

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертационную работу 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 диссертационной работы. Диссертационная работа Г.А. Щеглова посвящена решению важной научно-технической проблемы – совершенствованию методов очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота в суровых климатических условиях северных регионов России. Актуальность темы не вызывает сомнений и подтверждается её соответствием приоритетным направлениям государственной политики в области экологической безопасности, закреплённым в Указе Президента Российской Федерации от 19.04.2017 № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года».

Особую значимость работа приобретает в контексте освоения Арктической зоны РФ, где сосредоточены крупные горнопромышленные комплексы, а существующие биологические методы очистки сточных вод демонстрируют недостаточную эффективность из-за низких температур. На примере предприятия АО «Карельский окатыш» (Республика Карелия) автор показывает, что сброс недостаточно очищенных вод привёл к устойчивому превышению предельно допустимых концентраций нитратов и аммония в озерно-речной системе р. Кенти. Применяемые фитоочистные системы снижают содержание аммония на 53–90%, однако удаление нитратов не превышает 15–20%, что свидетельствует о необходимости поиска новых технологических решений.

Предложенный автором подход, основанный на интенсификации роста микродоросли *Chlorella vulgaris* с помощью электромагнитного излучения крайне высоких частот (ЭМИ КВЧ), является оригинальным и своевременным, поскольку направлен не только на повышение эффективности очистки, но и на адаптацию биотехнологий к условиям северных широт.

Научная новизна проведенного исследования заключается в том, что автором впервые установлена частота ЭМИ КВЧ (40 ГГц) и оптимальная длительность экспозиции (120 минут), обеспечивающие увеличение скорости прироста биомассы *C. vulgaris* в 6,8 раза по сравнению с контролем; экспериментально доказана принципиальная возможность использования культуры *C. vulgaris*, предварительно выращенной на безазотной среде, для утилизации неорганических соединений азота при низких положительных температурах (1–17 °С) и установлено, что эффективность удаления аммония в этих условиях достигает 50% за 4 суток, что не наблюдалось при использовании традиционной среды Тамия; впервые предложен и обоснован способ повышения эффективности биоремедиации сточных вод горнодобывающих предприятий путём предварительного облучения культуры *C. vulgaris* ЭМИ КВЧ непосредственно в загрязнённой среде; выявлены оптимальные технологические параметры процесса очистки: температура 26 °С (с возможностью использования сбросного тепла обжиговых печей), аэрация, освещение, предварительное культивирование на безазотной среде с последующим снижением концентрации нитратов на 96% за 11

суток и аммония на 93% за 4 суток – до уровней, соответствующих рыбохозяйственным ПДК.

Теоретическая ценность работы состоит в обосновании механизмов синергетического воздействия физических (ЭМИ КВЧ) и биологических (азотное голодание) факторов на ростовые и метаболические характеристики микроводорослей, что создаёт научную базу для дальнейшего развития методов интенсификации биологической очистки в неблагоприятных климатических условиях.

Практическая значимость диссертационной работы Г.А. Щеглова не вызывает сомнений и подтверждается следующими результатами:

1. Разработана технологическая схема очистки сточных вод от неорганических соединений азота с использованием культуры *C. vulgaris*, предусматривающая: предварительное культивирование водоросли на безазотной среде; облучение суспензии ЭМИ КВЧ 40 ГГц в течение 120 минут; использование сбросного тепла обжиговых печей для поддержания температуры 26°C; аэрацию и освещение в биореакторных установках.

2. Результаты использованы на предприятиях горнопромышленного и коммунального комплекса: ООО «Ловозерский ГОК», ГОАП «Мурманскводоканал», что подтверждено соответствующими актами.

3. Материалы диссертации использованы 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» в части уточнения требований к очистке от неорганических соединений азота.

4. Полученные данные легли в основу базы данных (свидетельство о государственной регистрации № 2025625718 от 04.12.2025).

5. Эколого-экономическая эффективность подтверждена проектной организацией ООО «МурманЭКОпроект»: годовой чистый экономический эффект составляет 75,6 млн рублей, срок окупаемости капитальных вложений – 2,7 года.

6. Результаты используются в образовательном процессе филиала Мурманского Арктического университета в г. Апатиты при подготовке специалистов в области промышленной экологии.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается применением современного оборудования, апробированных на базе ИППЭС КНЦ РАН методов анализа и статистической обработки фактического материала, представительностью и значительным объемом исходных данных, использованием общепринятых критериев оценки полученных результатов, а также согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, удовлетворительной сходимостью результатов измерений и экспериментальных исследований, апробацией на научных конференциях, практической реализацией полученных результатов.

Оценка содержания диссертации. Представленная на отзыв диссертационная работа Щеглова Глеба Андреевича состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка терминов и сокращений, списка литературы (135 наименований) и 4 приложений. Работа изложена на 142 страницах, содержит 46 рисунков и 10 таблиц, что свидетельствует о репрезентативности экспериментального материала. Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность, научная новизна и практическая

значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту. В первой главе автором проведён анализ гидрологического режима озерно-речной системы р. Кенти, подверженной многолетнему воздействию Костомукшского ГОКа. Выполнена оценка объёмов водосброса хвостохранилища, времени прохождения воды, проанализированы многолетние гидрохимические данные. Логичным завершением главы является постановка задач собственного исследования. Вторая глава содержит подробное описание объектов, материалов и методов исследования. Особого внимания заслуживает разработанная автором матрица планирования эксперимента, включающая три модели исследований с варьированием частот и длительности облучения, температурных режимов, состава питательных сред и исходных концентраций загрязняющих веществ. Использование спектрофотометрических методов и ион-селективных электродов (ЭЛИТ-051, ЭЛИТ-021) в сочетании с аттестованными методиками ГОСТ и РД обеспечивает достоверность полученных результатов. Третья глава посвящена экспериментальному изучению влияния ЭМИ КВЧ на культуру *S. vulgaris*. В ходе экспериментов № 1.1 и № 1.2 автором убедительно показано, что облучение частотой 40 ГГц в течение 120 минут обеспечивает максимальный стимулирующий эффект: прирост биомассы за 24 часа превышает контроль в 6,84 раза. Важно отметить, что выявлен немонотонный характер зависимости «доза-эффект»: короткие (5–30 мин) и избыточно длительные (480 мин) экспозиции демонстрируют существенно меньшую эффективность. Четвертая глава содержит обоснование разработанной технологии. В эксперименте № 2.1 установлено, что *S. vulgaris* способна выживать и наращивать биомассу в водах хвостохранилища при температурах 7–17 °С, однако эффективное удаление аммония наблюдается лишь при 26 °С. Принципиально важные результаты получены в эксперименте № 2.2: культивирование на безазотной среде позволяет достичь 50%-ного снижения концентрации аммония уже при 1–17 °С. Наибольшая эффективность (93% по аммонiu, 96% по нитратам) достигнута при сочетании трёх факторов: безазотная среда, температура 26 °С, аэрация и освещение. В эксперименте № 2.3 доказано, что предварительное облучение культуры ЭМИ КВЧ повышает эффективность утилизации аммония на 10%, нитратов – на 4%. Заключение диссертации содержит 4 обоснованных вывода, полностью соответствующих поставленным задачам. Приложения включают акты внедрения, свидетельство о регистрации базы данных и материалы для актуализации ИТС 8-2022, что подтверждает высокий уровень завершённости работы.

Диссертационная работа Г.А. Щеглова является ценным и интересным исследованием, выполненным самостоятельно и в полном объёме. Она обладает внутренним единством, написана хорошим литературным языком, детально проиллюстрирована и оформлена на хорошем научном уровне. При написании диссертации соискателем даны ссылки на авторов и источники, откуда он заимствовал материалы, отдельные и коллективные результаты.

Диссертационная работа наукоёмка, содержит обширный экспериментальный материал, совокупность новых научных результатов и положений, выдвигаемых автором для публичной защиты, что позволяет квалифицировать их как значимый вклад в решение важных, имеющих народно-хозяйственное значение экологических проблем, связанных с очисткой сточных вод.

Замечания по диссертационной работе. Положительно оценивая диссертационное исследование Г.А. Щеглова в целом, следует высказать ряд замечаний и пожеланий:

1. В диссертации представлены графические интерпретации результатов без приведения исходных данных и расчетов средних значений. Демонстрация исходных данных повысила бы наглядность результатов.

2. О масштабировании технологии. Исследования выполнены на лабораторных установках с объемом проб 0,2 дм³. Для подтверждения работоспособности разработанной технологии в условиях реального хвостохранилища целесообразно проведение пилотных испытаний на укрупнённых установках с оценкой гидродинамических параметров, равномерности облучения и эффективности в непрерывном режиме.

3. В результатах показано, что облучение с частотой 40 ГГц в течение 120 минут обеспечивает максимальный стимулирующий эффект: прирост биомассы за 24 часа превышает контроль в 6,84 раза, однако не обсуждены возможные механизмы действия электромагнитного излучения крайне высоких частот на водоросль *C. vulgaris*;

4. В автореферате приведены 5 статей ВАК, из них 3 – в журналах, индексируемых в Chemical Abstracts и GeoRef. Однако в диссертации не указан личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах (заявленные 80–90% следовало бы конкретизировать по каждой статье).

5. Использование *C. vulgaris* для утилизации соединений неорганического азота предполагает накопление избыточного объема биомассы водоросли. В диссертации отмечается возможность применения водоросли как удобрения. Однако данный вопрос требует изучения ввиду загрязнения вод не только соединениями азота, но еще и тяжелыми металлами. Вопрос последующего использования или утилизации биомассы важен для оценки полного жизненного цикла предлагаемой технологии.

Высказанные замечания не затрагивают сути защищаемых положений и не ставят под сомнение достоверность полученных результатов; они могут быть учтены автором в дальнейших исследованиях.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации. Автореферат диссертации Г.А. Щеглова написан хорошим литературным языком, логично построен и детально проиллюстрирован. Его название, структура и содержание полностью соответствуют цели и задачам исследования, отражают содержание, идеи и выводы диссертации.

Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. Все основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати в научных изданиях и соответствуют теме диссертационной работы. По теме работы опубликовано 12 печатных трудов, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ (из них 3 – в журналах, индексируемых в международных базах Chemical Abstracts и GeoRef), и 5 статей – в сборниках и материалах различных конференций. Разработана база данных загрязненных водных объектов Арктического региона за 1997-2024 гг.

Общая оценка диссертационной работы. Диссертационная работа Щеглова Глеба Андреевича на тему «Разработка технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от неорганических соединений азота в условиях северных широт России» по специальности 1.5.15. Экология (технические науки) является законченной научно-квалификационной работой, характеризуется

