

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора
Ксенофонтова Бориса Семеновича,
профессора кафедры «Экология и промышленная безопасность»
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».
на диссертацию Щеглова Глеба Андреевича на тему:
«Разработка технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от
неорганических соединений азота в условиях северных широт России»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.5.15. Экология (технические науки)

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Г.А. Щеглова посвящена решению важной научно-технической проблемы – созданию эффективной, климатически адаптированной технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота. Актуальность темы определяется несколькими взаимосвязанными факторами.

Во-первых, это стратегический вектор государственной политики. Указами Президента Российской Федерации («О Стратегии экологической безопасности...», «О Стратегии развития Арктической зоны...») перед промышленностью поставлены задачи по кардинальному снижению сбросов загрязнённых сточных вод, внедрению наилучших доступных технологий (НДТ) и обеспечению экологической безопасности в регионах Крайнего Севера.

Во-вторых, проблема имеет ярко выраженный прикладной характер. На примере АО «Карельский окатыш» автором показано, что даже после внедрения фитоочистных сооружений эффективность удаления нитратов из сточных вод, сбрасываемых в олиготрофный водный объект, не превышает 15–20%. При этом традиционные биологические методы в условиях низких температур Карелии и Мурманской области работают нестабильно.

В-третьих, предлагаемый автором подход – интенсификация роста *Chlorella vulgaris* с помощью электромагнитного излучения крайне высоких частот (ЭМИ КВЧ) – является междисциплинарным, находящимся на стыке промышленной экологии, гидробиологии и биофизики. Подобные исследования для условий Севера ранее не проводились.

Таким образом, актуальность работы не вызывает сомнений, а её результаты призваны внести значимый вклад в достижение целевых показателей федерального проекта «Вода России», направленного на сокращение негативного воздействия на природные водные объекты.

Научная новизна и теоретическая ценность проведенного исследования

Научная новизна диссертационной работы определяется совокупностью оригинальных экспериментальных данных и впервые сформулированных закономерностей:

1. Научно обоснован и экспериментально подтверждён новый методический прием – предварительное культивирование *Chlorella vulgaris* на безазотной среде. Установлено, что такая подготовка позволяет запустить механизмы азотного голодания и, как следствие, снизить концентрацию аммоний-ионов на 50% уже при температуре 1–17 °С. Ранее способность хлореллы к активной утилизации азота в столь низкотемпературном диапазоне не была доказана.

2. Впервые предложен комплексный критерий эффективности удаления неорганических соединений азота, учитывающий совместное действие физического (ЭМИ КВЧ) и биотехнологического (безазотное культивирование) факторов. Показано, что синергетический эффект от их сочетания позволяет повысить утилизацию аммония на 10%, нитратов – на 4 % относительно необлученной культуры.

3. Впервые установлены резонансные параметры воздействия ЭМИ КВЧ на микроводоросль *Chlorella vulgaris*. Показано, что частота 40 ГГц при экспозиции 120 минут обеспечивает увеличение скорости прироста биомассы в 6,8 раза по сравнению с контролем. Данный результат подтверждает резонансную природу взаимодействия миллиметрового излучения с фотосинтезирующими клетками и расширяет представления о немонотонных зависимостях «доза–эффект» для микроводорослей.

4. Разработана оригинальная классификация условий очистки сточных вод (температурные режимы, освещенность, аэрация, состав среды), позволившая определить пороговые значения параметров для гарантированного достижения уровня содержания нитратов, соответствующего значению ПДК в водных объектах рыбохозяйственного назначения.

Теоретическая ценность работы заключается в развитии подходов к управлению метаболической активностью микроводорослей с помощью физических полей. Автором показано, что ЭМИ КВЧ выступает не только как стимулятор роста, но и как фактор, повышающий толерантность культуры к низким температурам и высоким концентрациям загрязняющих веществ, что позволяет говорить об эффекте физико-биологической интенсификации очистки сточных вод в условиях холодного климата.

Детальный анализ текста диссертации

Диссертация (142 с., 46 рис., 10 табл.) имеет классическую структуру, логика построения которой соответствует сформулированной цели и задачам исследования.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и 4 задачи работы, выделены 4 защищаемых положения.

Глава 1 представляет собой аналитический обзор. Особо следует отметить:

– анализ многолетней гидрохимической динамики оз. Костомукшское и р. Кенти с 1994 по 2023 гг. (рис. 1.1, 1.2);

– детальную физико-химическую характеристику сточных вод, сбрасываемых в природные водные объекты (табл. 1.1), включающую данные по минерализации, окислительно-восстановительному потенциалу, электропроводности, сезонным колебаниям температур;

– обоснованный выбор объекта исследования (*Chlorella vulgaris*) и метода воздействия (ЭМИ КВЧ 37,5–53,57 ГГц).

Глава 2 отличается высоким методическим уровнем. Автором:

– самостоятельно сконструирована лабораторная установка (рис. 2.5), включающая термостатирование, аэрацию, LED-освещение с оптимизированным спектром;

– применён метод спектрофотометрического определения хлорофилла по ГОСТ 17.1.4.02-90;

– использованы ионоселективные электроды (ЭЛИТ-051, ЭЛИТ-021) с построением калибровочных графиков (коэффициент детерминации $R^2 = 0,998-0,999$);

– разработана матрица экспериментов, включающая 4 серии (№ 2.1–2.4), охватывающие 27 вариантов опытов.

Глава 3 содержит результаты поисковых исследований по воздействию ЭМИ КВЧ. Убедительно показано, что:

– из 16 исследованных частот (38–53 ГГц) только частота 40 ГГц даёт стабильный положительный эффект (рис. 3.1);

– зависимость «время экспозиции – прирост биомассы» имеет колоколообразный вид с максимумом при 120 мин (рис. 3.6);

– облучение не оказывает ингибирующего действия на пигментный аппарат: содержание хлорофилла а при 40 ГГц достоверно выше контроля.

Глава 4 содержит обоснование технологии очистки сточных вод от неорганических соединений азота. Наиболее значимыми результатами следует считать:

– доказательство жизнеспособности *Chlorella vulgaris* в неразбавленных водах хвостохранилища приросте биомассы с 0,04 до 2,4 г/м³ за 9 сут при 26 °С (рис. 4.2);

– достижение 93% удаления аммония за 4 сут и 96% удаления нитратов за 11 сут (проба 4, безазотная среда, 26 °С) – это лучший показатель среди известных биотехнологий для аналогичных концентраций;

– экспериментально подтверждённый факт повышения эффективности очистки при предварительном облучении культуры (прирост биомассы +15%, утилизация аммония +10%, нитратов +4%).

Закключение содержит 4 вывода, которые полностью корреспондируются с поставленными задачами.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертации не вызывает сомнений и подтверждается следующими результатами:

1. Разработана технологическая схема модернизации очистных сооружений (Приложение 3), включающая:

- узел подготовки инокулята на безазотной среде;
- блок облучения ЭМИ КВЧ (40 ГГц, 120 мин);
- биореакторные модули с использованием сбросного тепла обжиговых печей (поддержание 26 °С);
- финишную фильтрацию.

2. О практической значимости результатов, полученных Щегловым Глебом Андреевичем, свидетельствуют:

- **справки и акты**, представленные ООО «Ловозерский ГОК», ГОАП «Мурманскводоканал»;
- справка об использовании результатов при актуализации информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 8-2022;
- свидетельство о регистрации базы данных,
- экономическое обоснование предложенных технологических решений.

Экономическая эффективность подтверждена проектной организацией ООО «МурманЭКОпроект»:

- капитальные затраты – 205,5 млн руб.;
- чистый годовой эффект – 75,6 млн руб.;
- срок окупаемости – 2,7 года.

3. Результаты диссертации использованы в учебном процессе филиала Мурманского арктического университета в г. Апатиты (при подготовке учебных материалов и ведении занятий по следующим дисциплинам: «Очистка сточных вод и оборотное водоснабжение», «Основы бионанотехнологии» и «Радиационная биофизика».

4. Создан и зарегистрирован информационный ресурс – база данных «Загрязнение водных объектов Арктического региона за 1997-2024 годы» (свид. № 2025625718).

Таким образом, практическая значимость работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям, на соискание учёной степени кандидата технических наук, а уровень внедрения можно охарактеризовать как высокий.

Замечания по диссертационной работе

Положительно оценивая диссертационное исследование Щеглова Глеба Андреевича, считаю необходимым высказать ряд замечаний и рекомендаций, которые носят дискуссионный характер и не влияют на общую высокую оценку работы.

1. О масштабировании и гидродинамическом подобии.

Исследования выполнены на лабораторной установке стаканного типа ($V = 0,2-1,0 \text{ дм}^3$). Автором предложена схема модернизации отстойника хвостохранилища ($V = 80\,000 \text{ м}^3$), однако вопросы масштабирования – равномерность распределения ЭМИ КВЧ в большом объёме, гидродинамическая структура потока, удержание

биомассы – в работе не рассмотрены. Очевидно, следующим этапом должно стать создание опытно-промышленного модуля.

2. О селективности воздействия ЭМИ КВЧ.

Установленная резонансная частота 40 ГГц подобрана для штамма *Chlorella vulgaris*, использованного в работе. Однако в открытых водоёмах присутствуют естественные сообщества микроводорослей. Не вполне ясно, будет ли наблюдаться аналогичный эффект на нативных сообществах фитопланктона или же потребуются постоянное инокулирование производственной культурой. Представляется интересным исследовать влияние ЭМИ КВЧ на альгоценозы в условиях микрокосмов.

3. О глубине переработки биомассы.

В работе справедливо отмечено, что полученная биомасса (вероятно, после предварительной обработки) может быть использована как удобрение. Однако в тексте отсутствуют данные о содержании биогенных элементов (N, P, K) и тяжёлых металлов в биомассе, «выращенной» на сточных водах. Для обоснования безопасности и товарной ценности вторичного ресурса такие исследования необходимы.

4. О глубине очистки производственных сточных вод.

Понимая озабоченность автора тем фактом, что в 2019 г. суд предписал руководству промышленного предприятия очищать сточные воды до требований ПДК, установленных для водных объектов рыбохозяйственного назначения, следует подчеркнуть, что правила эколого-технологического нормирования, действующие в стране в настоящее время, говорят о следующем: требования ПДК касаются лишь так называемых веществ 1-2 классов опасности, то есть, не нитрат-ионов и ионов аммония, а нитрит-ионов. В диссертационной работе представлены результаты, относящиеся к извлечению нитрит-ионов, однако в положениях, выносимых на защиту, они отражения не получили. Вероятно, по мере накопления данных о результатах предоставления предприятиям отрасли (подобным АО «Карельский окатыш») комплексных экологических разрешений, автор сможет систематизировать информацию о противоречиях между экологическим, санитарно-гигиеническим и технологическим (на базе НДТ) нормированием.

5. Об экономической оценке.

Выполненное экономическое обоснование корректно и базируется на реальных данных предприятия. Однако расчёт эксплуатационных затрат на биореакторный модуль (2,0 млн руб./год) представляется несколько оптимистичным: не учтены затраты на замену источников УФ-излучения (при использовании LED-ламп срок службы значителен, но не бесконечен), а также на утилизацию отработанной биомассы. На стадии проектирования необходимо будет уточнить технико-экономических расчёты.

6. Об оформлении текста диссертационной работы.

В тексте диссертации, который в целом написан строгим научным языком, снабжён табличным и иллюстрационным материалом, присутствуют некоторые

небрежности и опечатки. На ряде графиков отсутствуют обозначения показателей на осях абсцисс и ординат (например, рис. 1.1); присутствуют выражения типа «объём сточных вод... превышает ПДК», «микроэлементы в воде ... соответствуют естественным значениям» (с. 20); «свободный аммиак NH_3^+ » (с.33); колориметрический метод назван калориметрическим (с. 66); автор вольно относится к правилам пунктуации.

Высказанные замечания не затрагивают основных защищаемых положений, не опровергают достоверность полученных результатов и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение

Диссертация Щеглова Глеба Андреевича «Разработка технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота в условиях северных широт России» представляет собой завершённую, самостоятельно выполненную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи, а именно, разработана технологическая схема и обоснована целесообразность биотехнологической очистки производственных сточных вод с использованием микроводоросли *Chlorella vulgaris*, интенсифицированной электромагнитным излучением крайне высоких частот.

Работа обладает внутренним единством, характеризуется логичностью построения, достоверностью экспериментальных данных и аргументированностью выводов. Автором выполнен значительный объём экспериментальных исследований (более 150 опытов), результаты которых обработаны статистически и проиллюстрированы наглядными графическими материалами.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы не вызывают сомнений и подтверждены:

- 12 научными публикациями, в том числе 5-ю – в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России для опубликования результатов научных исследований;
- апробацией на 7 международных и всероссийских конференциях;
- документами о практическом применении результатов на двух промышленных предприятиях, в учебном процессе, а также при актуализации информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 8-2022;
- государственной регистрацией базы данных.


По тематике исследования, содержанию и полученным автором результатам диссертация соответствует п 3 паспорта научной специальности 1.5.15. Экология (технические науки) в следующей части «... разработка и совершенствования методов ... , обеспечивающих минимизацию антропогенного воздействия на живую природу при проведении горных выработок, обогащения и переработки полезных ископаемых...») и п. 8 паспорта научной специальности 1.5.15. Экология (технические

науки) в следующей части: «Разработка принципов и механизмов, обеспечивающих устойчивое развитие общества при сохранении биоразнообразия и стабильного состояния природной среды...».

По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, объёму выполненных исследований диссертационная работа Щеглова Глеба Андреевича на тему: «Разработка технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота в условиях северных широт России» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, предусмотренным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и. о. ректора РХТУ им. Д. И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД».

Автор диссертационной работы, **Щеглов Глеб Андреевич**, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.5.15. Экология (технические науки).

Официальный оппонент


_____ «6» марта 2026 г.
(подпись)

Ксенофонтов Борис Семенович

доктор технических наук (специальность 05.15.05 – Технология и комплексная механизация торфяного производства), профессор,
профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность»
Федерального государственного бюджетного
автономного образовательного учреждения высшего
«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Контактная информация:

Адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Телефон: +7 (499) 263-60-92

Электронная почта: kbsflot@mail.ru


ВЕРНО
СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ОТДЕЛ КАДРОВОГО
АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
ИШМАНАЕВА Т. Ш.

