

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на соискание степени доктора философии (Ph.D) по специальности «6D010700 – Биотехнология»

МАМИРОВА АЙГЕРИМ АМАНЖОЛОВНА

Восстановление загрязненных хлорорганическими пестицидами почв с помощью биотопливных растений второго поколения с последующим каскадным использованием биомассы

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена изучению фиторемедиационного потенциала перспективных энергетических растений в отношении загрязнения почв органического и неорганического характера и разработке методов повышения эффективности фиторемедиации и увеличения производства биомассы для последующего преобразования в биопродукты.

Актуальность темы исследования.

Мониторинг окружающей среды регулярно выявляет места, загрязненные различными ксенобиотиками, которые ограничивают использование этих мест. Таким образом, поиск экономически рентабельных и экологически чистых методов очистки матриц окружающей среды является важным направлением, которое заслуживает быть исследованным. Однако лишь лимитированное количество исследований посвящено смешанному загрязнению экосистем, тогда как в естественных условиях это наиболее распространенная экологическая проблема. Подобные смешанные загрязнения окружающей среды являются острой экологической проблемой Республики Казахстан. Участки с подобным загрязнением есть в разных регионах из-за развития различных сфер экономики: нефтегазовой отрасли, металлургии, добычи урана или функционирования космодрома Байконур. Несмотря на огромный вклад этих видов деятельности в национальную экономику, их выбросы создают различные очаги проблемных смешанных загрязнений почв, требующих стратегий управления, чтобы противостоять такой ситуации и защитить местное население. Более того, интенсивная практика сельского хозяйства и бывшие склады устаревших пестицидов, датируемые 1960-ми годами, очень серьезно угрожают окружающей среде Казахстана, Украины и Молдавии.

Одним из необходимых шагов по предотвращению токсического воздействия загрязнителей на окружающую среду и здоровье человека является восстановление загрязненных почв. В настоящее время широко используются два направления рекультивации почв: извлечение ксенобиотиков и физико-химическая обработка. Эти технологии чрезвычайно энергоемки и требуют больших капиталовложений. Поэтому фиторемедиация как альтернатива физическим или химическим методам восстановления почв является весьма перспективной технологией, гармонично взаимодействующей с экосистемой. Эта технология основана на использовании растений для рекультивации почв,

загрязненных токсичными микроэлементами (ТМЭ), углеводородами, пестицидами, нефтепродуктами, а также радионуклидами. Однако фиторемедиация имеет некоторые ограничения, такие как длительный период восстановления, необходимость утилизации загрязненной биомассы, а также медленное разложение органических ксенобиотиков в почве.

В настоящее время применение биоэнергетических растений в процессе фиторемедиации набирает популярность в соответствии со стратегией биоэкономики, направленной на поиск альтернативного сырья для преобразования в энергетические продукты для достижения устойчивого роста. Эти растения должны обладать способностью быстрого роста и производства достаточного количества биомассы для удаления значительного количества загрязняющих веществ из почвы. Несомненно, характер восстановления будет напрямую зависеть от способности растения поглощать и накапливать соответствующий загрязнитель. В долгосрочной перспективе важным свойством биоэнергетических растений, которое необходимо учитывать, является высокое содержание лигнина, целлюлозы и лигноцеллюлозы, которые определяют качество производимой биомассы и влияют на ее применение.

Цель исследования. Целью исследования является выявление физиологические особенностей воздействия хлорорганических пестицидов (ХОП) и ТМЭ на энергетические виды растений для оптимизации технологии фиторемедиации и разработка методов преобразования биомассы, образующейся во время фиторемедиации, в биопродукт.

Задачи исследования:

1. Определить энергетические растения второго поколения, подходящие для применения в фиторемедиации почв, загрязненных ХОП или ТМЭ, производящие высокий урожай биомассы и способные накапливать и/или разлагать ХОП или ТМЭ.

2. Изучить толерантность энергетических культур к высоким концентрациям ХОП или ТМЭ в почве.

3. Оптимизировать рост, производство биомассы и фиторемедиационный потенциал энергетических культур путем внесения органических и неорганических добавок в почвы, загрязненные ХОП или ТМЭ.

4. Разработать способ утилизации загрязненной биомассы энергетических культур, полученной в результате процесса фиторемедиации.

Объекты исследования: Почвы: а) исторически загрязненная ХОП; б) искусственно загрязненная ТМЭ. Энергетические растения второго поколения: а) *Miscanthus sinensis* And.; б) *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu.

Методы исследования: Физиологические (визуальный осмотр растений на предмет наличия индикаторов стресса; измерение продуктивности биомассы), химические (агрохимический профиль загрязненной почвы; атомно-абсорбционная спектрометрия с электротермической атомизацией; газовая хроматография с детектором захвата электронов), биотехнологические (микрклональное размножение), программа для анализа и редактирования изображений Adobe Illustrator и программное обеспечение для статистического

анализа R. Экспериментальные данные имели достаточное количество повторов и были статистически достоверными.

Научная новизна исследования. В ходе исследования были впервые обнаружены: а) способность *Miscanthus sinensis* переносить высокие концентрации многочисленных ХОП, включая 15 СОЗ-пестицидов, в почвах; б) потенциал производства биочара из загрязненных корневищ *Miscanthus* × *giganteus* для достижения «zero-waste» технологии в фиторемедиации.

Теоретическая и практическая значимость исследования. В диссертации рассмотрены фундаментальные аспекты морфологических и физиологических параметров устойчивости энергетических культур второго поколения к хлорорганическим пестицидам и токсическим микроэлементам для решения теоретических концепций моделей адаптации растений к воздействию ксенобиотиков.

Таким образом, диссертация имеет теоретическое и практическое значение.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Почва вокруг бывшего склада устаревших пестицидов загрязнена 24 наименованиями ХОП, включая 15 СОЗ пестицидов (альдрин, хлордан, 2.4-ДДД, 4.4-ДДД, 4.4-ДДЭ, 4.4-ДДТ, дикофол, дильдрин, эндрин, эндосульфат α и β , ГХБ, α -, β - и γ -ГХЦГ и гептахлор) в концентрациях, превышающих ПДК до 1000 раз, которые представляют угрозу для окружающей среды и здоровья человека.

2. *M. sinensis* толерантен к сильному загрязнению почвы (145 мг кг^{-1}) многочисленными ХОП, в отличие от *M. × giganteus*. Индекс толерантности растения, равный 0.99, подтверждает вышеуказанное утверждение. Высота растений и сухая масса надземной биомассы уменьшились на 5% и 23%, в то время как длина и сухая масса корней увеличились на 16% и 11%, соответственно. Было обнаружено, что ХОП влияют на содержание пигментов хлорофилла: *Chl_a* снизился на 30%, *Chl_b* – на 37%, а каротиноиды – на 29%.

3. *M. sinensis* может поглощать ХОП из загрязненной почвы и гипераккумулировать дикофол, хлордан, дильдрин, эндосульфат сульфат, β -ГХЦГ и ГХБ с ВСФ 66.8, 35.9, 21.1, 21.7, 6.6 и 28.7. Энергетическая культура обладает потенциалом для биоконцентрации 4.4-ДДЭ, 4.4-ДДТ, метоксихлор, γ -ГХЦГ, альдрин, гептахлор, эндосульфат β , эндрин альдегид и гексабромбензен с коэффициентами биоконцентрации, превышающими 1 и равными 2.1, 1.5, 3.9, 1.1, 1.6, 2.7, 2.6, 1.2 и 2.1, соответственно, для фитостабилизации 4.4-ДДЭ, дикофола и хлордана с коэффициентами транслокации равными 0.49, 0.07 и 0.47, и для фитоэкстракции β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ и гептахлора с TLF выше 1 и равными 4.04, 84 и 2.01, соответственно. 4-ДДТ, метоксихлор, альдрин, дильдрин, эндосульфат β , эндосульфат сульфат и эндрин альдегид равномерно распределены внутри растения (TLF = 1.0). Корреляционный анализ подтвердил, что поглощение ХОП из почвы зависит от их гидрофобности: чем выше гидрофобность, тем ниже накопление в тканях растений. Было обнаружено, что *M. sinensis*, растущий на загрязненной почве, собранной вблизи бывшего склада пестицидов, развил механизм физиологической устойчивости во время

адаптации к ХОП, то есть накопление и перемещение ХОП в системе “почва – корень – надземная биомасса” с использованием механизмов фитостабилизации и фитоэкстракции. *M. sinensis* может быть использован для восстановления почв, загрязненных ХОП.

4. Оптимизация условий выращивания *M. sinensis* в почве, загрязненной ХОП, показала, что внесение Tween 20 увеличивает высоту растений и длину корней на 16.6% и 20.8%, соответственно; увеличивает накопление и обеспечивает фитостабилизирующий эффект в отношении альдрина, хлордана, дильдрина, эндосульфана β , эндосульфана сульфата, эндрин альдегида, гептахлора, гексабромбензена, метоксихлора, 4.4-ДДТ, и 4.4-ДДЭ, увеличивая их поглощение и снижая их транслокацию в НЗБ в 2.2 и 10.4, 1.4 и 6.0, 2.2 и 11.3, 1.8 и 6.1, 2.5 и 8.2, 2.3 и 10.1, 1.3 и 8.5, 1.3 и 16.0, 1.2 и 13.6, 2.1 и 17.5, 1.6 и 3.9 раза, соответственно; снижает поглощение ГХБ, β -ГХЦГ и γ -ГХЦГ в 2.7, 1.3 и 23.1 раза, соответственно; обеспечивает фитоэкстракцию дикофола, увеличивая миграцию в 2.2 раза: применение Tween 20 повышает эффективность поглощения и фитостабилизации ХОП. Внесение АУ в почву, загрязненную ХОП, показало, что снижается поглощение альдрина, хлордана, дильдрина, эндосульфана β , эндосульфана сульфата, эндрин альдегида, ГХБ, гептахлора, гексабромбензена, метоксихлора, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, и 4.4-ДДТ в 1.6, 3.0, 1.6, 1.1, 1.4, 1.5, 3.0, 1.4, 2.0, 1.5, 2.4, 23.1 и 1.4 раза, соответственно; усиливается фитостабилизации всех ХОП, кроме хлордана (транслокация в НЗБ увеличилась в 18 раз), в диапазоне 1.9 до 115 раз.

5. *M. × giganteus* толерантен (Т1 до 2.0) высокие концентрации V (в 11.7 раза выше ПДК), Sr (59.8×ПДК), Cr (2.7×ПДК), Ni (2.1×ПДК) и особенно Pb (4.6×ПДК и 33.9×ПДК), которые были наиболее биодоступными из-за искусственного загрязнения почвы, следовательно, отсутствия процесса старения почвы. Энергетическая культура, способная поглощать ТМЭ из загрязненной почвы: в условиях множественного загрязнения ТМЭ *M. × giganteus* может биоконцентрировать и фитоэкстрагировать Mn с ВСФ для НЗБ и корней 1.2-1.6 и 0.5-0.7, соответственно; с увеличением концентрации Pb в почве накопление Mn в НЗБ и корнях уменьшилось на 25.6% и 31.8%, соответственно. В отношении четырех оставшихся ТМЭ, а именно Cu, Zn, Sr и Pb, *M. × giganteus* не обладает потенциалом для их биоконцентрации (ВСФ меньше 1, даже 0.1, за исключением Zn) в условиях множественного загрязнения ТМЭ. Более того, *M. × giganteus* не может поглощать и накапливать V, Cr и Ni при множественном загрязнении почвы ТМЭ.

6. Оптимизация условий выращивания *M. × giganteus* в почве, загрязненной ТМЭ, показала, что инокуляция корневищ RGPB *B. altitudinis* КР-14 улучшает физиологические параметры, такие как высота и сухая масса листьев, стеблей и корней на 28.2%, 49.1%, 85.9% и 76.,0%, соответственно; обеспечивает фитостабилизирующий эффект в отношении Cu, Sr и Pb, увеличивая их поглощение на 30.6%, 30.3% и 39.7%, соответственно.

7. Загрязненная биомасса *M. × giganteus* может быть использована для производства биочара с целью достижения “zero-waste” технологии в фиторемедиации. Средний выход биочара, полученного либо из соломы Мискантуса

(НЗБ), либо из корневищ, составляет 31.2%. Биочар обладает хорошими термохимическими и физико-химическими свойствами, которые можно применять в процессе улучшения качества почвы и фиторемедиации: загрязненная биомасса может быть преобразована в биочар для содействия фиторемедиации.

Уровни организация исследований. Исследования, описанные в этой диссертации, проводились на уровне тканей, органов, организмов и экосистем.

Связь с планом основных научных работ. Диссертационные исследования по изучению различных энергетических растений на предмет возможности восстановления почв, загрязненных ксенобиотиками органического и неорганического происхождения, были поддержаны программой BR05236379 «Комплексная оценка воздействия неупотребленных и запрещенных к использованию пестицидов на генетический статус и здоровье населения Алма-тинской области», предоставленным Комитетом по науке Министерства образования и науки Республики Казахстан, частично выполнено в Институте генетики и физиологии МОН РК. Часть исследовательской работы, направленная на изучение конвертации загрязненной биомассы в биопродукт, была поддержана немецко-чешским проектом CORNET «MiscanValue» и проводилась на факультете окружающей среды Университета Яна Евангелиста Пуркине в Усти-над-Лабем, Чешская Республика.

Личный вклад автора. Все основные результаты, описанные здесь, выполнены и собраны автором. Кроме того, основные результаты исследований, анализы, таблицы, данные и рисунки созданы автором, а все новые наблюдения и выводы сделаны на основе результатов, полученных от работы и исследования Ph.D докторанта.

Апробации исследования. Основные результаты и наблюдения представлены и подтверждены публикациями в престижных международных научных журналах, включенных в базу данных Scopus, Web of Science, журналах, рекомендованных ККСОН, а также в трех главах книги «Phytotechnology with Biomass Production: Sustainable Management of Contaminated Sites», опубликованное издательством Taylor & Francis. Результаты обсуждались на научных семинарах института, докладывались на международных и республиканских научных конференциях:

- на Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі» (2019, Алматы, Казахстан);
- на Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі» (2020 г., Алматы, Казахстан).

Публикации. Большая часть содержания диссертации была опубликована в 20 научных работах, в том числе в 7 научных статьях с импакт-факторами (IF = 6.789; IF = 4.32; IF = 4.223 (2); IF = 3.417; IF = 1.99) в соответствии с Базой данных SCOPUS. 5 статей в научных журналах, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (ККСОН МОН РК), 3 тезиса в материалах международных конференций, 3 главы в книге «Phytotechnology with Biomass Production: Sustainable Management of Contaminated Sites», опубликованной в

издательстве Taylor & Francis, 1 глава в книге «Key Questions on Climate Change and Sustainability. Toward the Make-or-Break Years», опубликованной издательством Printeko, 1 брошюра и 1 кадастр.

Структура диссертации. Диссертация написана на 111 страницах, содержит обозначения и сокращения, введение, обзор литературы, материалы и методы, результаты и обсуждения, выводы, ссылки из 237 источников, содержит 14 таблиц и 21 рисунок.