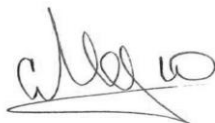


На правах рукописи

Солнышкова Маргарита Андриановна



**СНИЖЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД
НЕОРГАНИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ АЗОТА В
ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ
ПРЕДПРИЯТИЙ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Специальность 25.00.36 – Геоэкология
(в горно-перерабатывающей промышленности)*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Пашкевич Мария Анатольевна

Официальные оппоненты:

Алексеевко Владимир Алексеевич

доктор геолого-минералогических наук, профессор, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», кафедра «Безопасность производств», профессор.

Антонинова Наталья Юрьевна

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория экологии горного производства, заведующая лабораторией.

Ведущая организация – Научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (акционерное общество)

Защита состоится 24 сентября 2020 г. в 15 ч. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на веб-сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Одна из главных экологических проблем при отработке месторождений полезных ископаемых открытым способом – образование и отведение многотоннажных карьерных сточных вод, загрязненных неорганическими соединениями азота. Проблема вызвана использованием азотсодержащих взрывчатых веществ при добыче полезных ископаемых. Ежегодно в Мурманской области в процессе добычи полезных ископаемых образуется порядка 225,78 млн. м³ азотсодержащих сточных вод.

Строительство масштабных очистных сооружений, позволяющих снизить концентрации загрязняющих веществ до нормативов качества воды в водных объектах рыбохозяйственного значения, часто не оправдывает себя вследствие значительных капитальных и эксплуатационных затрат, сложности в обслуживании.

Альтернативой использования традиционной реагентной очистки сточных вод может являться применение естественной биологической очистки воды с помощью искусственно сконструированных болотных экосистем – «constructed wetland».

«Constructed wetland» – это искусственно созданные болотные экосистемы, использующие растения (в основном болотные), почвы и микроорганизмы для обеспечения физических, химических и биологических процессов очистки сточных вод.

Решение задач по вопросу совершенствования очистки сточных вод с помощью искусственно сконструированных болотных экосистем, в частности увеличения эффективности извлечения такими системами соединений азота, возможности использования систем «constructed wetland» в арктических широтах, позволит снизить нагрузку на поверхностные воды от разработки месторождений полезных ископаемых.

Исследование возможности использования высшей водной растительности для очистки сточных вод началось во второй половине XX века и продолжается до настоящего момента. Разработки оптимальной системы «constructed wetland», обеспечивавшей наилучшие показатели очистки сточных вод, ведутся в разных странах мира.

Исследования прошлых лет доказывают, что различные виды высших водных растений способны аккумулировать соединения азота из воды, таким образом, осуществляя очистку сточных вод. Большой вклад в изучение способности растений участвовать в очищении водоемов внес Эйнор Л.О. Среди российских ученых вопросами очистки сточных вод с использованием биоплато занимались В.Н. Алешечкин, О.К. Калантаров, Я.И. Вайсман, Е.Б. Шевкун, Д.В. Ульрих.

Большинство указанных исследований подтверждают существование проблемы обеспечения круглогодичной эффективности очистки с помощью биоплато. Проблема заключается в сложности поддержания растений в жизнеспособном состоянии в холодный период года. Особенно остро данный вопрос стоит для северных регионов в условиях отрицательных температур и явления полярной ночи. Проблемы поддержания работоспособности биоплато в климатических условиях северных широт нашли отражение в ученых трудах Е.Б. Шевкуна, Я.И. Вайсмана.

В литературных источниках (Т.В. Кирилина с соавторами) встречаются исследования различных методов очистки воды от органических соединений, фосфора и азота с помощью микроводорослей в условиях северного климата. Разница в исследованиях в основном заключается в использовании различных штаммов зеленой микроводоросли *Chlorella*. Эффективность очистки сточных вод от соединений азота достигает почти 100% при использовании только хлореллы, а также при одновременном использовании хлореллы и микроорганизмов.

Тем не менее, несмотря на изученность вопроса, в настоящее время не решена проблема, обусловленная поиском наиболее эффективной и экономически выгодной технологии очистки многотоннажных азотсодержащих сточных вод предприятий горнопромышленного комплекса в северных районах.

Цели и задачи

В связи с вышесказанным **целью работы** является повышение эффективности очистки карьерных сточных вод от соединений нитратной группы азота.

Идея работы: очистка карьерных сточных вод с помощью морозостойких штаммов зеленой микроводоросли *Chlorella*.

Основные задачи исследований:

1. Мониторинг поверхностных вод в зоне воздействия исследуемого промышленного объекта, определение источника поступления неорганических соединений азота в карьерные сточные воды;

2. Анализ существующих технологий и методов очистки сточных вод от соединений азота;

3. Исследование в лабораторных условиях способности микроводоросли *Chlorella* к извлечению неорганических соединений азота из сточных вод;

4. Разработка технологического решения по очистке большого объема карьерных вод от неорганических соединений азота с использованием микроводоросли *Chlorella*;

5. Эколого-экономическое обоснование эффективности предлагаемой технологии очистки сточных вод.

Научная новизна:

1. Выявлены причины и закономерности водной миграции неорганических соединений азота в зоне воздействия предприятий минерально-сырьевого комплекса, способствующие формированию высококонтрастных потоков загрязнения нитрат-ионом в бассейнах рек Мурманской области.

2. Установлена степень извлечения неорганических соединений азота из сточных вод в зависимости от концентрации и количества вносимой суспензии микроводоросли *Chlorella*.

Методология и методы исследований

В работе применялись следующие методы исследований:

– анализ источников негативного воздействия производственных объектов минерально-сырьевого комплекса Мурманской области на поверхностные воды;

– методы экспресс-анализа проб воды в полевых условиях;

– лабораторные методы исследований с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием Горного университета;

– системный анализ существующих методов очистки сточных вод промышленных предприятий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Выполнена оценка состояния природных вод в зоне воздействия исследуемого предприятия.
- Предложено технологическое решение по снижению негативного воздействия на поверхностные воды от сброса карьерных сточных вод.
- Обоснована эколого-экономическая целесообразность использования разработанной с технологии очистки карьерных сточных вод.

Положения, выносимые на защиту:

1. Добыча железной руды открытым способом на одном из месторождений в Мурманской области сопровождается ежегодным образованием 1,3 млн. м³ сточных вод, которые в результате ведения взрывных работ насыщаются растворимыми формами соединений азота, что приводит к формированию техногенных гидрохимических потоков высококонтрастных по нитрат иону (коэффициент контрастности Кпдк р.х. NO₃⁻ = 3,5).
2. Увеличение эффективности извлечения нитрат-ионов из сточных вод с помощью микроводоросли *Chlorella* достигается путем ее предварительного культивирования в условиях азотного голодания.
3. Доочистку карьерных сточных вод от нитрат-ионов с эффективностью 85-90% следует проводить в прудах-отстойниках с добавлением штамма хлореллы *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 АRW, выращенной в условиях азотного голодания, в соотношении 1:20.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций доказана проведением комплексного экологического мониторинга поверхностных и сточных вод исследуемого промышленного объекта, большим объемом лабораторных исследований проб воды и растений, а также исследований по культивированию штаммов микроводоросли в лабораторных условиях с применением современного высокотехнологичного оборудования. Результаты экспериментальных исследований подтверждают закономерности, выявленные при теоретических исследованиях, что доказывает удовлетворительную сходимость результатов.

Основные и отдельные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе: на международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» (г. Тула, 2016 г.); на X Международной научно-практической конференции «Инновационные подходы в современной науке» (г. Москва, 2017 г.); на IV Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); на III Международной научно-практической конференции «Измерительная техника и технологии контроля параметров природных и техногенных объектов минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.).

Личный вклад автора заключается в определении цели и задач исследования, разработке методик исследований; проведении обширного экологического мониторинга поверхностных и сточных вод в зоне воздействия исследуемого объекта; проведении лабораторных исследований по культивированию микроводоросли в лабораторных условиях; разработке технологии очистки карьерных вод, содержащих неорганические соединения азота; оценке эколого-экономической эффективности предлагаемой технологии очистки.

Реализация работы:

– разработанные водоохранные мероприятия по снижению загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота могут быть использованы при проектировании очистных сооружений предприятий минерально-сырьевого комплекса Мурманской области и других северных регионов России;

– результаты работы могут быть использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» и «Современные методы очистки сточных вод».

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки

России, в 1 статье в издании, входящем в международную базу данных Scopus; получено 1 свидетельство о регистрации права на программу для ЭВМ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 133 страницы машинописного текста, 19 рисунков, 19 таблиц, 28 формул, список литературы из 98 наименований и 1 приложение на 3 страницах.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору, доктору технических наук М.А. Пашкевич за научное руководство работой. За помощь в проведении исследований автор благодарит доцента, кандидата технических наук Т.А. Петрову, а также сотрудников кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета.

Предполагаемое внедрение

На предприятиях горной промышленности с многотоннажными сточными водами, содержащими неорганические соединения азота.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, обуславливающая её актуальность, сформулированы основная цель, идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассматриваются: классификация сточных вод, образующихся в процессе добычи полезных ископаемых; применяемые в российской и зарубежной практике методы очистки сточных вод, в том числе от неорганических соединений азота, а также определен источник поступления большого количества неорганических соединений азота в карьерные сточные воды.

Во **второй главе** представлены результаты комплексного экологического мониторинга качества поверхностных вод в зоне воздействия рассматриваемого промышленного объекта, выявлены значительные превышения предельно-допустимой концентрации по нитрат-иону в природном водном объекте. Представлены результаты анализа проб растений, которые доказывают наличие негативного воздействия от сбора недостаточно очищенных сточных вод, а также необходимость разработки решения по очистке сточных вод от неорганических соединений азота до нормативных требований.

В третьей главе представлены результаты анализа литературных источников и лабораторных экспериментов по использованию зеленой микроводоросли хлорелла для очистки сточных вод. Описано предлагаемое решение по очистке карьерных сточных вод с применением суспензии хлореллы, выращенной на азотном голодании.

Четвертая глава посвящена расчету необходимых аппаратов и сооружений для реализации предлагаемой технологии очистки сточных вод, а также эколого-экономическому обоснованию разработанных водоохранных мероприятий.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Добыча железной руды открытым способом на одном из месторождений в Мурманской области сопровождается ежегодным образованием 1,3 млн. м³ сточных вод, которые в результате ведения взрывных работ насыщаются растворимыми формами соединений азота, что приводит к формированию техногенных гидрохимических потоков высококонтрастных по нитрат иону (коэффициент контрастности Кпдк р.х. $\text{NO}_3^- = 3,5$).

Мурманская область является одной из наиболее крупных горнопромышленных агломераций Российской Федерации.

Открытый способ добычи минерального сырья несет наибольший урон окружающей среде. Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом занимает колоссальные площади, изменяя природный ландшафт, также во время добычи полезных ископаемых открытым способом происходит истощение подземных вод и загрязнение поверхностных вод сточными карьерными водами.

Взрывные работы являются неотъемлемой частью технологии ведения горных работ в карьере, но вместе с тем использование взрывчатых веществ вызывает дополнительное загрязнение сточных вод соединениями азота. В настоящее время в горном деле широко применяются взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры – нитрата аммония (химическая формула -

NH_4NO_3), что в свою очередь приводит к повышенному содержанию соединений азота в откачиваемых карьерных водах.

Неорганические соединения азота попадают в карьерные сточные воды тремя способами:

1. В процессе зарядания обводненных скважин нитрат аммония растворяется, способствуя попаданию аммонийного азота в карьерные сточные воды.

2. В процессе взрыва образуются оксиды азота, которые сорбируются горной массой и далее вымываются атмосферными осадками, способствуя попаданию нитритного азота в карьерные сточные воды.

3. Нитратный азот попадает в карьерные сточные воды двумя выше перечисленными путями.

Чтобы оценить состояние поверхностных водных объектов в районе размещения исследуемого предприятия, а также определить закономерности изменения состава сточных и природных вод был проведен мониторинг поверхностных и сточных вод.

Проведённые мониторинговые исследования показали наличие в карьерных сточных водах аммонийных, нитратных, нитритных соединений азота, которые поступают посредством взрывания горной массы с помощью промышленных взрывчатых веществ, содержащих аммиачную селитру.

Наибольшую опасность для природных водоемом представляет загрязнение нитратами, которое распространяется на значительное расстояние и наносит существенный вред окружающей природной среде.

Природным водоемам северных регионов свойственна низкая самоочищающая способность, поэтому уровень загрязнения неорганическими соединениями азота будет сохраняться на прежнем уровне или увеличиваться под воздействием предприятия. Таким образом, недостаточная эффективность применяемой технологии очистки карьерных сточных вод на предприятии приводит к прогрессирующему загрязнению природных вод, что вызывает необходимость поиска решения по разработке технологии очистки карьерных сточных вод от неорганических соединений азота.

2. Увеличение эффективности извлечения нитрат-ионов из сточных вод с помощью микроводорсли *Chlorella* достигается

путем ее предварительного культивирования в условиях азотного голодания.

Существующие методы очистки сточных вод от соединений азота характеризуются высокими капитальными и эксплуатационными затратами, а также вторичным загрязнением окружающей природной среды в виде дополнительного загрязнения вод реагентами очистки и образования дополнительных видов отходов – шламы, фильтраты, осадки, образующиеся в результате аппаратной очистки. Поэтому был сделан выбор в пользу применения естественных способностей растительности и микроорганизмов поглощать соединения азота в процессе жизнедеятельности.

Научные разработки по исследованию возможности использования растений для очистки сточных вод ведутся со второй половины XX века.

Очистка воды от соединений азота с использованием высшей водной растительности возможна и уже применяется в ряде регионов. Основной проблемой использования таких методов очистки является обеспечение круглогодичной очистки, это особенно важно для северных регионов, где вегетативный период растений крайне мал.

В работе предлагается использовать штамм *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 АRW для очистки карьерных сточных вод от соединений азота.

Штамм одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 АRW, обладает способностью предотвращать «цветение» водоемов сине-зелёными водорослями, расти в производственных культиваторах при температуре 25-30 °С, а в водоемах сохраняться от 4 до 16 °С и расти от 17 до 30°С, отличается более высокой продуктивностью при культивировании в производственных установках, имеет возможность сезонного размножения в условиях естественных водоемов и круглогодичного развития в производственных культиваторах, наделен адаптацией к условиям водоемов различных климатических зон и к воде различных регионов для производственного культивирования.

Приготовление суспензии микроводоросли *Chlorella* проводилось согласно ПНД Ф Т 14.1:2.4.10-2004 «Методике определения токсичности питьевых, природных и сточных вод,

водных вытяжек из почв...по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella Vulgaris beijer*)».

Для выращивания микроводоросли необходимо приготовить 50% питательную среду Тамия согласно ПНД Ф Т 14.1:2.4.10-2004.

Питательная среды Тамия (50%) состоит из шести компонентов:

1. Раствор KNO_3 ;
2. Раствор $MgSO_4 \cdot 7H_2O$;
3. Раствор KH_2PO_4 ;
4. Раствор $FeC_6H_5O_7$ (железо лимоннокислое);
5. Раствор А, состоящий из H_3BO_3 (масса навески 0,286 г), $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ (масса навески 0,181 г), $ZnSO_4 \cdot 5H_2O$;
6. Раствор Б, состоящий из MoO_3 (масса навески 0,0018 г) и NH_4VO_3 .

В ходе лабораторных экспериментов было выявлено, что концентрация KNO_3 в питательной среде достаточно высока, чтобы увеличить содержание нитратов в анализируемых пробах сточных вод в несколько раз. Помимо этого, результат измерения концентрации нитратов в исходной суспензии хлореллы составил 350 мг/дм^3 , что также не позволяет использовать ее в таком виде для добавления к сточным водам, т.к. концентрация нитратов в конечном итоге повышается.

Было принято решение вырастить штамм (штамм *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW) в питательной среде без добавления KNO_3 . Суспензия хлореллы была успешно выращена в условиях азотного голодания до момента достижения оптической плотности 0,9 в течение 15 дней (таблица 1). Содержание нитратов в выращенной на азотном голодании суспензии составило $1,66-2,20 \text{ мг/дм}^3$.

Добавление к сточным водам приготовленной суспензии хлореллы с высокой оптической плотностью (большое количество жизнеспособных клеток) и низким содержанием нитрат-ионов не приведет к увеличению концентрации нитратов в сточных водах.

3. Доочистку карьерных сточных вод от нитрат-ионов с эффективностью 85-90% следует проводить в прудах-отстойниках с добавлением штамма хлореллы *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW, выращенной в условиях азотного голодания, в соотношении 1:20.

В лабораторных условиях были проведены исследования эффективности очистки воды от нитратов с помощью суспензии хлореллы (штамм *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW), выращенной в питательной среде без добавления KNO_3 .

К исследуемым растворам добавлялась суспензия хлореллы (штамм *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW), выращенная в условиях азотного голодания в соотношении 1:20. После чего концентрация нитратов замерялась в первый, второй, третий, четвертый, седьмой, восьмой дни эксперимента (таблица 2).

Исследования были проведены для разных условий окружающей среды: при комнатной температуре и естественном освещении, а также в холодильнике ($T=3^\circ\text{C}$) при отсутствии света. Данные условия описывают теплый и холодный период года в Мурманской области.

Результаты лабораторных экспериментов подтверждают теоретические исследования возможности применения микроводоросли хлорелла штамма *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW в условиях холодных температур.

Концентрация нитратов постепенно снижалась как в пробах, хранившихся при комнатной температуре, так и в пробах, хранившихся в холодильнике. При этом концентрация нитратов снижалась быстрее в растворах с исходной высокой концентрацией.

В растворах №№1-4 концентрация нитратов достигла ПДК (45 мг/дм^3) на третий день эксперимента. В растворах №5 концентрация нитратов снизилась до значения ПДК на восьмой день эксперимента.

Графически результаты эксперимента представлены на рисунках 1-4.

На основе проведенных теоретических (анализ литературных источников), а также лабораторных исследований с применением микроводоросли хлореллы, был выбран биологический метод доочистки (альголизация) карьерных сточных вод рассматриваемого промышленного объекта с помощью добавления в действующую систему очистки сточных вод микроводоросли хлореллы (штамм *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW).

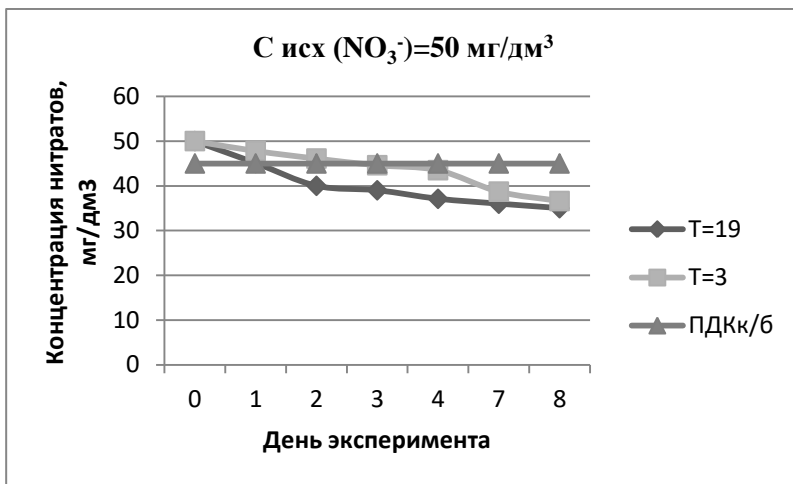


Рисунок 1 – Зависимость концентрации раствора с исходной концентрацией нитратов 50 мг/дм³ от времени (дня эксперимента)

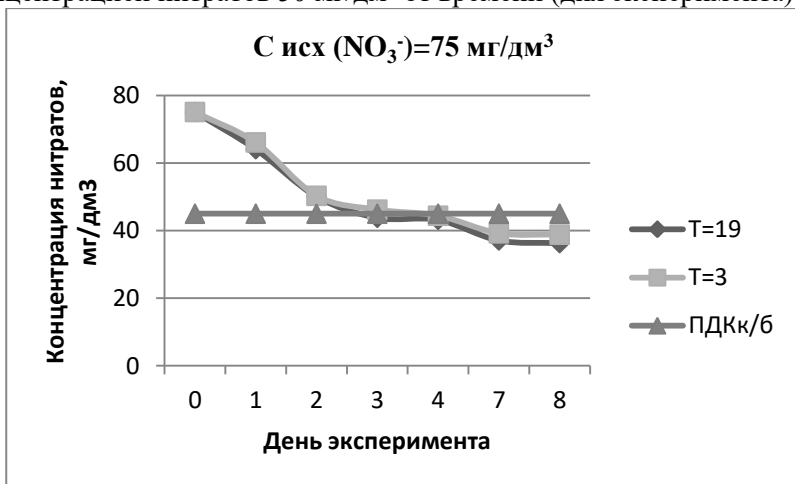


Рисунок 2 – Зависимость концентрации раствора с исходной концентрацией нитратов 75 мг/дм³ от времени (дня эксперимента)

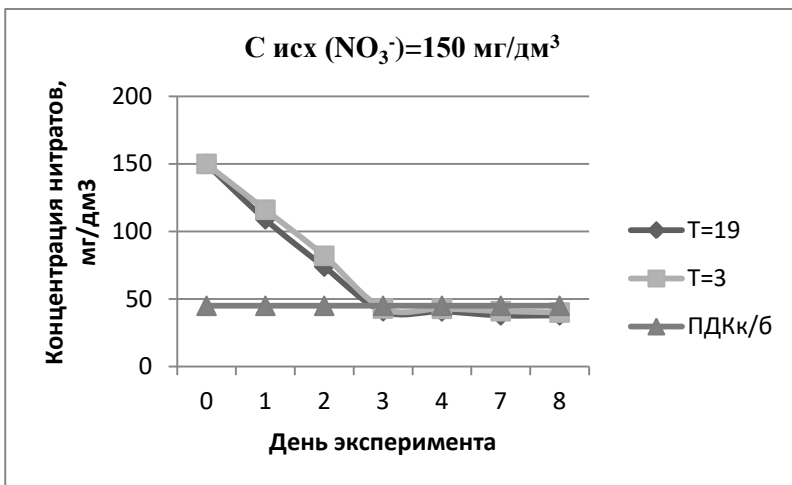


Рисунок 3 – Зависимость концентрации раствора с исходной концентрацией нитратов 150 мг/дм³ от времени (дня эксперимента)

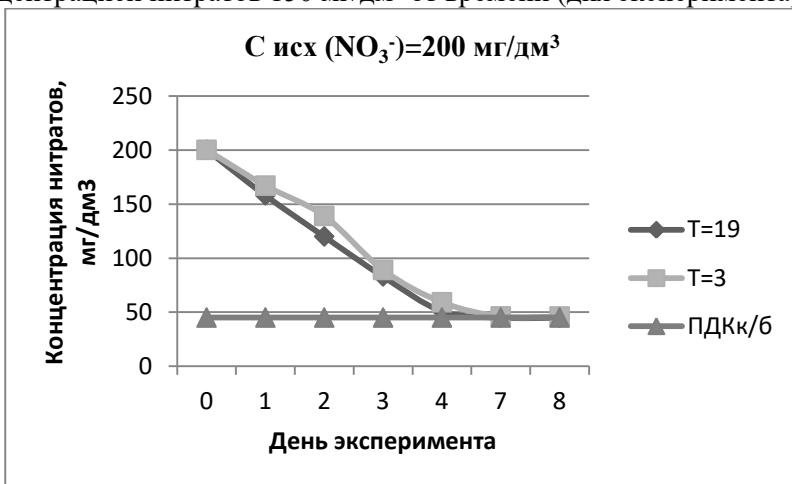


Рисунок 4 – Зависимость концентрации раствора с исходной концентрацией нитратов 200 мг/дм³ от времени (дня эксперимента)

Попадая в водоем, хлорелла интенсивно фотосинтезирует и делится. Живые клетки штамма заряжены отрицательно, что позволяет им находиться друг от друга на равноудаленном расстоянии. Клетки микроводоросли хлореллы способствуют насыщению кислородом и удалению углекислого газа из слоя воды, в котором она находится, а также способствуют гибели патогенной

микрофлоры. Зоопланктон потребляется хлореллу в качестве корма, при наличии зоопланктона в водоеме его численность увеличивается в несколько раз.

Поскольку размер хлореллы составляет всего 8 мкм, имеющаяся в пруде-отстойнике фильтрационная дамба для механической очистки воды, не будет являться преградой для водорослей. Для предотвращения повторного загрязнения поверхностных вод в водном объекте – приемники сточных вод, а также самих сточных вод в пруде-отстойнике, необходимо предусмотреть механизм, позволяющий извлекать из сточных вод микроводоросли и отмершие клетки.

В работе предлагается использовать геотекстиль, применяемый для изготовления геотуб, в качестве фильтрующей перегородки для отделения микроводоросли хлореллы от раствора сточных вод.

В общем виде предлагаемая схема очистки карьерных сточных вод от нитратов в пруде-отстойнике с помощью микроводоросли хлорелла показана на рисунке 5.

Суспензию микроводоросли необходимо вносить в месте (4) входа сточных вод в пруд-отстойник (3). Хлорелла обладает электрическим зарядом, поэтому при внесении суспензии в пруд она будет расходиться по всему объему отстойника (1). Кроме того, внесение суспензии в месте входа сточных вод в пруд-отстойник увеличивает время контакта микроводоросли со сточными водами, тем самым повышая степень очистки от соединений азота.

Далее сточные воды, фильтруясь через существующую дамбу (2), проходят очистку от механически примесей и взвешенных веществ. Существующая насыпная дамба не препятствует прохождению микроводоросли во вторую секцию пруда-отстойника, т.к. имеет отверстия значительно большего размера, чем клетки микроводоросли хлореллы.

Во второй секции предусмотрены две параллельные рулонные конструкции из геотекстиля (5) с размером пор менее 8 мкм в качестве фильтрующей перегородки. Нижний край полотна необходимо оснастить грузом (6), боковые стенки направляющими (9), которые будут способствовать опусканию/подниманию перегородки. Верхняя часть полотна оснащена скребками с лотком (7) для сбора отфильтрованных клеток микроводоросли.

Перегородки работают поочередно. При необходимости очистки работающей перегородки, опускается вторая – дублирующая. Когда обе перегородки опущены, поднимается работающая перегородка, таким образом, сточные воды начинают фильтроваться через вторую перегородку, и клетки хлореллы не попадают в природный водоем.

После фильтрации очищенные сточные воды сбрасываются в водный объект (8) через существующий выпуск сточных вод.

После внедрения в систему микроводорослей *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW, выращенных в условиях азотного голодания, ожидается снижение концентрации нитратов в сточной воде до нормативов ПДК (45 мг/дм³).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой описано принципиально новое технологическое решение существующей проблемы: снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающего предприятия Мурманской области.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Определены на основе результатов экологического мониторинга поверхностных вод и растений основные загрязняющие вещества, формирующие техногенные гидрохимические потоки в зоне влияния рассматриваемого промышленного объекта.

2. Выявлен источник поступления аномально высоких концентраций нитрат-иона в поверхностные водные объекты рассматриваемого района, исследованы процессы трансформации неорганических соединений азота при проведении буровзрывных работ в карьере.

3. Определены в лабораторных условиях свойства микроводоросли *Chlorella* по извлечению нитрат-ионов из сточных вод в зависимости от условий окружающей среды, позволяющие использовать суспензию микроводоросли *Chlorella* для очистки карьерных сточных вод от неорганических соединений азота.

4. Разработана технология очистки сточных вод, содержащих неорганические соединения азота, в прудах-

отстойниках путем внесения в них суспензии микроводоросли *Chlorella*, выращенной в условиях азотного голодания.

5. Определены капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение предлагаемой системы очистки сточных вод, а также величина предотвращенного экологического ущерба. Эколого-экономическими расчетами определен эффект за счет различия в платежах за сброс нитрат-иона до и после внедрения предлагаемой технологии очистки карьерных сточных вод.

По итогам выполненных исследований была достигнута поставленная цель, а именно было найдено технологическое решение, позволяющее достичь повышения эффективности очистки карьерных сточных вод от соединений азота.

Применение живого микроорганизма в качестве реагента для очистки сточных вод требует внимания к множеству факторов для достижения необходимой эффективности очистки. Дальнейшие исследования по данной теме могут быть связаны с изучением влияния различных факторов внешней среды на жизнедеятельность микроводоросли хлорелла (например, освещенность или химический состав сточных вод).

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Солнышкова, М.А.** Мониторинг и снижение негативного воздействия взрывных работ на поверхностные воды / М.А. Солнышкова, М.А. Пашкевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №4(специальный выпуск 6). – С. 352-359.

2. **Солнышкова, М.А.** Исследование эффективности биологической очистки воды от нитратов с помощью биоплато / М.А. Солнышкова, М.А. Пашкевич // Естественные и технические науки. – 2018. – №5(119). – С. 169-173.

3. **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. – 201. – Ser. 1399, No 055044 DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055044.

Таблица 1 – Результаты лабораторного эксперимента по выращиванию хлореллы (штамм *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 ARW) в условиях азотного голодания




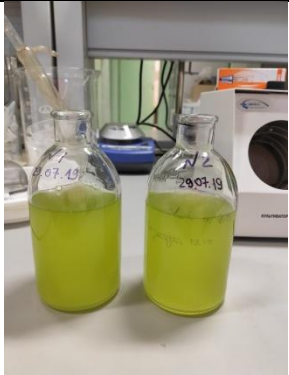
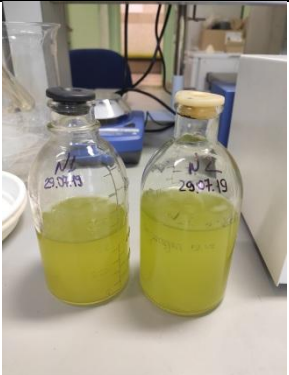
| День выращивания | 1й | 3й | 5й | 11й | 15й |
|------------------|---|--|---|---|---|
| D | - | 0,185-0,149 | 0,449-0,291 | 0,898-0,791 | 0,984-0,864 |
| фото |  |  |  |  |  |

Таблица 2 – Результаты эксперимента по очистке воды с добавлением суспензии хлореллы, выращенной на азотном голодании

| Температура хранения, °С | день эксперимента № модельного раствора | Концентрация NO ₃ ⁻ , мг/дм ³ | | | | | | |
|--------------------------|--|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 |
| | | 12.08.2019 | 13.08.2019 | 14.08.2019 | 15.08.2019 | 16.08.2019 | 19.08.2019 | 20.08.2019 |
| Т=19° | 1 | 50,0 | 45,1 | 40,0 | 39,0 | 37,1 | 36,0 | 35,0 |
| | 2 | 75,1 | 64,1 | 50,1 | 43,8 | 43,2 | 37,1 | 36,3 |
| | 3 | 100,2 | 79,0 | 61,9 | 42,4 | 40,7 | 32,7 | 32,5 |
| | 4 | 150,0 | 109,0 | 74,0 | 41,0 | 40,9 | 38,0 | 38,0 |
| | 5 | 200,1 | 158,0 | 120,0 | 83,0 | 51,0 | 45,0 | 44,8 |
| Т=3° | 1 | 50,0 | 47,8 | 46,1 | 44,6 | 43,5 | 38,7 | 36,6 |
| | 2 | 75,1 | 66,1 | 50,3 | 46,2 | 44,4 | 39,2 | 38,8 |
| | 3 | 100,2 | 82,1 | 63,7 | 43,2 | 42,8 | 34,3 | 33,6 |
| | 4 | 150,0 | 116,1 | 82,0 | 43,0 | 42,8 | 41,0 | 40,0 |
| | 5 | 200,1 | 167,0 | 139,0 | 89,0 | 59,1 | 46,0 | 45,9 |

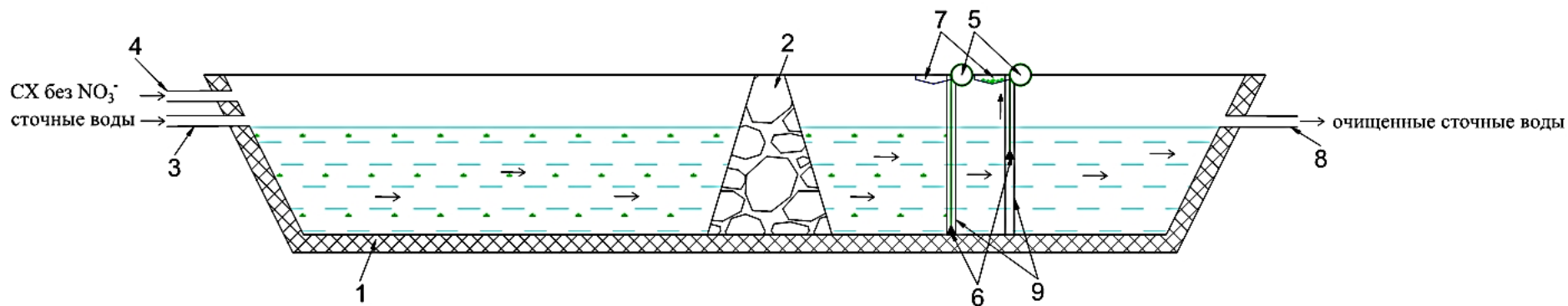


Рисунок 5 – Схема пруда-отстойника для очистки карьерных сточных вод от нитратов