ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Харитонова Александра Эдуардовича
на тему «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 диссертационной работы. Одной из приоритетных задач современной экологии является разработка эффективных методов оценки устойчивости биологических систем к антропогенному воздействию. В зонах активного техногенеза, связанного с деятельностью предприятий горнодобывающего и нефтегазового комплексов, формируются обширные ареалы полихимического загрязнения почвенного покрова. Данные государственного экологического мониторинга свидетельствуют о систематическом превышении нормативных концентраций тяжёлых металлов и органических поллютантов на территориях, прилегающих к промышленным объектам. В этой связи количественная оценка фитотолерантности – способности высших растений противостоять токсическому воздействию – приобретает значение не только фундаментальной, но и прикладной задачи, лежащей в основе биоиндикационного мониторинга и биологической рекультивации нарушенных земель.

Существующие подходы к определению фитотолерантности сопряжены рядом ограничений: длительные сроки полевых испытаний, высокая вариабельность результатов вследствие неконтролируемых почвенных факторов, а также отсутствие унифицированных количественных критериев для сопоставления данных, полученных в разных условиях. Действующие нормативные документы в области рекультивации земель и экотоксикологической оценки почв устанавливают общие методические требования, но не содержат конкретных значений порогов толерантности для различных видов растений и приоритетных загрязнителей. Это создаёт методологический разрыв между нормативными требованиями к обоснованному подбору растений на биологическом этапе рекультивации и инструментарием, доступным проектировщикам и экологам.

Таким образом, разработка методологии, позволяющей в короткие сроки и с высокой воспроизводимостью устанавливать количественные пределы фитотолерантности к широкому спектру поллютантов, представляет собой актуальную научно-техническую проблему, имеющую непосредственное практическое значение для обеспечения экологической безопасности промышленных регионов.

Научная новизна исследования состоит в разработке оригинальной методологии определения фитотолерантности растений к техногенным поллютантам на основе гидропонных модельных систем, позволяющей получать количественные показатели с высокой воспроизводимостью (погрешность до 23%), и в установлении численных значений пределов толерантности для восьми видов растений по шести типам загрязняющих веществ, характерных для зон влияния горнодобывающей и нефтегазовой промышленности.

Значимым научным достижением является также создание алгоритма пересчёта лабораторных данных в полевые условия с помощью коэффициента «*k*», определение влияния хелатирующих агентов на фитотолерантность и разработка программного комплекса для автоматизированного подбора растений-фиторемедиантов с учётом региональных особенностей и типа загрязнения.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании и развитии методологических основ экотоксикологии растений посредством концепции использования гидропоники как стандартизированной модельной среды для количественного определения пределов фитотолерантности, формализованной через аппроксимацию дозозависимых кривых уравнением Хилла с типологизацией горметического и монотонного отклика.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждается следующими результатами:

– разработанная и апробированная методология гидропонного эксперимента позволяет определять пределы фитотолерантности за 14–38 суток, что в 2,4–4,9 раза сокращает временные затраты по сравнению с традиционными почвенными вегетационными опытами. Это даёт возможность проводить предпроектный скрининг видов для конкретных условий загрязнения в сжатые сроки, не дожидаясь завершения полевого сезона;

– созданная база данных значений $LimP_H$, $LimP_S$, коэффициентов биоаккумуляции и транслокации для восьми видов растений по шести типам поллютантов может быть непосредственно использована проектными организациями при разработке разделов проектной документации, посвящённых обоснованию выбора видового состава для биологического этапа рекультивации в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57447-2017 и справочников НДТ;

– программный комплекс «*PhytoRemediator*» (свидетельство о регистрации № 2026615895), содержащий более 150 видов растений с привязкой к 11 регионам РФ, 11 типам почв и 10 классам поллютантов, автоматизирует процесс подбора растений-фиторемедиантов и биоиндикаторов, сокращая время принятия решений с нескольких недель до нескольких минут и минимизируя риск ошибочного выбора видов на объекте.

Прикладная значимость работы подтверждена актом о внедрении в деятельность производственного кооператива «Модуль», а также использованием материалов диссертации в учебном процессе кафедры ЮНЕСКО «Зелёная химия для устойчивого развития» РХТУ им. Д.И. Менделеева и в просветительских лекциях ПАО «ФосАгро».

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается применением сертифицированного оборудования, трехкратной повторностью экспериментов, использованием стандартизированных методик и современных методов статистической обработки (дисперсионный и регрессионный анализ). Разброс значений между повторными опытами не превышал 23%, а корреляционный анализ 60 пар значений гидропонных и почвенных пределов толерантности выявил статистически значимую связь ($r = 0,89$, $p < 0,01$). Полученные данные согласуются с литературными источниками, что подтверждает их достоверность.

Основное содержание работы

Представленная диссертационная работа А.Э. Харитонова состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (115 источников, в том числе 35 на иностранных языках) и приложений. Работа изложена на 168 страницах, содержит 98 рисунков и 29 таблиц, что свидетельствует о репрезентативности экспериментального материала.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность темы, определены объект и предмет исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, отражены степень достоверности и апробации результатов.

В первой главе автором проведён системный анализ техногенного загрязнения почв в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий, рассмотрены источники поступления приоритетных поллютантов (тяжёлые металлы, анионные ПАВ, высокомолекулярные углеводороды), механизмы фитотоксичности и адаптации растений. Выполнен критический анализ существующих методологических подходов и нормативной базы, показавший отсутствие стандартизированных количественных критериев для обоснованного подбора видов растений-фиторемедиантов. На основе проведённого анализа обоснована необходимость разработки новой методологической платформы с использованием гидропоники как модельной среды. Логичным завершением главы является постановка задач собственного исследования.

Вторая глава содержит подробное описание объектов, материалов и методов исследования. Обоснован выбор восьми тест-культур, дифференцированных по функциональным группам фитомелиорантов (бобовые, злаковые, сидераты, биоиндикаторы, фиторемедианты) в соответствии со справочниками НДТ 5.9.5 и НДТ 37. Описаны два типа гидропонных установок (система периодического затопления и контейнерная установка фитильного питания), а также оригинальный питательный раствор с макро- и микроэлементами в хелатной форме (патент RU2808836C1), обладающий химической стабильностью в диапазоне pH 6,5–8,0. Разработана методология гидропонного эксперимента, состоящая из семи этапов, с детальным описанием расчёта предела фитотолерантности через аппроксимацию S-образной кривой «концентрация–эффект» уравнением Хилла, учётом горметического и монотонного типов дозозависимого отклика, а также введением коэффициента пересчёта «k» (л/кг) для трансляции значений пределов фитотолерантности из гидропонной среды в почвенную.

Третья глава посвящена представлению и анализу результатов пяти серий вегетационных экспериментов, проведённых с трёхкратной биологической повторностью. В серии I выполнена валидация разработанного питательного раствора в сравнении с коммерческим аналогом (GHE). В серии II установлены количественные пределы фитотолерантности тест-культур к Hg^{2+}, анионным ПАВ и высокомолекулярным углеводородам. В серии III определены пределы фитотолерантности к Cd^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+} с построением «чистых» дозозависимых кривых. В серии IV рассчитаны коэффициенты пересчёта «k» для трёх типов почв с различным pH; выявлена статистически значимая корреляция ($r = 0,89$) между пределами фитотолерантности в гидропонной и почвенной средах. В серии V установлено положительное влияние хелатирующего агента ЭДТА в концентрации 1 мМ на смещение предела фитотолерантности высших растений к тяжёлым металлам в среднем на 35–40 %.

Четвёртая глава содержит описание разработанного программного комплекса «*PhytoRemediator*» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026615895) – мобильного приложения для iOS, реализованного на языке Swift с применением фреймворка SwiftUI и архитектурного паттерна MVVM. Представлены структура базы данных комплекса (более 150 видов растений, 11 регионов РФ, 11 типов почв, 10 классов поллютантов), алгоритм работы, результаты апробации на производственном объекте ПК «Модуль» (Удмуртская Республика) с совпадением рекомендаций с экспертным заключением не менее 75 %, а также экономический анализ эффективности предложенного подхода, показавший, что гидропонный скрининг превосходит почвенный метод по скорости в 2,4–4,9 раза при сопоставимой достоверности.

В заключении диссертации сформулированы обоснованные выводы, полностью соответствующие поставленным задачам, отражающие достижение цели исследования и

намечающие перспективы дальнейших исследований, в том числе в области поликомпонентного загрязнения.

Приложения включают свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, акт о внедрении и методологические рекомендации, что подтверждает высокий уровень завершённости работы.

Автореферат диссертации А.Э. Харитонова полностью отражает содержание диссертации. Основные научные результаты опубликованы в 14 печатных работах, в том числе 3 статьях в журналах, индексируемых в Scopus, 1 статье в GeoRef и 1 статье в журнале, рекомендованном ВАК при Минобрнауки России. Результаты работы прошли апробацию на 20 международных и всероссийских научных мероприятиях.

Замечания по работе:

1. Каким образом обеспечивается формальное соответствие разработанной методологии действующей нормативно-технической базе, если ни один из цитируемых стандартов прямо не регламентирует определение пределов фитотолерантности в гидропонных модельных системах? ГОСТ Р ИСО 22030-2009 устанавливает метод оценки хронической фитотоксичности именно в почвенной среде с обязательным использованием двух стандартных тест-культур – овса (Avena sativa) и редьки масличной (Brassica rapa), – и не регламентирует применение гидропонных модельных систем. ГОСТ Р 70575-2022, который регламентирует общие технические требования к тепличной овощной продукции и правила её производства, но не устанавливает требований к проведению научно-исследовательских гидропонных экспериментов по оценке фитотоксичности.
2. Разработанная методология включает двухэтапное формирование концентрационных рядов: широкий скрининг и последующее сужение диапазона. В работе не определены формальные критерии выбора шага концентраций на втором этапе, что может затруднить воспроизводимость методики другими исследователями.
3. В серии V (влияние ЭДТА) для базилика по Zn^{2+} зафиксировано отрицательное смещение (–50%). Автор интерпретирует это как снижение толерантности, однако не приведено достаточного физиологического обоснования данного эффекта. Следовало бы обсудить возможные механизмы (например, повышение биодоступности Zn^{2+} в комплексе с ЭДТА, превышающее детоксикационные возможности базилика) более подробно.
4. Разработанный программный комплекс «PhytoRemediator» является инструментом для системного экологического мониторинга, однако его прямая связь с комплексной оценкой влияния промышленных объектов на экосистемы в работе продемонстрирована недостаточно.
5. В тексте диссертации встречаются единичные стилистические погрешности и опечатки, не влияющие на общее восприятие работы, но указывающие на необходимость более тщательной редакторской правки.

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

По своему содержанию диссертационная работа Харитонова А.Э. паспорту научной специальности 1.5.15 «Экология» (технические науки) пунктам: п. 1 «Исследование влияния абиотических факторов технологических процессов и продукции нефтегазовой отрасли на живые организмы в природных и лабораторных условиях с целью установ-

ления пределов толерантности организмов к техногенному воздействию»; п. 2 «Комплексная оценка влияния промышленных объектов горнодобывающей промышленности на природные и искусственные экосистемы. Принципы и механизмы системного экологического мониторинга».

Общая оценка диссертационной работы. Диссертационная работа Харитонова Александра Эдуардовича на тему «Разработка методологического подхода для определения фитотолерантности к токсическому воздействию поллютантов с использованием гидропоники как модельной среды» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технологические решения по разработке методологии количественной оценки фитотолерантности высших растений к поллютантам горнодобывающей и нефтегазовой промышленности с применением гидропонных модельных систем.

По актуальности, новизне, теоретической и практической значимости диссертационная работа Харитонова Александра Эдуардовича на тему «Разработка методологического подхода для определения фитотолерантности к токсическому воздействию поллютантов с использованием гидропоники как модельной среды» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, установленным пунктами 2.1–2.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (утвержденного приказом и. о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 №103 ОД в действующей редакции), а ее автор, **Харитонов Александр Эдуардович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.5.15 – Экология (технические науки).

Официальный оппонент, доктор технических наук (1.6.21. Геоэкология), доцент, профессор кафедры «Инженерная экология» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

(подпись) Степанова Светлана Владимировна

МП «17» сентября 2026 г.

Контактная информация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)
Адрес: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68
Телефон: +7(843) 231-40-91; +7 (843) 231-40-87
Сайт: https://www.kstu.ru/
E-mail: stepanovasv@corp.knrtu.ru

удостоверяю
Начальник отдела
кадрового делопроизводства
ФГБОУ ВО «КНИТУ»
И.А. Хромова
«17» 09 26