В совет по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, ученой степени кандидата наук РХТУ.1.5.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования ≪Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева≫

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, старшего научного сотрудника Маслобоева Владимира Алексеевича, научного руководителя Института проблем промышленной экологии Севера, советника генерального директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра ≪Кольский научный центр Российской академии наук≫ (ФИЦ КНЦ РАН)

на диссертацию **Харитонова Александра Эдуардовича « Разработка методологического подхода для определения фитотолерантности к токсическому воздействию поллютантов с использованием гидропоники как модельной среды»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.5.15. Экология (технические науки)

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что в условиях интенсивного техногенного загрязнения почв и методологических ограничений традиционных подходов к оценке фитотолерантности возникает необходимость в разработке технологических приемов, позволяющих проводить быстрый и достоверный анализ фитотолерантности растений. Этот показатель является одним из ключевых критериев при подборе растений для биологического этапа рекультивации и биоиндикации состояния загрязнённых территорий. В качестве решения предлагается применение гидропонных систем в качестве контролируемой модельной среды, где реакция растения на поллютант проявляется с максимальной отчётливостью, а полученные показатели пределов толерантности могут быть положены в основу как практических регламентов рекультивации, так и инструментов экологического мониторинга промышленных территорий.

В связи с изложенным, цель работы: разработать и обосновать методологию оценки фитотолерантности с использованием гидропоники как модельной среды для установления пределов толерантности растений к

поллютантам, свойственных почвам в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий является своевременной и актуальной.

Тема диссертационной работы А.Э.Харитонова и выносимые на защиту научные положения в полной мере соответствуют научной специальности 1.5.15. Экология (технические науки) в части:

п.1. Исследование влияния абиотических факторов технологических процессов и продукции нефтегазовой отрасли на живые организмы в природных и лабораторных условиях с целью установления пределов толерантности организмов к техногенному воздействию» в части разработки методологии и определения пределов толерантности для ряда растений к нефтепродуктам, ПАВ, ртути и др.;

п.2. Комплексная оценка влияния промышленных объектов горнодобывающей промышленности на природные и искусственные экосистемы. Принципы и механизмы системного экологического мониторинга» в части разработки методологических рекомендаций при подборе растений-биоиндикаторов к ТМ для экологического мониторинга загрязнённых территорий.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что автором впервые получены методом гидропоники данные пределов фитотолерантности для восьми видов растений к семи типам поллютантов, содержащихся в почвах в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий, позволяющие использовать их при разработке проектов биологической рекультивации нарушенных земель и организации системного экологического мониторинга загрязнённых территорий. Обоснован методологический подход, основанный на использовании гидропоники как модельной среды, для установления пределов фитотолерантности к поллютантам. Разработан коэффициент пересчёта «k», позволяющий с точностью до 77% аппроксимировать результаты, полученные при использовании гидропоники как модельной среды, к почвенным условиям, что повышает точность определения фитотолерантности. Установлено положительное влияние хелатирующего агента ЭДТА на смещение предела фитотолерантности высших растений к тяжелым металлам (ТМ).

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в обосновании использования гидропоники как модельной среды для оценки фитотолерантности и в установлении количественных закономерностей реагирования растений на поллютанты, характерные для почв в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий. Разработан программный комплекс «PhytoRemediator» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026615895), автоматизирующего подбор растений для 11 регионов РФ с учётом типа почвы, вида поллютанта и требуемой эффективности очистки в соответствии с требованиями ГОСТ Р

ИСО 22030. Прикладная значимость работы подтверждается актом о внедрении от производственного кооператива «Модуль» разработанной автором методики по определению фитотолерантности с использованием гидропоники как модельной среды для последующей разработки программ экологического мониторинга и проектов биологического этапа рекультивации нарушенных территорий.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации обеспечивается использованием результатов лабораторных исследований на сертифицированном оборудовании с трехкратной повторностью экспериментов; разброс значений между повторами не превышал 23%. В качестве методической основы использованы стандартизированные подходы к культивированию растений в гидропонике как модельной среде (ГОСТ Р 70575) и оценка фитотоксического действия поллютантов (ГОСТ Р ИСО 22030). Содержание ТМ в биомассе определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС). Статистическую обработку данных выполняли с использованием дисперсионного и регрессионного анализа. Полученные результаты согласуются с литературными данными. Основные положения диссертации получили адекватное отражение в 14 публикациях в рецензируемых изданиях, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus; 1 статья в журналах, индексируемых в международной базе научного цитирования GeoRef. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Выносимые на защиту положения прошли надлежащую апробацию: А.Э.Харитонов неоднократно представлял научные результаты диссертационной работы на международных и всероссийских научных форумах, в том числе организованных институтами Российской академии наук.

Анализ содержания диссертационной работы. Диссертационная работа А.Э.Харитонова изложена на 168 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 115 наименований; содержит 98 рисунков и 29 таблиц. Диссертационная работа и автореферат оформлены в соответствии с установленными требованиями, написаны ясно и логично. Поставленная цель исследования - разработка и обоснование методологии оценки фитотолерантности с использованием гидропоники как модельной среды для установления пределов толерантности растений к поллютантам, свойственных почвам в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий – достигнута в результате решения сформулированных автором логически взаимосвязанных задач (с.44-45 диссертации).

В первой главе (с. 12-36) представлен критический обзор источников, описывающих анализ техногенного загрязнения почв, прилегающих к

горнодобывающим и нефтегазовым предприятиям тяжелыми металлами, высокомолекулярными углеводородами и анионными ПАВ, рассмотрены механизмы фитотоксичности при комплексном загрязнении растений и механизмы адаптации растений к различным поллютантам. Проанализирована нормативно-правовая база биологического этапа рекультивации земель и оценки фитотолерантности растений. На основе критического анализа существующих методов определения фитотоксичности автор работы сделал выбор метода на основе гидропонных систем как модельной среды. Гидропонные системы как модельная среда занимают промежуточное положение между лабораторными экспресс-методами и почвенными испытаниями. С одной стороны, они, как и экспресс-биотесты, обеспечивают полный контроль условий среды и высокую воспроизводимость результатов; с другой стороны, в отличие от экспресс-методов, гидропоника позволяет культивировать растение на протяжении полного вегетационного цикла и получать данные не только об острой, но и о хронической токсичности, включая накопление поллютанта в биомассе (с.37 – 41).

При использовании гидропоники, как модельной экспериментальной среды, ключевым методологическим вопросом остается степень достоверности полученных результатов для прогнозирования поведения растений в реальных почвенных и полевых условиях. Автором выявлено центральное методологическое противоречие гидропонного подхода – различие в биодоступности поллютантов в гидропонике и почве; для его преодоления предложен коэффициент пересчёта «k», определяемый как отношение пределов толерантности в почве (LimPS) и в гидропонике (LimPH), что позволяет экстраполировать лабораторные данные на полевые условия.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. Тест-культуры выбраны по принадлежности к функциональным группам фитомелиорантов согласно справочникам НДТ 5.9.5 и НДТ 37. В составе бобовых трав использован клевер луговой (лат. Trifolium pratense), выполняющий азотфиксирующую функцию. В качестве злакового компонента выбран мятлик луговой (лат. Poa pratensis), способствующий формированию дернового покрова и снижению эрозионных рисков. К группе сидератов отнесена горчица сарептская (лат. Brassica juncea). Дополнительно в перечень тест-культур включены виды с биоиндикационным потенциалом: томат (лат. Solanum lycopersicum), базилик (лат. Ocimum basilicum) и кресс-салат (лат. Lepidium sativum). Для оценки фиторемедиационной эффективности выбраны щавель обыкновенный (лат. Rumex acetosa) и дайкон (лат. Raphanus sativus).

В качестве поллютантов использованы: хорошо растворимые соли ТМ ($Hg_2(NO_3)_2$, $CdSO_4$, $NiSO_4$, $ZnSO_4$); анионные ПАВ (алкилбензолсульфонаты) и высокомолекулярные углеводороды (смесь алифатических, ациклических, полициклических соединений).

Методология адресована предприятиям горнодобывающей, нефтегазовой и химической промышленности, проектным организациям и органам Росприроднадзора и Россельхознадзора. Разработанная методология (14–38 суток) не сокращает сам нормативный срок биологического этапа (2–3 года для нефтезагрязненных земель, 3–5 лет для карьеров и отвалов по ПП РФ № 800), а сокращает предшествующий предпроектный этап подбора видов, снижая риск ошибочного выбора до начала многолетних полевых работ.

Экономический анализ показал, что гидропонный скрининг (79–105 тыс. руб., 14–38 суток) в 2,4–4,9 раза быстрее почвенного метода. Фиторемедиация горчицей на 1 га (CAPEX 648 тыс. руб.) окупается за 1–2 месяца и в 6–12 раз дешевле физико-химических альтернатив; применение комплекса сокращает время принятия решений с нескольких недель до 5–10 минут.

Третья глава посвящена анализу результатов проанализированы результаты пяти серий вегетационных экспериментов, выполненных в соответствии с разработанной методологией в период с 28 марта 2023 г. по 10 мая 2025 г. На основе количественных данных морфометрии, биомассы и аналитического определения содержания поллютантов в тканях растений охарактеризована фитореакцию восьми тест-культур на шесть классов загрязняющих веществ (Cd, Ni, Zn, Hg, анионные ПАВ, высокомолекулярные углеводороды), рассчитаны пределы фитотолерантности в гидропонной среде *LimPH*, установлены корреляции между гидропонными и почвенными значениями *LimPS* через коэффициент пересчёта «k», выявлены перспективные виды - фиторемедианты и сформирована карту-справочник пороговых концентраций для практического применения при биологической рекультивации нарушенных земель и организации биоиндикационного мониторинга. Карта-справочник послужила основой для разработанного автором программного комплекса «PhytoRemediator» и предназначена для оперативного подбора видов-фиторемедиантов и биоиндикаторов под конкретные условия загрязнения территории. Пользователь, зная тип и концентрацию поллютанта, а также тип почвы и регион, может с помощью программного комплекса быстро определить наиболее эффективные виды для фитоэкстракции или биоиндикации, рассчитать число циклов посадки и стоимость утилизации биомассы.

Четвертая глава посвящена практическому применению программного комплекса «PhytoRemediator», в котором реализована

совокупность экспериментальных данных, полученных в рамках диссертационной работы. Описана его архитектура и принципы построения ПК, структуру его базы данных, алгоритм автоматизированного подбора видов, результаты апробации на реальном производственном объекте и экономическую эффективность предложенного методологического подхода в целом. Данный комплекс предназначен для автоматизации научно обоснованного подбора растений-фиторемедиантов и биоиндикаторов для конкретных условий загрязнения почвы поллютантами различного генезиса.

Замечания по диссертационной работе. По работе есть несколько замечаний:

1. Автору очень нравится термин «методология», он даже вынесен в заглавие диссертации. Однако, на взгляд оппонента более корректно использовать такие термины, как «методика», «метод», «разработка» и другие, более конкретные.
2. В тексте диссертации используются два термина: «фитотоксичность» - способность поллютантов (химических веществ) подавлять рост и развитие растений и «фитотолерантность» - способность растения переносить повреждение или его последствия, не блокируя сам фактор стресса, а компенсируя ущерб. Возникает вопрос: существует ли количественное соотношение между этими величинами?
3. В почве корневая система высших сосудистых растений тесно связана с ризосферными микроорганизмами, которые служат в том числе и биохимическими барьерами для тяжелых металлов. Наблюдаются ли ризосферные штаммы микроорганизмов в условиях гидропонного эксперимента? Может благодаря им возникает коэффициент «k»?
4. Как работает гидропонная система с нефтезагрязнениями (какова растворимость углеводородов в водном растворе)? Можно ли с помощью программного комплекса «PhytoRemediator» подобрать высшие растения с высокой толерантностью к нефтяным углеводородам?
5. Три типа почв, рассмотренных в диссертации, различались только на единицу pH друг от друга. Неужели содержание гумуса, гуминовых и фульфокислот не влияют на фиторемедиацию?

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертации, содержание которой свидетельствует о высокой научной квалификации автора.

Заключение.

В работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для очистки территорий, загрязнённых поллютантами различного генезиса (ТМ, углеводороды, ПАВ), поступающими от горнодобывающих и нефтегазовых предприятий.

Предложена методология экспресс-скрининга фитотолерантности растений с использованием гидропоники как контролируемой модельной среды, а также разработан программный комплекс «PhytoRemediator» для автоматизированного подбора растений-фиторемедиантов и биоиндикаторов с учётом типа почвы, природно-климатического региона и уровня загрязнения.

Разработана, протестирована и внедрена методология гидропонного эксперимента, включающая оценку толерантности через *LimPH* и перенос результатов в полевые условия через коэффициент пересчёта «k». Разработанный гидропонный раствор на хелатной основе обеспечил прирост биомассы кресс-салата на 40±4%, дайкона – на 42±7% и стабильный pH (6,0±0,4 против 7,0±0,5 у GHE - Франция), что подтверждает его пригодность для токсикологических экспериментов.

Диссертация **Харитонова Александра Эдуардовича** на тему: «Разработка методологического подхода для определения итотолерантности к токсическому воздействию поллютантов с использованием гидропоники как модельной среды» является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Харитонову Александру Эдуардовичу; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью. Работа в полной мере соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.5.15. Экология, а ее автор - **Харитонов**

Александр Эдуардович – достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.5.15.- Экология.

30/09/2026 г.

Владимир Алексеевич Маслобоев,

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
научный руководитель Института проблем промышленной
экологии Севера, советника директора Федерального
государственного бюджетно ия науки Федерального
исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН)
184209 Российская Федерация, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, д.14.
Эл.почта: v.masloboev@ksc.ru
Тел. служ. +7(81555)79-733
WEB-site: https://www.ksc.ru

Подпись Маслобоева В.А.
ПО МЕСТУ РАБОТЫ УДОСТОВЕРЯЮ
НИК ОБЩЕГО ОТДЕЛА
НЦ РАН
И.В. КОСТРУБ
«01» октября 2026 ГОДА