

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**



На правах рукописи

Харитонов Александр Эдуардович

**Разработка методологического подхода для определения
фитотолерантности к токсическому воздействию поллютантов с
использованием гидропоники как модельной среды**

1.5.15. Экология (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на базе кафедры ЮНЕСКО «Зелёная химия для устойчивого развития» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (РХТУ им. Д.И. Менделеева)

Научный
руководитель: **Макарова Анна Сергеевна,**
доктор технических наук, профессор кафедры ЮНЕСКО
«Зелёная химия для устойчивого развития»,
РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва

Официальные
оппоненты: **Степанова Светлана Владимировна,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Инженерная экология» Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

Маслобоев Владимир Алексеевич,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
научный руководитель Института проблем промышленной
экологии Севера (ИППЭС КНЦ РАН), советник
генерального директора Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Федерального
исследовательского центра «Кольский научный центр
Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН)

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение Федеральный исследовательский центр
«Почвенный институт имени В.В. Докучаева»
(ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева»)

Защита состоится 27 октября 2026 г. в 13.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций РХТУ.1.5.01, созданного на базе Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева, по адресу: 125047 Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9, Конференц-зал (аудитория 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева, а также на официальном сайте:
https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат разослан «____» сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета РХТУ.1.5.01
кандидат технических наук, доцент



Я. П. Молчанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Почвы, прилегающие к горнодобывающим и нефтегазовым предприятиям Российской Федерации, испытывают интенсивную техногенную нагрузку. По данным государственного экологического мониторинга, проводимого Росгидрометом в 2023 г., в почвах, прилегающих к горнодобывающим предприятиям, зафиксированы систематические превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) тяжелых металлов (ТМ) в 30 и более раз. Для нефтегазодобывающих регионов приоритетными поллютантами являются высокомолекулярные углеводороды и анионные ПАВ, используемые при бурении, заводнении пластов и подготовке нефти.

Установление пределов толерантности высших растений к поллютантам является важной экологической задачей. Количественные показатели фитотолерантности являются основой для организации биоиндикационного мониторинга загрязненных территорий. Высшие растения с известными пределами толерантности к конкретным поллютантам могут быть использованы в качестве биоиндикаторов на загрязненных территориях. Кроме того, фитотолерантность является инструментом для подбора растений на биологическом этапе рекультивации нарушенных территорий, когда для извлечения поллютантов из почвы и/или водоемов применяются растения-фиторемедианты.

Стоит также отметить, что тематика данного исследования тесно связана с задачами национального проекта «Экологическое благополучие» в части разработки и внедрения мероприятий по восстановлению нарушенных земель с применением биологической рекультивации на объектах, загрязненных ТМ и органическими поллютантами.

Классические подходы к определению фитотолерантности имеют серьезные ограничения:

- требуются длительные полевые испытания, длящиеся несколько вегетационных сезонов;
- погрешность при оценках накопления поллютантов растениями в пределах одного опытного участка может достигать 200 %;

– многофакторность почвенной среды (сорбционная емкость, обусловленная содержанием органического вещества, кислотностью и др.) не позволяет оценить реакцию растения в «чистом виде».

Таким образом, **актуальная научная проблема** заключается в разработке методологии, позволяющей оперативно и достоверно оценивать фитотолерантность растений. В качестве основного инструмента для решения данной проблемы в работе предложено использование гидропоники как модельной среды, позволяющей минимизировать погрешность при определении количественных пределов толерантности растений.

Степень разработанности темы. Существующие стандарты ГОСТ Р ИСО 22030 и ГОСТ Р ИСО 17616 устанавливают общие требования к биологическим методам оценки фитотоксичности, но не содержат конкретных количественных значений пределов фитотолерантности к поллютантам. Нормативно-техническая база регламентации рекультивации земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, включает также ГОСТ Р 57447-2017, устанавливающий требования о подборе травосмесей с учетом уровня загрязнения и условий произрастания, а также справочники ИТС 16-2023 (НДТ 5.9.5), ИТС 37-2023 (НДТ 37), определяющие перечень фитомелиоративных мероприятий для горнодобывающей промышленности, но не содержащие количественных критериев для обоснованного выбора растений. Справочник ИТС 53-2025 по ликвидации накопленного вреда на биологический этап не распространяется, что определяет востребованность настоящей методологии. Гидропонный скрининг с индексом толерантности (TI), аналогичным $LimP_H$, применялся фрагментарно в работах: Belimov A. et al. (2007 г.) по исследованию толерантности горчицы сарептской к Cd; Vanesa S. et al. (2013 г.) по исследованию устойчивости бобовых растений к Hg; Shufeng Wang et al. (2014 г.) по исследованию толерантности ивы цельнолистной к Pb, но без единой процедуры и сопоставления с почвой. Вопросы фитотолерантности фрагментарно рассматривались также в работах д.т.н. Воробьева Н.И. (ВНИИСХМ), д.б.н. Башмакова Д.И. (МГУ им. Н.П. Огарева).

Объект исследования. Фитотолерантность высших растений к токсическому воздействию поллютантов.

Предмет исследования. Количественные показатели пределов фитотолерантности высших растений к поллютантам с использованием гидропоники как модельной среды.

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.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих подходов к оценке фитотолерантности. Обоснование преимуществ применения гидропоники как модельной среды для определения пределов фитотолерантности к поллютантам.
2. Разработка и тестирование методологии получения пределов фитотолерантности с использованием гидропоники как модельной среды.
3. Установление пределов фитотолерантности ($LimP_H$) высших растений к поллютантам (ТМ, анионные ПАВ, высокомолекулярные углеводороды) и коэффициентов пересчета между гидропонной и почвенной средами.
4. Исследование влияния ЭДТА на изменение фитотолерантности.
5. Разработка программного комплекса и практических рекомендаций по подбору высших растений для задач биоиндикационного мониторинга и биологического этапа рекультивации нарушенных земель.

Научная новизна

1. Обоснован методологический подход, основанный на использовании гидропоники как модельной среды, для установления пределов фитотолерантности к поллютантам.
2. Впервые получены численные значения пределов фитотолерантности ($LimP_H$) для восьми видов растений к шести типам поллютантов, свойственных почвам в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий, позволяющие использовать их при разработке проектов биологической рекультивации нарушенных земель и организации экологического мониторинга загрязненных территорий.
3. Установлен коэффициент пересчёта « k », позволяющий переводить численные значения пределов фитотолерантности, полученные в гидропонной ($LimP_H$)

среде, в численные значения пределов толерантности в почвенной среде ($Lim P_s$) с точностью около 75%.

4. Установлено положительное влияние хелатирующего агента ЭДТА на смещение предела фитотолерантности высших растений к ТМ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в обосновании использования гидропоники как модельной среды для оценки фитотолерантности;
- в установлении количественных закономерностей реакции растений на поллютанты, свойственные почвам в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий (сформирована база данных пределов фитотолерантности для восьми видов растений по шести типам поллютантов);
- в дополнении научных основ прогнозирования состояния растительных сообществ, которые могут быть использованы при организации биоиндикационного мониторинга загрязненных территорий.
- разработке программного комплекса «*PhytoRemediator*» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026615895), автоматизирующего подбор растений для 11 регионов РФ с учетом типа почвы, вида поллютанта в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 22030.

Прикладное значение работы подтверждается актом о внедрении разработанной методологии определения фитотолерантности с использованием гидропоники как модельной среды в деятельность производственного кооператива «Модуль» для последующей разработки программ экологического мониторинга и проектов биологического этапа рекультивации нарушенных земель. Материалы диссертации использованы в просветительских лекциях «*ПроАгро Лекторий*» от ПАО «ФосАгро», а также при проведении летней практики для студентов кафедры ЮНЕСКО «Зеленая химия для устойчивого развития» в 2024-2026 учебных годах.

Материалы и методы исследования. Теоретической базой работы служат фундаментальные положения промышленной экологии, экотоксикологии растений и растениеводства. Методология основана на принципе дозозависимости и моделировании систем в лабораторных условиях. 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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование использования гидропонике как модельной среды, устраняющей влияние факторов почвенной среды и обеспечивающей более точное установление пределов фитотолерантности к воздействию поллютантов.
2. Впервые для восьми видов растений к шести типам поллютантов, характерных для почв в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий, получены значения пределов фитотолерантности ($LimP_H$), и установлен коэффициент пересчета «к», позволяющий с точностью около 75% переносить лабораторные данные на почвенную среду.
3. Установлено положительное влияние хелатирующего агента ЭДТА (на 35-40%), смещающее предел фитотолерантности высших растений к ТМ.
4. Разработан программный комплекс «*PhytoRemediator*», обеспечивающий автоматизированный подбор видов растений для конкретных условий загрязнения с учетом типа почвы и природно-климатического региона в 11 субъектах РФ и формирующий инструмент системного экологического мониторинга и планирования биологической рекультивации нарушенных земель.

Степень достоверности результатов. Достоверность подтверждена результатами лабораторных исследований на сертифицированном оборудовании с трехкратной повторностью экспериментов; разброс значений между повторами не превышал 23%. Полученные данные согласуются с литературными данными.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на 20 научных мероприятиях (2021–2026 гг.), включая: IV Международную научно-практическую конференцию «Устойчивое развитие в сельском хозяйстве и экологическая безопасность» (EESTE-IV-2024) (Республика Таджикистан, г. Душанбе, 2024 г.); VI Всероссийскую научно-практическую конференцию «Технологии переработки отходов с получением новой продукции» (г. Киров, 2024 г.); Международный молодежный форум «Россия – Африка: ядерное образование как

потенциал для успешного развития региона» (г. Москва, 2025 г.); II Международную научно-исследовательскую конференцию «Научный синтез: пересечение идей и технологий» (г. Москва, 2025 г.); Международный конкурс экопроектов «Экология без границ» (г. Орел, 2025 г.); XVIII Международную научно-практическую конференцию, посвященную 100-летию издания очерков В. И. Вернадского «Биосфера» (г. Москва, 2026 г.); Международный молодежный форум «Россия – Африка: ядерное образование как потенциал для успешного развития региона» (г. Москва, 2026 г.) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus; 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе научного цитирования GeoRef; 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК при Минобрнауки РФ.

Личный вклад автора. Автором выполнен анализ научной литературы, разработана методология, проведены все экспериментальные исследования, выполнена обработка и интерпретация данных, подготовлены публикации, написан текст диссертации и разработан программный комплекс «*PhytoRemediator*».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание изложено на 168 страницах и включает 98 рисунков и 29 таблиц. Список литературы – 115 источников (35 на иностранных языках).

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.5.15. «Экология» (технические науки):

– 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначены актуальность темы, цели и задачи исследования, определены объект и предмет работы, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимости, положения, выносимые на защиту.

В первой главе обоснована необходимость применения гидропоники как модельной среды для оценки пределов фитотолерантности ($LimP_H$) к поллютантам. Проведен анализ источников поступления в почву ТМ, анионных ПАВ и высокомолекулярных углеводов, характерных для почв в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий. Проанализированы механизмы фитотоксичности и адаптации растений. Определено, что почвенные методы оценки фитотолерантности характеризуются высокой вариабельностью результатов (до 200%) и длительностью. Одной из ключевых проблем является перенос данных из гидропонной системы в реальные почвенные условия. Глава решает техническую задачу устранения методологического разрыва между существующими нормативными требованиями к рекультивации и отсутствием стандартизированного инструмента подбора видов. На основе анализа сформулированы задачи исследования.

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).

Для проведения экспериментов использованы два варианта гидропонных установок:

- 1) система периодического затопления (Рисунок 1);
- 2) контейнерная установка фитильного питания (Рисунок 2).



Рисунок 1 – Гидропонная система фитильного питания

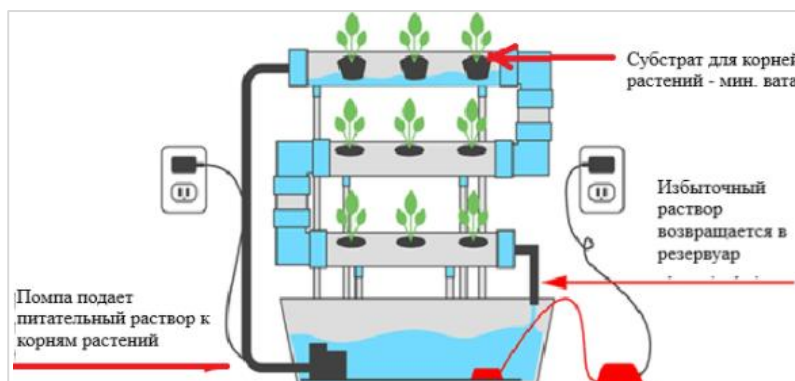


Рисунок 2 – Гидропонная система периодического затопления

Разработан оригинальный питательный раствор для гидропоники с макро- и микроэлементами в хелатной форме (*патент RU2808836C1*), обладающий химической стабильностью в диапазоне pH 6,5–8,0.

Разработана методология гидропонного эксперимента, направленная на получение количественных значений пределов фитотолерантности к поллютантам, включающая семь этапов:

- 1) Подготовка растительного материала (пробподготовка семян, проращивание).
- 2) Приготовление питательного раствора и настройка гидропонной установки на заданные режимы (температура, влажность, корректировка pH раствора, освещенность).
- 3) Формирование концентрационных рядов поллютантов, добавляемых к гидропонному раствору для определения предела фитотолерантности.
- 4) Измерение морфометрических параметров растений (высота надземной части, длина корня и др.), фиксация визуальных признаков стресса (хлороз, некроз и др.), определение биомассы (надземная и корневая части), химический анализ (ААС – для ТМ, ИК-спектрофотометрия и ГХ-МС – для углеводов, MBAS-метод – для ПАВ).
- 5) Расчет эффекта проводят по результатам морфометрических измерений для каждой концентрации поллютанта. Эффект (например, замедление роста, %) рассчитывают относительно контроля по формуле 1:

$$\text{Эффект}(\%) = \frac{\text{эталон} - \text{опыт}}{\text{эталон}} * 100\% \quad (1).$$

Затем для каждого вида растения строят кривую «концентрация–эффект» (Рисунок 3). Аппроксимацией S-образной зависимости уравнением Хилла (формула 2) определяют концентрацию, при которой эффект достигает 50 %. Данное значение принимают за предел фитотолерантности в гидропонной среде ($LimP_H$, мг/л).

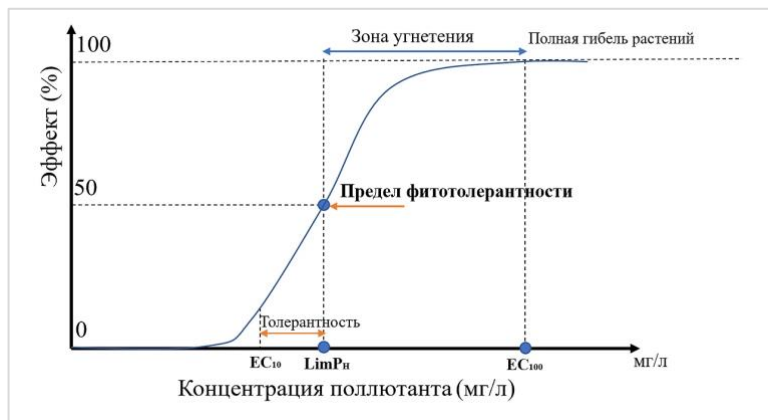


Рисунок 3 – Универсальная кривая «концентрация–эффект»

Уравнение Хилла:

$$E = \frac{E_{max} \cdot A^n}{EC_{50}^n + A^n} \quad (2),$$

где E – эффект (замедление роста, %); E_{max} – максимальный эффект (100 %); A – концентрация загрязнителя; EC_{50} – концентрация 50%-го эффекта; n – коэффициент Хилла.

В дополнение к универсальной кривой используются два частных случая дозозависимого отклика, представленные в координатах «интенсивность жизнедеятельности – концентрация» (Рисунки 4 и 5).

Рисунок 4 иллюстрирует кривую «концентрация — интенсивность жизнедеятельности» для Hg^{2+} , ПАВ и высокомолекулярных углеводов, проявляющих горметический эффект в малых дозах. По оси X указана концентрация загрязнителя (мг/л), по оси Y – интенсивность жизнедеятельности (показатель активности роста и функционирования растения – обратное отображение «эффекта»). Кривая имеет колоколообразную форму. При малых концентрациях наблюдается стимуляция роста (гормезис), затем достигается пик, после которого начинается угнетение. Точка $LimP_H$ соответствует 50%-му снижению интенсивности жизнедеятельности относительно пикового значения.

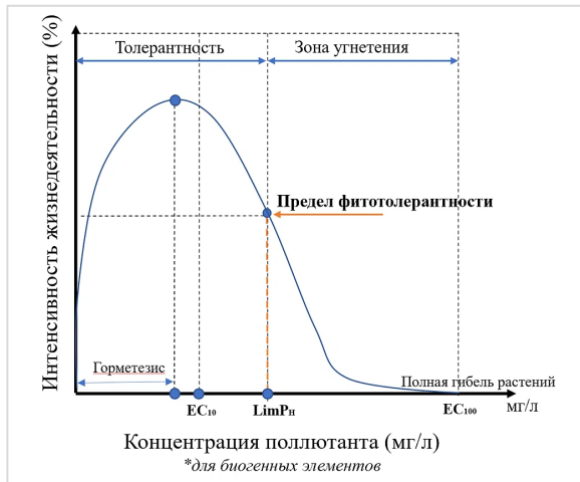


Рисунок 4 – Кривая «интенсивность жизнедеятельности – концентрация» для биогенных загрязнителей

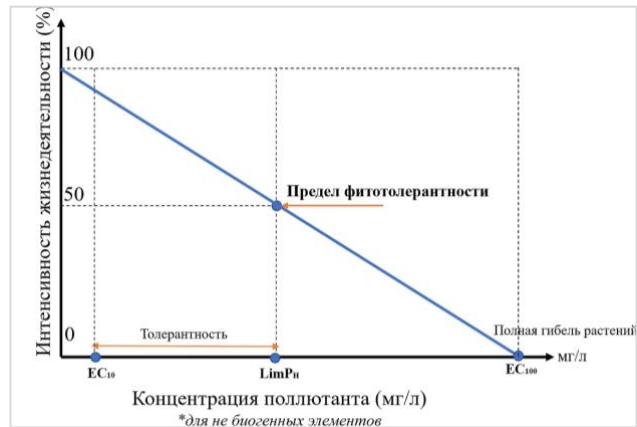


Рисунок 5 – Кривая «интенсивность жизнедеятельности – концентрация» для небиогенных загрязнителей

Рисунок 5 отражает зависимость для небиогенных ТМ (Hg^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+}): стимуляция отсутствует, с увеличением концентрации кривая монотонно убывает от 100% (контроль) до 0% (гибель); $\text{Lim}P_H$ соответствует 50%-му снижению интенсивности жизнедеятельности относительно исходного уровня. Зона толерантности лежит между ЕС_{10} и $\text{Lim}P_H$, зона угнетения – между $\text{Lim}P_H$ и ЕС_{100} .

Оба графика являются производными от базовой S-образной кривой (Рисунок 3) и служат для визуализации и интерпретации экспериментальных данных в зависимости от природы загрязнителя, при этом во всех случаях $\text{Lim}P_H$ остается единым количественным критерием толерантности.

Для переноса гидропонных данных в почвенные условия вводят коэффициент пересчета « k » (л/кг):

$$k = \frac{\text{Lim}P_S}{\text{Lim}P_H} \quad (3),$$

где $\text{Lim}P_H$ (мг/л) – предел фитотолерантности в гидропонике, $\text{Lim}P_S$ (мг/кг) – предел фитотолерантности в почве. Коэффициент « k » варьирует от 0,66 до 4 в зависимости от вида, загрязнителя и типа почвы.

Другие измеряемые параметры (КБА, КТ, биомасса) не участвуют в расчете $\text{Lim}P_H$, но заносятся в базу данных (БД) программного комплекса «*PhytoRemediator*» для сортировки видов растений по фитотолерантности и подбора оптимальных растений-фиторемедиантов или биоиндикаторов для конкретных условий загрязнения.

6) Статистическая обработка результатов методом дисперсионного анализа с вычислением наименьшей существенной разницы и регрессионным анализом.

7) Применение программного комплекса «PhytoRemediator»: занесение полученных данных о фитотолерантности в БД комплекса и его использование для подбора растений под задачи фиторемедиации.

В соответствии с разработанной методологией проведено пять серий экспериментов с трехкратной биологической повторностью:

В серии I испытания проводились на гидропонной установке периодического затопления (Рисунок 2). В качестве тест-культур выбраны: *базилик, укроп, салат, кориандр, дайкон*. Сравнивались действия питательных растворов: авторский хелатный концентрат и коммерческий раствор «*GHE Flora Series*» (*Франция*). Оценивались рост, прирост биомассы и стабильность pH раствора.

В серии II испытания производились на гидропонной установке фитильного типа (Рисунок 1), которая состояла из 7 контейнеров по 4 минераловатных мата с 20 семенами каждого вида высшего растения: *базилик, горчица, дайкон, клевер*. В качестве поллютантов были выбраны соли Hg^{2+} , анионные ПАВ (алкилбензолсульфонаты), высокомолекулярные углеводороды (смесь алифатических, ациклических, полициклических соединений). Концентрации поллютантов отображены в Таблице 1.

Таблица 1 – Концентрации вносимых поллютантов в серии II

№ контейнера	Вид поллютанта	Концентрация поллютантов (на 7-й день), мг/л	Концентрация поллютантов (на 20-й день), мг/л
1	Эталон	0	0
2	Hg^{2+}	10,5	21
3	Hg^{2+}	210	420
4	углеводороды	0,5	1
5	углеводороды	2	4
6	ПАВ	0,5	1
7	ПАВ	2	4

Серия III проводилась в два этапа. На первом этапе (широкие концентрационные ряды) использовали гидропонную установку периодического затопления (Рисунок 2), состоящую из 8 контейнеров по 6 минераловатных матов с 20 семенами каждого из 6 тест-культур: *базилик, кресс-салат, щавель, горчица, мятлик,*

томат. В Таблице 2 отображены концентрации Cd^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , внесенные одновременно на 7-е сутки.

Таблица 2 – Концентрации вносимых поллютантов в серии III (1-й этап)

№ контейнера		1	2	3	4	5	6	7	8
Вид поллютанта / Концентрация поллютанта, мг/л	Cd^{2+}	Эталон	2	10	20	60	100	200	400
	Ni^{2+}		4	20	40	120	200	400	800
	Zn^{2+}		23	115	230	690	1150	2300	4600

Второй этап проводили на аналогичных шести тест-культурах в отдельных контейнерах для каждого ТМ (Cd^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}): 16 контейнеров, включая эталон, что исключило взаимодействие катионов и позволило получить «чистые» дозозависимые кривые. Использованы суженные концентрационные ряды поллютантов, отображенные в Таблице 3. По итогам серии определяли рост, биомассу, LimP_H .

Таблица 3 – Концентрации вносимых поллютантов в серии III (2-й этап)

№ контейнера		1	2	3	4	5	6	7	8
Вид / Концентрация поллютанта, мг/л	Cd^{2+}	Эталон	10			20			40
	Ni^{2+}			20			40		
	Zn^{2+}				115			230	
№ контейнера		9	10	11	12	13	14	15	16
Вид / Концентрация поллютанта, мг/л	Cd^{2+}			60			80		
	Ni^{2+}	80			120			160	
	Zn^{2+}		460			690			920

Серия IV проведена в почвенной среде для установления коэффициента пересчета « k » между гидропонными и почвенными данными. Использованы шесть тест-культур аналогично серии III эксперимента. Почвенные образцы использовались трех типов: чернозем (рН 7,2), серая лесная (рН 6,6) и подзолистая почва (рН 5,5) – отобраны в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02. Поллютанты вносились в почву единообразно в виде водного раствора солей ТМ с последующим тщательным перемешиванием субстрата для равномерного распределения по объему, в соответствии с принципами пробподготовки по Методическим указаниям ЦИНАО (1992 г.) с выдержкой 7 суток до высадки проростков. Для каждого типа почвы подготовлено по 36 горшков (6 эталонных и по 6 на каждую из пяти концентраций ТМ), внесенных отдельно в соответствии с концентрациями второго этапа серии III (Таблица 3). По итогам серии определяли рост, биомассу, предел толерантности по почве (LimP_S) и коэффициент « k » (л/кг).

В серии V изучены факторы, модулирующие фитотолерантность.

Эксперименты выполнены на гидропонной установке периодического затопления

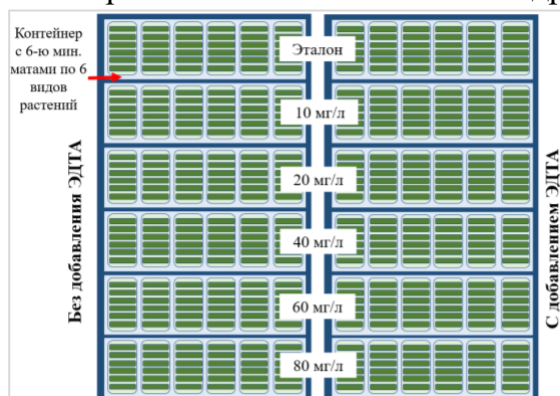


Рисунок 6 – Схема гидропонных установок при внесении поллютанта Cd^{2+}

(Рисунок 2), состоящей из 16 контейнеров с концентрациями поллютантов из второго этапа серии III (Таблица 3). В контейнерах размещались по 6 мат с 20 семенами каждого из шести тест-культур (Рисунок 6): базилик, кресс-салат, щавель, горчица, мятлик, томат. ЭДТА ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$) в концентрации 1 мМ вносили совместно с питательным раствором. По итогам серии V определяли рост, биомассу, LimP_H .

ЭДТА выбрана в качестве хелатирующего агента исходя из высокой устойчивости комплексов с исследуемыми ТМ ($\lg K = 16,5$ для Cd^{2+} , 18,8 для Cu^{2+} , 16,5 для Zn^{2+}). Известные ограничения ЭДТА (низкая биоразлагаемость в почве и риск дефицита $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ при концентрациях выше 2–3 мМ) учтены при выборе рабочей дозы 1 мМ, при которой указанные эффекты не проявляются.

В третьей главе представлены результаты пяти серий экспериментов.

Серия I. Разработанный совместно с автором гидропонный раствор превзошел коммерческий раствор GHE по приросту биомассы. Кресс-салат проявил усиление роста на $40 \pm 4\%$, дайкон – на $42 \pm 7\%$ (Рисунок 7). На Рисунке 8 выявлено, что pH питательных растворов на всем протяжении эксперимента составлял: для авторского – $6,1 \pm 0,4$ ед.; для GHE – $7,0 \pm 0,5$ ед. Значение pH авторского раствора является оптимальным для максимального усвоения растениями питательных микро- и макроэлементов из раствора, а также подходит для дальнейшего определения фитотолерантности.

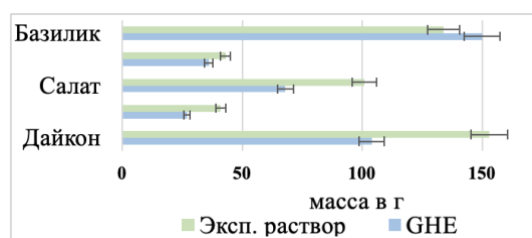


Рисунок 7 – Биомасса растений (без корневой части)

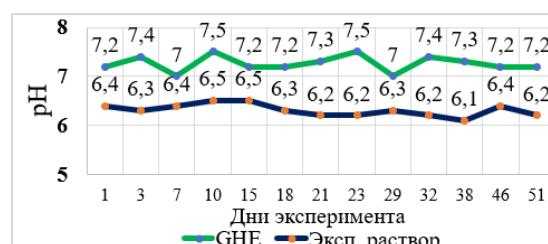


Рисунок 8 – Показатели pH гидропонных растворов

В Серии II определен предел фитотолерантности ($LimP_H$) к Hg^{2+} , анионным ПАВ и высокомолекулярным углеводородам (Таблица 4).

Таблица 4 – Предел фитотолерантности тест-культур в серии II

Поллютант	Базилик	Клевер	Горчица	Дайкон
Hg^{2+} , мг/л	$31,5 \pm 10,5$	$31,5 \pm 10,5$	$31,5 \pm 10,5$	315 ± 105
ПАВ, мг/л	$1,5 \pm 0,5$	3 ± 1	$1,5 \pm 0,5$	3 ± 1
WD-40, мг/л	$1,5 \pm 0,5$	$0,75 \pm 0,25$	$1,5 \pm 0,5$	$0,75 \pm 0,25$

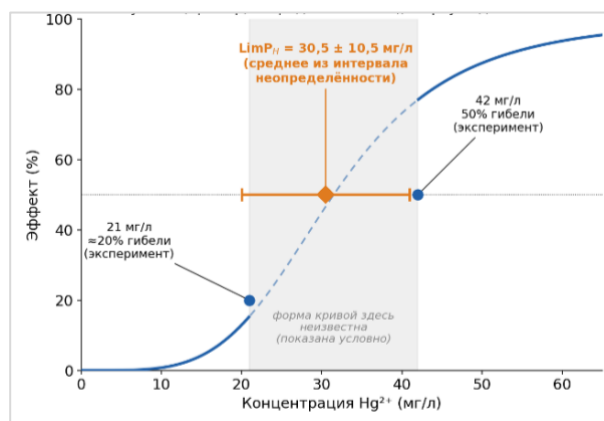


Рисунок 9 – График «Концентрация-эффект» для Базилика по Hg^{2+}

На Рисунке 9 представлена зависимость «концентрация – эффект» для базилика при воздействии ионов Hg^{2+} . Установлено, что при концентрации 21 мг/л гибель растений составила 20 %, а при 42 мг/л достигла 50%. Таким образом, искомая эффективная концентрация $LimP_H$, соответствующая 50%-му летальному исходу, находится в интервале от 21 до 42 мг/л; по результатам аппроксимации ее значение оценено как $31,5 \pm 10,5$ мг/л.

В Серии III по результатам серии первого этапа (по аналогии с серией II) определены концентрационные ряды толерантности растений к полиметаллическому загрязнению. Итоговые результаты приведены в Таблице 5. Погрешность определения концентраций предела толерантности составляла до 23%.

Таблица 5 – Предел фитотолерантности в широком концентрационном ряду

Вид растения	Cd^{2+} , мг/л	Ni^{2+} , мг/л	Zn^{2+} , мг/л
Кресс-салат	40 ± 20	80 ± 40	460 ± 230
Горчица сарпетская	40 ± 20	80 ± 40	460 ± 230
Мятлик луговой	15 ± 5	30 ± 10	$172,5 \pm 57,5$
Щавель	15 ± 5	30 ± 10	$172,5 \pm 57,5$
Томат	15 ± 5	30 ± 10	$172,5 \pm 57,5$
Базилик	40 ± 20	80 ± 40	460 ± 230

Во втором этапе определен предел фитотолерантности $LimP_H$ в узком концентрационном ряду, выявленном из результатов первого этапа. Итоговые результаты второго этапа приведены в Таблице 6.

Таблица 6 – Предел фитотолерантности в суженном концентрационном ряде

Вид растения	Cd ²⁺ , мг/л	Ni ²⁺ , мг/л	Zn ²⁺ , мг/л
Кресс-салат	40	80	460
Горчица сарпетская	60	40	690
Мятлик луговой	20	20	115
Щавель	20	40	230
Томат	20	20	230
Базилик	40	80	460

В Серии IV по результатам роста и взвешивания биомассы растений в почвенной среде получены следующие результаты предела фитотолерантности, отраженные в Таблице 7.

Таблица 7 – Предел фитотолерантности в почвенной среде

Почва	pH 5,5			pH 6,6			pH 7,2		
Вид растения	Cd ²⁺ (мг/кг)	Ni ²⁺ (мг/кг)	Zn ²⁺ (мг/кг)	Cd ²⁺ (мг/кг)	Ni ²⁺ (мг/кг)	Zn ²⁺ (мг/кг)	Cd ²⁺ (мг/кг)	Ni ²⁺ (мг/кг)	Zn ²⁺ (мг/кг)
Кресс-салат	60	120	690	60	80	690	80	80	690
Горчица сарпетская	80	80	460	80	120	460	80	120	690
Мятлик луговой	40	40	115	60	80	115	60	80	115
Щавель	20	80	460	20	80	460	20	80	460
Томат	40	80	460	60	80	690	60	120	690
Базилик	60	120	460	60	160	690	80	120	460

При сравнении результатов определения фитотолерантности, полученных в почвенной и гидропонной среде, получены данные по коэффициентам пересчета «*k*». Коэффициент «*k*» рассчитан для 3-х типов почв с разным pH.

Значения «*k*» получены исходя из разницы роста и биомассы растений в гидропонной и почвенной средах: $k > 1$ означает, что в почве биодоступность поллютанта ниже (часть поллютанта иммобилизована), и растение «видит» меньшую эффективную концентрацию, поэтому $LimP_s$ (почвы) больше; $k < 1$ означает, что почвенные условия (например, кислая реакция) повышают биодоступность поллютанта, и $LimP_s$ (почвы) меньше. Итоговые результаты представлены в Таблице 8.

Таблица 8 – Коэффициент пересчета «*k*» в системе «гидропоника-почва», л/кг

Почва	pH 5,5			pH 6,6			pH 7,2		
Вид растения	Cd ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	Cd ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	Cd ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺
Кресс-салат	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5
Горчица сарпетская	1,3	2,0	0,66	1,3	3,0	0,66	1,3	3,0	1,0
Мятлик луговой	2,0	2,0	1,0	3,0	4,0	1,0	3,0	4,0	1,0
Щавель	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0	2,0
Томат	2,0	4,0	2,0	3,0	4,0	3,0	3,0	6,0	3,0
Базилик	1,5	1,5	1,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	1,0

В серии V определено, что внесение 1 мМ ЭДТА смещает $LimP_H$ в среднем на 31 % (диапазон 7–50 %) в сторону высоких концентраций ТМ (подробнее в Таблице 9).

Таблица 9 – Показатели предела фитотолерантности при добавлении ЭДТА

Растение	$LimP_H$ с ЭДТА (1мМ)		
	Cd ²⁺ (мг/л)	Ni ²⁺ (мг/л)	Zn ²⁺ (мг/л)
Кресс-салат	80 (+ 100%)	120 (+ 50%)	690 (+ 50%)
Горчица сарпетская	60 (+0%)	40 (+0%)	690 (+0%)
Мятлик луговой	40 (+ 100%)	40 (+ 100%)	230 (+ 100%)
Щавель	20 (+0%)	80 (+ 100%)	460 (+ 100%)
Томат	40 (+ 100%)	20 (+0%)	460 (+ 100%)
Базилик	40 (+ 50%)	80 (- 100%)	460 (- 50%)

*В скобках указаны значения увеличения предела фитотолерантности по сравнению с данными (в %), полученными без добавления ЭДТА.

Четвертая глава посвящена практической реализации методологии в виде программного комплекса «*PhytoRemediator*» – мобильного приложения для iOS (разработанное на языке Swift с применением фреймворка SwiftUI и архитектурного паттерна MVVM), предназначенное для автоматизированного подбора растений-фиторемедиантов и биоиндикаторов.

БД комплекса сформирована на основе собственных экспериментальных данных для восьми видов растений и дополнена сведениями из литературных источников: «*Global Hyperaccumulator Database*» (университет Квинсленда), монографии Ильина В.Б. «Тяжелые металлы в системе почва – растение» (1991 г.), по видам гипераккумуляторам, а также рецензируемых публикаций с сопоставимой методикой измерения порога фитотоксичности.

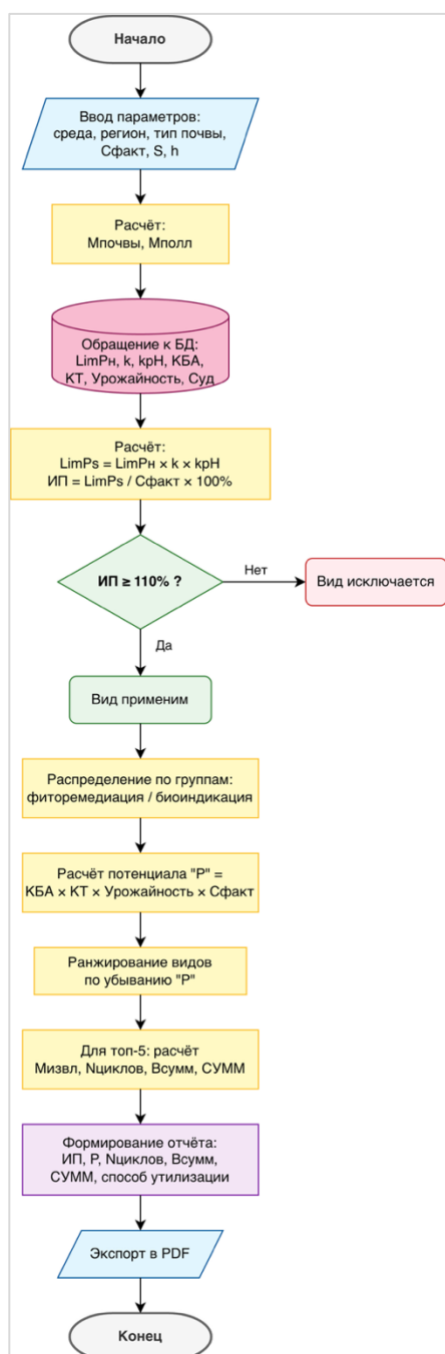


Рисунок 10 – Алгоритм программного комплекса «PhytoRemediator»

БД включает 11 регионов (Центральная Россия, Северо-Запад, Юг России, Северный Кавказ, Поволжье, Урал, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток, Калининградская область, Крым), 11 типов почв, 10 классов поллютантов (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg, As, Cr, углеводороды, ПАВ). Региональная и почвенная привязка нужны для отбора видов, совместимых с климатом и почвой конкретной местности.

Алгоритм работы комплекса включает шесть этапов (Рисунок 10). На первом этапе пользователь задает исходные параметры: тип среды, регион, тип почвы, концентрации поллютантов, площадь участка и глубину загрязненного слоя.

На втором этапе для каждой тест-культуры из БД рассчитывается скорректированный почвенный предел толерантности:

$$\text{LimPs} = \text{LimPн} \times \langle k \rangle \times \langle k(\text{pH}) \rangle \quad (4),$$

где LimPн – предел в гидропонике (мг/л), k – коэффициент пересчета для типа почвы (0,66–4 л/кг), $k(\text{pH})$ – поправка на кислотность.

На третьем этапе вычисляется индекс применимости (ИП), отбор производится при $\text{ИП} \geq 110\%$:

$$\text{ИП} = \frac{\text{LimPs}}{C_{\text{ФАКТ}}} \quad (5).$$

На четвертом этапе для отобранных видов рассчитывается интегральный потенциал фитоэкстракции (Р) и выполняется сортировка по убыванию Р:

$$P = \text{КБА} \times \text{КТ} \times \text{Урожайность} \times C_{\text{ФАКТ}} \quad (6).$$

На пятом этапе для пяти перспективных видов рассчитываются параметры рекультивации: масса поллютанта, извлекаемая масса за цикл, число циклов (N), суммарная биомасса и стоимость утилизации:

$$N = \text{ceil} \times \frac{M_{\text{полл}}}{M_{\text{извл}}} \quad (7).$$

На шестом этапе формируется итоговый отчет в формате PDF.

Также стоит отметить, что практическая апробация программного комплекса выполнена в производственном кооперативе «Модуль» на объекте промышленного предприятия в Удмуртской области с загрязнением почвы Cd^{2+} (5 мг/кг), Ni^{2+} (10 мг/кг), Zn^{2+} (50 мг/кг). Рекомендованы виды-биоиндикаторы: базилик, кресс-салат, мятлик луговой, щавель. Совпадение рекомендаций с экспертным заключением составило не менее 75%, использование комплекса позволило сократить трудозатраты на этапе предпроектного подбора.

Внедрение предполагает применение методологии на предпроектной стадии Проекта рекультивации земель (ПРЗ): анализ проб почвы → подбор видов через «*PhytoRemediator*» либо самостоятельный скрининг → включение результатов в раздел ПРЗ по ГОСТ Р 57447-2017. 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 (САРЕХ 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено применение гидропоники как контролируемой модельной среды для установления пределов фитотолерантности высших растений к техногенному воздействию поллютантов, характерных для деятельности

горнодобывающих и нефтегазовых предприятий Российской Федерации, проблема загрязнения почв которыми была обозначена во введении. В результате проведения исследования получены следующие выводы:

1. Выявлены концентрации поллютантов (солей ТМ, анионных ПАВ и высокомолекулярных углеводов), характерных для зон влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий, для последующего определения пределов фитотолерантности растений. Обоснованы преимущества гидропоники как модельной среды, позволяющей количественно оценивать фитотолерантность.

2. Разработана, протестирована и внедрена методология гидропонного эксперимента, что создает основу для воспроизводимого определения порогов фитотолерантности.

3. Разработанный гидропонный раствор обеспечил прирост биомассы кресс-салата на 40 ± 4 %, дайкона – на 42 ± 7 % по сравнению с коммерческим раствором GHE, а также показал более стабильный уровень pH ($6,2 \pm 0,3$ против $7,0 \pm 0,5$ у GHE), что свидетельствует о лучшем усвоении элементов и подтверждает его пригодность для оценки фитотолерантности.

4. Проведена серия вегетационных экспериментов для 8 тест-культур по 6 типам поллютантов. Установлены количественные пределы фитотолерантности к воздействию ТМ, анионным ПАВ и высокомолекулярным углеводам, характерным для почв в зонах влияния горнодобывающих и нефтегазовых предприятий.

5. Выявлена статистически значимая корреляция между пределами фитотолерантности в гидропонной и почвенной средах. Коэффициент пересчета « k » ($0,66-4$ л/кг) прогнозирует полевые значения $LimP_S$ с погрешностью ± 15 %, обеспечивая правомерность переноса лабораторных данных в полевые условия при экологическом мониторинге нарушенных территорий.

6. Установлено положительное влияние хелатирующего агента ЭДТА на смещение границы фитотолерантности, $LimP_H$ смещается в среднем на 35-40%.

7. Разработан и зарегистрирован программный комплекс «PhytoRemediator», база данных которого (собственные экспериментальные и обобщенные литературные сведения) включает более 150 видов растений, 11 регионов РФ, 11 типов почв и 10

классов поллютантов. Комплекс обеспечивает научно обоснованный подбор растений-индикаторов и фиторемедиантов для биологической рекультивации на основе количественных показателей фитотолерантности.

Таким образом, цель исследования достигнута. Предложенные методологические и инструментальные решения позволяют использовать гидропонику как стандартизированную модельную среду при планировании биологического этапа рекультивации и организации биоиндикационного мониторинга.

Последующие исследования в данной области могут быть связаны с расширением базы данных программного комплекса за счет новых видов-фиторемедиантов, а также с разработкой методологии для объектов с поликомпонентным загрязнением.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК и международных базах

1. **Kharitonov A.E., Makarova A.S., Velieva E.R.** Ecological and methodological foundations of the system of conservation of natural ecosystems, the system of protection of biotopes from degradation and pollution by pollutants // BIO Web of Conferences 2025. Vol. 160. № EESTE2024 02020. – Pp. 1-11. DOI 10.1051/bioconf/202516002020 (**Scopus**).
2. **Kharitonov A.E., Makarova A.S., Velieva E.R.** Adaptation of the methodology for sequential five-step fractionation of elements from bottom sediments of lake Imandra // BIO Web of Conferences 2025. Vol. 160. № EESTE2024 02026. – Pp. 1-12. DOI 10.1051/bioconf/202516002026 (**Scopus**).
3. **Kharitonov A.E., Makarova A.S., Velieva E.R.** Assessment of the limits of plant resistance to the toxic effects of heavy metals in a model environment – hydroponics // World of Mining – Surface & Underground 78 (2026) No. 1. – Pp. 35-41 (**Scopus**).
4. **Харитонов А.Э., Макарова А.С.** Определение границ толерантности к поллютантам в гидропонике как модельной среде // Journal of Agriculture and Environment 2026 №5 (69), Pp 1-7 // DOI 10.60797/JAE.2026.69.8 (**GeoRef, BAK**).

5. Харитонов А.Э., Макарова А.С. Методологический подход к определению фитотолерантности к токсическому воздействию поллютантов с использованием гидропоники // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – 2026. – Т. 1. – № 1. – С. 27–31. DOI 10.37882/2223-2966.2026.01.35 (Перечень ВАК).

Статьи в изданиях РИНЦ:

1. Харитонов А.Э., Федосеев А.Н. Использование фиторемедиации для очистки почв и водоемов от тяжелых металлов // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. XXXVI. – № 2. – С. 39–41 (РИНЦ).

2. Харитонов А.Э. Использование фитоэкстракции для очистки загрязненных ртутью почв // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 3 – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 205-207 (РИНЦ).

3. Харитонов, А. Э., Федосеев А.Н. Использование фиторемедиации для очистки почв и водоемов от тяжелых металлов // Образование и наука для устойчивого развития: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения профессора Г.А. Ягодина и 50-летию публикации доклада Римскому клубу "Пределы роста" в 2-х частях – Москва, 26–28 апреля 2022 года. Часть 1. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2022. – С. 200-202 (РИНЦ).

4. Харитонов А.Э., Пищаева К.В., Мурадян С.А. Разработка гидропонных растворов с применением микроэлементов в хелатирующей форме // Сборник тезисов XXII научной школы молодых ученых, Москва, 23–24 мая 2023 года под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова – Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2023. – С. 73 (РИНЦ).

5. Харитонов А.Э., Пищаева К.В., Мурадян С.А. Анализ производства и использования гидропонных растворов с применением микроэлементов в хелатирующей форме // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. XXXVII. – № 3. – С. 16–18 (РИНЦ).

6. Харитонов А.Э., Пищяева К.В. Анализ производства и использования гидропонных растворов с применением микроэлементов в хелатирующей форме // Образование и наука для устойчивого развития : XV Международная научно-практическая конференция, посвященной Международному году фундаментальных наук в интересах устойчивого развития, Москва, 2023 год – Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2023 – С. 208-210. (РИНЦ).

7. Харитонов А.Э., Пищяева К.В., Мурадян С.А. Разработка гидропонных растворов с применением микроэлементов в хелатирующей форме // II Лаверовские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызовы – Сборник научных материалов Всероссийской конференции – Архангельск, 2023. – С. 938–942 (РИНЦ).

8. Харитонов А.Э., Макарова А.С. Методика использования гидропоники для просчета влияния антропогенных и абиотических факторов технологических процессов, продуктов нефтегазовой отрасли на растения в лабораторных условиях // Образование и наука для устойчивого развития: Материалы XVI Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию РАН – Часть 2: Секция "Окружающая среда и устойчивое развитие" – РХТУ, 2024. – С. 178–181 (РИНЦ).

9. Харитонов А.Э., Федосеев А.Н., Макарова А.С. Основы эколого-методической системы хранения природных экосистем и защиты биотопов от разрушения и загрязнения вредными веществами // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции: Технология переработки отходов с получением новой продукции – г. Киров, 18–19 ноября 2024 г. – С. 214–218 (РИНЦ).

Патенты и свидетельства:

– Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026615895 «*PhytoRemediator*» / А.Э. Харитонов, А.С. Макарова; правообладатель Харитонов А.Э.

– Акт о внедрении результатов диссертационной работы в научную и проектную деятельность ПК «Модуль» от 12.11.2025 года (Внутренний приказ № 162 СТ от 11.09.2025 г.)