 173\,000\,000 + 18\,500\,000 = 191\,500\,000 \text{ руб.}$$

4. Расчет эксплуатационных расходов (ОРЕХ)

4.1. Тепловая нагрузка:

$$\Delta T = 26 - 8 = 18^\circ\text{C}$$

Мощность для компенсации теплопотерь ($Q_{\text{пот}}$):

$Q_{\text{пот}} = \alpha * S * \Delta T$, где α – коэффициент теплопередачи, S – площадь зеркала отстойника (~20 000 м²).

$$\text{При } \alpha \approx 20 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C: } Q_{\text{пот}} = 20 * 20\,000 * 18 = 7\,200\,000 \text{ Вт} = 7,2 \text{ МВт.}$$

Годовая потребность в тепле (W_T):

$$W_T = Q_{\text{пот}} * 24 \text{ ч/сут} * 365 \text{ сут/год} = 7,2 * 24 * 365 = 63\,072\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год.}$$

Стоимость тепла: 0 руб./кВт*ч (сбросное тепло).

4.2. Затраты на электроэнергию:

Мощность циркуляционных насосов ($N_{\text{нас}}$): 100 кВт.

Годовое потребление электроэнергии насосами ($W_{\text{эл}}$):

$$W_{\text{эл}} = N_{\text{нас}} * 24 * 365 = 100 * 24 * 365 = 876\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год.}$$

Стоимость электроэнергии: 5 руб./кВт*ч (промышленный тариф).

Затраты на электроэнергию: $876\,000 * 5 = 4\,380\,000$ руб./год.

4.3. Прочие расходы:

Техническое обслуживание (2% от CAPEX оборудования): $18\,500\,000 * 0,02 = 370\,000$ руб./год.

Заработная плата обслуживающего персонала (0,5 ставки инженера): $60\,000$ руб./мес. * 12 мес. = $720\,000$ руб./год.

ОБЩИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ (ОРЕХ):

$ОРЕХ = 4\,380\,000 + 370\,000 + 720\,000 = 5\,470\,000$ руб./год.

5. Расчет экономической эффективности

5.1. Годовая экономия на экологических платежах (Э):

$Э = P_{\text{рау}} * \eta = 92\,356\,200 * 0,90 = 83\,120\,580$ руб./год.

5.2. Чистый годовой экономический эффект (ЧГЭ):

$ЧГЭ = Э - ОРЕХ = 83\,120\,580 - 5\,470\,000 = 77\,650\,580$ руб./год.

Сводный расчет капитальных и эксплуатационных затрат

Капитальные затраты (CAPEX):

- Система подогрева отстойника: 191 500 000 руб.
- Биореакторы и оборудование для биологической очистки: 14 000 000 руб.

• **ИТОГО CAPEX: 204 000 000 руб.**

Эксплуатационные расходы (ОРЕХ) в год:

- Поддержание системы подогрева: 5 500 000 руб./год
- Эксплуатация биологической системы очистки: 2 000 000 руб./год
- **ИТОГО ОРЕХ: 7 500 000 руб./год**

Экономический эффект:

- Годовая экономия на экологических платежах: 83 120 580 руб.
- Чистый годовой экономический эффект: $83\,120\,580 - 7\,500\,000 = 75\,620\,580$ руб./год

Срок окупаемости комплекса:

- $CAPEX / \text{Чистый годовой эффект} = 205\,500\,000 / 75\,620\,580 = 2,7$ года

Выводы

1. Комплексный подход демонстрирует высокую экономическую эффективность - срок окупаемости 2,7 года при общих капитальных вложениях 205,5 млн рублей.

2. Синергетический эффект технологий подогрева и биологической очистки обеспечивает:

- Стабильную работу системы очистки круглогодично;
- Максимальную эффективность удаления соединений азота;
- Минимальные эксплуатационные расходы благодаря использованию сбросного тепла;

3. Технологическая надежность решения основана на:

- Использовании проверенного теплотехнического оборудования;
- Применении естественных биологических процессов;

- Минимальной зависимости от внешних факторов;

Рекомендации по внедрению для АО «Карельский окатыш»

Этап 1. Подготовительный (6 месяцев):

1. Провести детальный энергоаудит обжигового цеха для точного определения параметров сбросного тепла;
2. Выполнить лабораторные испытания технологии с реальными сточными водами предприятия;
3. Разработать техническое задание на проектирование;

Этап 2. Реализация (18 месяцев):

1. Строительство теплотрассы и монтаж системы подогрева;
2. Создание инфраструктуры для биологической очистки;
3. Пусконаладочные работы и запуск системы в эксплуатацию;

Этап 3. Эксплуатация (постоянно):

1. Мониторинг эффективности очистки;
2. Оптимизация режимов работы системы;
3. Постепенное масштабирование технологии на другие отстойники;

Преимущества комплексного внедрения:

- Ежегодная экономия на экологических платежах: 83,1 млн рублей;
- Снижение негативного воздействия на окружающую среду;
- Соответствие требованиям природоохранного законодательства;
- Создание репутации экологически ответственного предприятия;

Риски и меры по их минимизации:

- Технологический риск: тщательные предварительные испытания;
- Финансовый риск: поэтапное финансирование проекта;
- Эксплуатационный риск: обучение персонала и создание регламентов.

Комплексное внедрение технологии биологической очистки с подогревом отстойника рекомендуется включить в инвестиционную программу предприятия как высокоэффективный проект с быстрой окупаемостью и значительным экологическим эффектом.