

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Пэн Ичжоу

**Пороговые уровни загрязнения тяжёлыми металлами Cd, Pb и As
красноцветных грунтов по данным фитотестирования
(западная часть Сычуаньской впадины, Китай)**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре инженерной и экологической геологии
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – *Григорьева Ия Юрьевна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент*

Официальные оппоненты – *Лаврусевич Андрей Александрович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Российский государственный
геологоразведочный университет имени Серго
Орджоникидзе», экологический факультет, заведующий
кафедрой урбозоологии*

*Терехова Вера Александровна,
доктор биологических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова», факультет почвоведения,
кафедра земельных ресурсов и оценки почв, профессор*

*Галкин Александр Николаевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П. М. Машерова», факультет
химико-биологических и географических наук, кафедра
экологии и географии, профессор*

Защита диссертации состоится 19 декабря 2025 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27), а также на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3653>

Автореферат разослан 14 ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



Харитонова Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сычуаньская впадина, являясь одним из важнейших зерновых регионов Китая, отличается широким распространением красноцветных грунтов, которые в результате многолетней интенсивной сельскохозяйственной деятельности подвергаются серьёзной угрозе многокомпонентного загрязнения тяжёлыми металлами.

Несмотря на наличие общенационального стандарта качества почвы (GB 15618–2018), его универсальный характер снижает точность и эффективность оценки уровней загрязнения именно для красноцветных грунтов Сычуаньской впадины. Традиционные химические методы анализа, хотя и позволяют получить высокоточные данные по содержанию загрязнителей, требуют значительных финансовых затрат, квалифицированного персонала и продолжительного времени, при этом не отражают совокупного экологического влияния многокомпонентного загрязнения. В такой ситуации перспективным направлением становится фитотестирование — биологический метод, основанный на оценке реакции роста и развития растений. Ключевым параметром здесь служат пороговые концентрации токсичных элементов, определяющие максимально допустимый уровень их содержания, при котором растение сохраняет нормальные физиологические функции в конкретной среде (Ковальский 1963, 1974). Для Сычуаньской впадины наиболее целесообразно устанавливать данные пороговые показатели на основе местных культур с целью быстрого выявления потенциально загрязнённых сельскохозяйственных угодий и своевременного предупреждения экологических рисков.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в изучение загрязнения красноцветных грунтов Сычуаньской впадины тяжёлыми металлами (пространственное распределение, накопление элементов, источники загрязнения и их опасность для сельскохозяйственных культур) внесли Liu Shuling, Liu Hanhu, Mengling Yang, Han Weiqiang, Du Jing, Wang Guiyin, Peng Yizhou, Ji Yang, Wang Juwei, Zhang Chengjiang и Tan Heping. Методологическую основу фитотестирования (физиологические механизмы токсичности, биоиндикаторы, поглощение и транспорт металлов, стандартизация методов) сформировали работы А.А. Алтаевой, И.Ю. Григорьевой, С.И. Колесникова, О.В. Николаевой, Е.В. Прудниковой, А.А. Рахлеевой, В.А. Тереховой, A.Baroohshi, S.K. Mkumbo, M.Riaz, N.Vryncianu, A.Branzini, V.Ernst, M. Verloo, B.Prasad, E.Almeshyan, Lavli Shikhare, Mihaela Roshka, Yan Lu, V.Ramirez и многих других.

Однако в большинстве исследований не учтена пороговая зависимость реакции биосистем от концентрации металлов при смешанном загрязнении. В целом фитотестирование на грунтах Сычуаньской впадины ограничено, взаимодействия металлов (синергизм, антагонизм, аддитивность) изучены недостаточно, отсутствует комплексная токсикологическая оценка с учётом реакции местных культур.

Цель и задачи исследования. На основе методов фитотестирования проанализировать влияние состава красноцветных грунтов на рост типичных местных культур — рапса (*Brassica napus* L.) и сорго (*Sorghum bicolor* L.), а также оценить пороговые уровни загрязнения характерными тяжёлыми металлами (Cd, Pb и As) и их различными комбинациями, с целью выявления процессов миграции, трансформации, взаимодействия и биотоксичности данных элементов, а также определения их экологической значимости.

Достижение цели работы сводилось к решению следующих **задач**.

1. Провести системное исследование состава, свойств и особенностей генезиса красноцветных грунтов западной части Сычуаньской впадины, учитывая природные условия региона.
2. С учётом таких распространённых тяжёлых металлов, как Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg и As, оценить уровень загрязнения красноцветных грунтов, используемых под интенсивное сельскохозяйственное производство на западе Сычуаньской впадины, и выявить основные типы характерных загрязняющих веществ.
3. С помощью фитотестирования оценить совокупное влияние химического состава красноцветных грунтов на рост местных растений, а также установить, какие факторы оказывают наиболее выраженное стрессовое воздействие.
4. На основе результатов фитотестирования количественно определить пороговые уровни токсичности для Cd, Pb и As в условиях одиночного и комбинированного загрязнения.
5. Выявить механизмы дифференцированного воздействия тяжёлых металлов на физиологическое состояние растений в условиях одиночного и смешанного загрязнения, а также исследовать их синергетические и антагонистические эффекты.
6. Сравнить чувствительность различных растений и их отдельных органов к загрязнению тяжёлыми металлами, а также оценить влияние содержания CaCO₃ в грунте на биологическую доступность металлов и токсичность для растений.
7. Исходя из уровней загрязнения и пороговых параметров, определённых для характерных загрязнителей, предложить целевые меры по восстановлению территорий распространения красноцветных грунтов.

Объектами исследования являются красноцветные грунты западной части Сычуаньской впадины, их характерные загрязняющие вещества (Cd, Pb, As), а также типичные местные сельскохозяйственные культуры: рапс (*B. napus* L.) и сорго (*S. bicolor* L.).

Фактический материал в виде образцов красноцветных грунтов, использованных в настоящем исследовании, был отобран автором в период с декабря 2021 года по январь 2022 года в западной части Сычуаньской впадины Китая. В процессе отбора проб использовались соответствующие инструменты и оборудование, геологическая карта масштаба 1:200 000

(Sichuan Geological Bureau Oil Census Brigade, 1960), «Карта типов грунтов Китая» (Gao et al., 2000) и данные дистанционного зондирования, предоставленные 405-й геологоразведочной партией Управления по разведке и разработке минеральных ресурсов провинции Сычуань, которая также оказывала содействие в ходе полевых исследований. Семена, используемые в фитотоксикологических экспериментах (включая 10 видов растений и их многочисленные сорта на предварительном этапе тестирования), были получены автором от Управления семеноводства города Чэнду. Оборудование и реагенты, необходимые для проведения фитотестирования, были предоставлены Григорьевой И.Ю.

Научная новизна результатов исследований

1. Реализован комплексный подход к выявлению источников накопления тяжёлых металлов (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg) в красноцветных грунтах с применением моделей APCS-MLR, и PMF, что обеспечило принципиально новую дифференцированную оценку вклада природных и антропогенных факторов.

2. Разработан новый комплексный подход к эколого-геологическому анализу состава и свойств красноцветных грунтов, включающий интегрированную методику фитотестирования (на основе культур *B. napus* L. и *S. bicolor* L.). В сочетании с многофакторными статистическими инструментами (RDA, XGBoost-SHAP) это позволило системно выявить и количественно подтвердить ведущую роль Cd и As в подавлении роста растений.

3. Определены пороговые концентрации (IC₅₀ и EC₁₅₀) Cd, Pb и As при одиночном и смешанном загрязнении красноцветных грунтов, выявлена смена антагонистического взаимодействия металлов синергическим и аддитивным при повышенных дозах, что углубляет представления о совокупной токсичности исследуемых тяжёлых металлов и As.

4. На примере грунтов с различным содержанием карбоната кальция (29 и 5%) установлена ведущая роль CaCO₃ в снижении биодоступности и фитотоксичности Cd, Pb и As; раскрыты механизмы миграции и трансформации данных металлов в карбонат-содержащих красноцветных грунтах.

Теоретическая и практическая значимость

1. На основе анализа состава красноцветных грунтов из района Сычуаньской впадины определены приоритетные загрязнители, выявлены их источники и проведена оценка существующих уровней загрязнения.

2. Рассчитаны пороговые уровни токсичности (IC₅₀ и EC₁₅₀) при одиночном и смешанном загрязнении, которые позволили подтвердить ключевую роль Cd, Pb и As в угнетении роста растений и служат ориентиром для последующего проведения работ по фиторемедиации.

3. Использование для фитотестирования широко культивируемых в рассматриваемом регионе культур (рапса и сорго) позволит упростить оценку уровня загрязнения и повысить

эффективность мониторинга, а полученные в работе результаты могут быть применены при разработке региональных экологических стандартов.

4. Сформирована модель миграции и биологической доступности Cd, Pb и As в красноцветных грунтах с учётом их химико-минерального состава, что проясняет механизмы влияния многокомпонентного загрязнения в системе «грунт–растение».

5. Учёт выявленных «дозо–эффектных» соотношений при совместном воздействии тяжёлых металлов повышает точность прогноза загрязнения и позволяет совершенствовать экотоксикологические подходы.

6. Установлена регуляторная роль CaCO₃ в биодоступности Cd, Pb и As, что даёт возможность оптимизировать методы восстановления территорий распространения загрязнённых красноцветных грунтов.

Основные методы исследований. Работа выполнена по интегрированной схеме, ориентированной на реальные задачи аграрного применения и экологической безопасности красноцветных грунтов: полевое обследование → типизация грунтов по содержанию CaCO₃ (29 % и 5 %) → оценка исходного ингибиования роста → выделение ключевых факторов → идентификация целевых металлов → анализ их порогового содержания при одиночном и смешанном загрязнении. Уровни и источники загрязнения определены с использованием методов APCS-MLR — метода абсолютных главных компонент с множественной линейной регрессией (*Absolute Principal Component Scores – Multiple Linear Regression*) и PMF — метода положительной матричной факторизации (*Positive Matrix Factorization*). Проведено более 2000 фитотестирований (*B. napus* L., *S. bicolor* L.), по результатам которых Cd, As и CaCO₃ выделены как основные детерминанты отклика применяемых для фитотестирования культур. Пороговые уровни EC₁₅₀/IC₅₀ для одиночных воздействий оценены по дозо-эффектным моделям TSK (*Trimmed Spearman–Karber*) и VSL (*Variable-Slope Logistic*); для смесей применена модифицированная модель TU (аддитивность/синергизм/антагонизм). Минералогические и химические анализы выполнены стандартными методами; геостатистическая обработка и моделирование — в средах R/Python и ГИС. Часть аналитического оборудования, использованного в исследовании, приобретена за счёт средств Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

Защищаемые положения

1. Красноцветные грунты в пределах западной части Сычуаньской впадины широко загрязнены тяжелыми металлами, их содержание превышает фоновые значения и достигают пороговых уровней. Основными источниками повышенного содержания Cr, Cu и Pb является унаследованность состава красноцветных грунтов от исходных пород и органические удобрения сельскохозяйственных животных; As и Cd – применение пестицидов и минеральных удобрений;

Zn и Ni – промышленные сточные воды.

2. Существующие значения показателей состава, состояния и свойств красноцветных грунтов в западной части Сычуаньской впадины значительно подавляют рост рапса (*B. napus L.*) и сорго (*S. bicolor L.*). Основные факторы воздействия — содержание мышьяка (As) и кадмия (Cd), а также карбоната кальция (CaCO₃).

3. Пороговые уровни загрязнения красноцветных грунтов Cd, Pb и As в условиях одиночного и смешанного загрязнения зависят от содержания CaCO₃. В грунте с высоким содержанием CaCO₃ (29 %) одиночное загрязнение Cd (1–20 мг·кг⁻¹) стимулирует рост рапса, тогда как влияние на сорго незначительно. Pb (100–2000 мг·кг⁻¹) и As (20–500 мг·кг⁻¹) индуцируют дозозависимое ингибирование. При смешанном загрязнении ингибирование роста усиливается, при этом смеси с As наиболее токсичны. В грунте с низким содержанием CaCO₃ (5 %) все пороговые уровни ниже, ингибирующий эффект проявляется на ранних стадиях.

4. Механизм воздействия Cd, Pb и As на культуры высших растений при одиночном и смешанном загрязнении существенно различается в красноцветных грунтах с разным содержанием CaCO₃, что приводит к различиям при оценке фитотоксичности. При одиночном загрязнении Cd, Pb и As оказывают специфическое воздействие, тогда как при смешанном загрязнении ионы этих металлов конкурируют за связывание с Ca²⁺ и CO₃²⁻, образуя комплексы, изменяющие их ионную активность и вызывающие в растениях ответные реакции, связанные с антагонистическими, синергетическими или аддитивными взаимодействиями.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на: X Международной научной конференции молодых учёных «Молодые – Наукам о Земле» (Москва, 2022); Международной молодежной научной школе «Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций» (Москва, 2023); XXXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2024).

Публикации автора по теме диссертации. Результаты проведенных исследований, основные положения и вопросы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 5 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, которые рекомендованы для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.21. Геоэкология: «Geology, Ecology, and Landscapes» (2025), «Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология» (2024), «Ecological Indicators» (2024), «Science of the Total Environment» (2024).

Личный вклад автора заключается в сборе, обработке и анализе литературных и архивных материалов; выборе участков исследования и отборе проб красноцветных грунтов; лабораторном анализе свойств грунтов; проведении фитотестирования как на исходных образцах красноцветных грунтов, так и на образцах с модельным загрязнением Cd, Pb и As; оценке влияния текущего состояния красноцветных грунтов на рост характерных сельскохозяйственных культур

региона; выявлении ключевых факторов и расчёте пороговых концентраций для рапса и сорго при различных условиях загрязнения.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 226 страницах основного текста, включающего введение, восемь глав, заключение и список литературы (193 источника, в том числе 11 фондовых), и дополнена 5 приложениями. Текст содержит 72 иллюстрации и 35 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю — доценту И. Ю. Григорьевой за всестороннюю поддержку, конструктивные замечания и научное руководство, которые внесли неоценимый вклад в разработку и реализацию настоящего исследования. Автор также выражает благодарность всему коллективу кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова под руководством профессора В.Т. Трофимова за оказанную поддержку и ценные рекомендации в процессе выполнения исследования. Особую признательность автор выражает С.К. Николаевой, Т.Н. Лубковой (кафедра геохимии), В.В. Крупской, С. А. Гараниной, С. В. Закусину и М. С. Чернову за помощь в проведении специальных исследований для части экспериментальных образцов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Развитие и современное состояние исследований по фитотестированию

В главе систематизируется эволюция фитотестирования как метода биологической диагностики, его стандартизация и значение для оценки загрязнения тяжёлыми металлами. На основе сопоставления традиционных химических методов с биодиагностикой, показано, что фитотестирование — высокочувствительный и комплексный инструмент экологической оценки, широко используемый для выявления экологических рисков в отношении загрязнённых грунтов, водоёмов и отходов. Обобщены механизмы и опыт применения фитотестирования при оценке загрязнения тяжёлыми металлами, а также раскрыты процессы миграции, трансформации и токсичности металлов. Отмечены четыре ключевых пробела современных исследований: недостаточная экспериментальная проработка многометалльных взаимодействий; неясность сопряжения поведения загрязнителей с характеристиками грунтов; ограниченная региональная репрезентативность тест-растений и нехватка исследований устойчивости растений в специфических грунтово-климатических условиях региона. В соответствии с этим в настоящей диссертации поставлены задачи использования фитотестирования как основы методологии оценки экологического состояния грунтов; анализа пороговых уровней концентрации в красноцветных грунтах Cd, Pb и As с учётом их дифференциации по содержанию CaCO₃ и формирование направлений дальнейших исследований для совершенствования методов восстановления территорий распространения загрязнённых красноцветных грунтов.

Глава 2. Красноцветные грунты западной части Сычуаньской впадины: состав, структура, свойства и природные условия районов их распространения

Глава посвящена обзору литературы о геологическом строении, условиях образования, составе и основных свойствах красноцветных грунтов Сычуаньской впадины.

Красноцветные грунты широко распространены в южной влажно-тропической климатической зоне Китая, при этом Сычуаньская впадина является их типичным центром распространения. Она отличается изолированной орографической структурой с преобладанием холмистого рельефа, что обуславливает формирование выраженного водно-теплового градиента в западной части впадины. Гидрологическая система представлена поверхностными водами водотоков бассейна реки Янцзы и вертикально-зональным распределением грунтовых вод в зоне выветривания, обусловленным тектоническими и климатическими факторами. Первичный субтропический лесной покров в пределах впадины практически полностью заменён на агроценозы, где доминируют посевы риса, кукурузы и рапса. Сычуаньская впадина расположена в зоне сочленения нескольких тектонических структур. Красноцветные грунты формируются в пределах впадины на красных полевошпатовых песчаниках, пылеватых песчаниках и аргиллитах мезозойских отложений триасовой (T_3), юрской (J_{3p} , J_{3s} , J_{2s}) и меловой (K_{1c}) систем (рис.1).

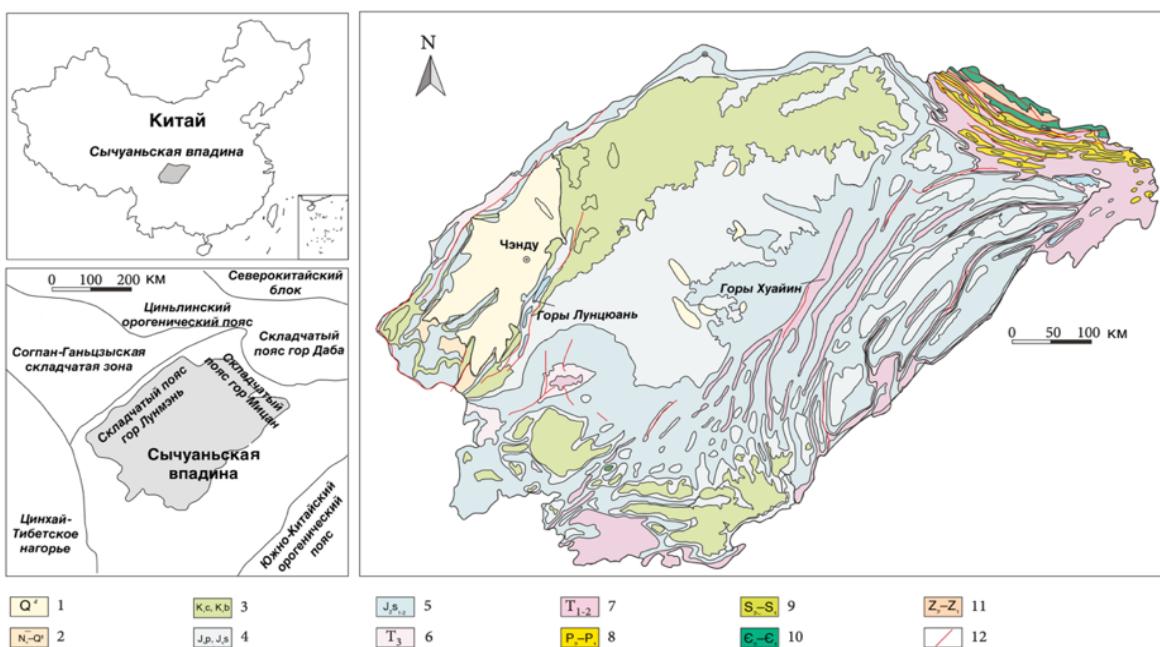


Рисунок 1. Геологическая карта в пределах Сычуаньской впадины (Китай): 1 — песчано-галечниковые отложения (Q^4) ; 2 — грубозернистые песчаники (N_{2-1}) ; 3 — меловые грубозернистые песчаники и аргиллиты (K_{c}, K_b) ; 4 — песчаники и аргиллиты (J_{3p}, J_{3s}) ; 5 — песчаники и аргиллиты (J_{2-3}) ; 6 — песчаники и аргиллиты (T_3) ; 7 — карбонатные породы (T_{1-2}) ; 8 — сланцы, аргиллиты и туфы (P_{2-1}) ; 9 — сланцы, аргиллиты и филлиты (S_{2-1}) ; 10 — известняки и доломиты (E_{2-1}) ; 11 — карбонатные породы (Z_{2-1}) ; 12 — зоны разломов

В горных породах, залегающих в пределах западной части Сычуаньской впадины, широко развита трещиноватость, цементация пород слабая; под воздействием обильных осадков субтропического муссонного климата они легко дезинтегрируются. Преобладает физическое

выветривание; химическое выветривание и дальнейшее преобразование состава пород подавляются нейтрально-щелочной реакцией среды, обусловленной высоким содержанием CaCO_3 . Образовавшиеся красноцветные грунты характеризуются маломощным профилем (не более 1 м) (рис. 2), рыхлой структурой и выраженной унаследованностью состава и свойств (материнских) пород.



Рисунок 2. Строение коры выветривания красноцветных пород в пределах областей отбора проб (фото — Пэн Ичжоу)

В связи с этим детальное изучение состава, свойств и уровня загрязнения красноцветных грунтов Сычуаньской впадины представляет ключевую основу для оценки их экологического состояния методами фитотестиования и дальнейшей разработки схем рекультивации (восстановления) территорий их распространения.

Глава 3. Отбор образцов красноцветных грунтов, оценка показателей их состава и свойств

В главе системно анализируются репрезентативные участки отбора образцов, минеральный и гранулометрический состав красноцветных грунтов, их свойства, а также наследование состава и свойств грунтов от материнской породы и специфика текущего их загрязнения тяжёлыми металлами.

Выбор участков отбора образцов осуществлялся на основе геологической и карты функциональной организации территории. В пределах западной части Сычуаньской впадины были выбраны три типичных участка сельскохозяйственных земель: сельский, пригородный и городской, охватывающие зоны элювия пород K_{1c} (нижнемелового периода) и $J_{3р}$, J_{3s} , J_{2s} (юрского периода). Горные породы на всех участках представлены кирпично-красными — буро-красными песчано-алевролитовыми отложениями с развитой трещиноватостью и слабой цементацией; Грунтовые профили состоят из горизонта 0–30 см (красноцветный грунт) и горизонта 30–60 см (элювиально-делювиальный слой материнской породы), в нижней части встречаются обломки полевошпатовых песчаников и алевролитовых аргиллитов. Всего было

отобрано 360 образцов грунта из элювия пород разного возраста и 25 образцов невыветрелых горных пород (рис. 3–4).



Рисунок 3. Отбор образцов красноцветных пород на участках: *а* – Таохуали, средняя часть склона горы Лунчюань (сельские); *б* – Хулу, рядом с жилыми зонами города (городские); *в, г* – процесс полевого опробования; *д* – образцы после высушивания до воздушно-сухого состояния (фото-Пэн Ичжоу)



Рисунок 4. Морфологические особенности образцов исходных горных пород и продуктов их выветривания, отобранных из различных стратиграфических подразделений
(Классификационное наименование красноцветным грунтам дано в соответствии с китайским национальным стандартом GB/T 8845–2001 «Методика анализа гранулометрического состава почвы»)
(фото-Пэн Ичжоу)

Минералогический и гранулометрический анализ показали: основными минералами в составе красноцветных грунтов являются кварц (21–38 %), полевые шпаты (2–15 %) и слоистые силикаты, среди которых повсеместно встречаются смешаннослоистые минералы монтмориллонит–иллит (монтмориллонит 18–20 %, иллит 7–24 %), что свидетельствует в целом о низкой степени выветривания. Различия между верхним и нижним слоями (0–30 см и 30–60 см) в минеральном и гранулометрическом составе, содержании основных оксидов не превышают 3 %.

Сравнительный анализ химико-минерального состава отобранных образцов показывает выраженную дифференциацию: элювий K_1c обогащён $CaCO_3$ (до 29 %) и CaO (19–21 %), содержание SiO_2 составляет лишь 45–46 %, доля кальцита достигает 37–42 %;

в элювии J_3p , J_3s , J_2s , напротив, содержание SiO_2 высокое (59–71 %), $CaCO_3$ низкое (1–14 %), наблюдается обогащение глинистыми минералами (34–38 %), что отражает более интенсивное механическое выветривание и накопление вторичных глинистых минералов. Содержание Fe_2O_3 варьирует в пределах 8–10 %, в элювии K_1c оно несколько выше, чем в элювии пород юрских горизонтов. Анализ содержания тяжёлых металлов в образцах красноцветных грунтов показал, что, за исключением Pb , концентрации Cr , Ni , Cu , Zn , As и Cd в пределах сельских и городских участков в большинстве случаев превышают геохимическое фоновое значение (Φ_3), тогда как на пригородных участках загрязнение выражено слабее, и превышения зафиксированы лишь для отдельных образцов по Ni . При этом As и Cd являются элементами с наибольшей частотой превышения Φ_3 в пределах всех трёх участках, причём в ряде случаев их содержание превышает установленные в Китае ПДК (GB15618-2018), что указывает на их статус как основных высокорисковых загрязнителей исследуемого региона.

По вертикальному профилю содержание Cr , Cu , Cd и Pb в горизонтах 0–30 см и 30–60 см близко, что свидетельствует об отсутствии выраженной стратификации и указывает на совокупное влияние пахотных работ и литолого-химической наследственности. В то же время в отдельных точках отбора отмечены заметные различия по концентрациям Ni , As , Cd и Zn между слоями, что указывает на локальные источники загрязнения.

Объединённый анализ данных выявил существенные различия между участками: наибольшее загрязнение зафиксировано в пределах сельских участков, где уровень превышения Φ_3 по Ni , Zn , As и Cd составил соответственно 78%, 83%, 100% и 75%. На городских участках доля превышения Φ_3 для Ni , Zn , As и Cd достигает 100%, 38%, 100% и 69% соответственно. В пределах пригородных участков, несмотря на общее снижение концентраций, превышения по As (90%) и Cd (78%) наблюдаются регулярно. Анализ коэффициента вариации (CV) показал, что пространственное распределение Cd и As в образцах, отобранных на сельских и пригородных участках, характеризуется высокой неоднородностью ($CV > 35\%$) и существенно зависит от уровня и характера антропогенного воздействия, тогда как распределение остальных элементов остаётся более равномерным. Таким образом, установленные особенности химико-минерального состава красноцветных грунтов логично определяют целесообразность дальнейшего применения фитотестирования для оценки влияния Cd , Pb и As с учётом содержания в них $CaCO_3$.

Глава 4. Существующий уровень загрязнения тяжёлыми металлами красноцветных грунтов западной части Сычуаньской впадины, источники загрязнения

На основе данных о содержании тяжёлых металлов была проведена оценка уровня их загрязнения в образцах красноцветных грунтов, отобранных на трёх сельскохозяйственных участках западной Сычуаньской впадины (рис. 5 а), с использованием геоаккумуляционного индекса (I_{geo}), интегрального индекса загрязнения Немеро (NPI) и индекса потенциального

экологического риска (PERI). Кроме того, источники загрязнения были количественно определены с помощью метода абсолютных главных компонент – множественной линейной регрессии (APCS-MLR) и метода положительной матричной факторизации (PMF).

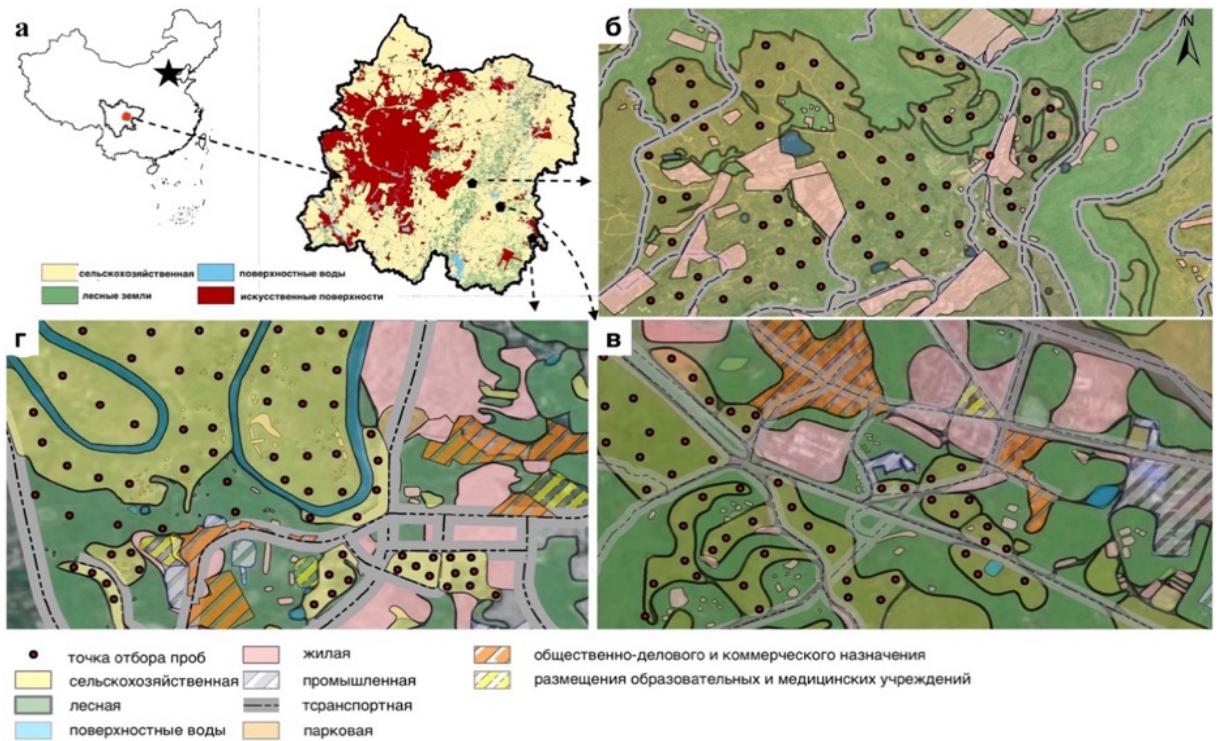


Рисунок 5. Местоположение точек отбора образцов красноцветных грунтов: **а** – положение исследуемой территории в Сычуаньской впадине; распределение точек отбора проб и типов функциональной организации территории на исследуемых участках: **б** – сельских; **в** – пригородных; **г** – городских

Результаты показали, что мышьяк (As) и кадмий (Cd) являются характерными загрязнителями в исследуемом регионе и демонстрируют наивысшие уровни загрязнения. Красноцветные грунты в зависимости от места их отбора по уровню исходного загрязнения можно охарактеризовать следующим образом.

- Сельские участки характеризуются наибольшим загрязнением. I_{geo} по Cd и As = 0,35 и 0,21, слабо–умеренно загрязнённые (I_{geo} 0,25–0,60); NPI по As и Cd = 0,83 и 0,73, практически незагрязнён ($NPI < 1$); PERI по Cd = 62,92, слабоопасный ($40 \leqslant PERI < 80$); CPI = 0,75, низкий уровень ($CPI < 1$).
 - Пригородные участки имеют минимальный уровень загрязнения. NPI по As и Cd = 0,69 и 0,53, практически незагрязнён; PERI по Cd = 45,52, слабоопасный; CPI = 0,57, низкий уровень.
 - Городские участки занимают промежуточное положение. Основные загрязнители: As – I_{geo} = 0,38, NPI = 0,92; Ni – NPI = 0,69, практически незагрязнён; PERI по Cd = 37,01, безопасный; CPI = 0,71, низкий уровень.

При идентификации источников загрязнения результаты APCS-MLR и PMF демонстрируют высокую степень согласованности, на сельских и пригородных участках модели

выявляют два основных источника загрязнения, тогда как на городских участках, где функциональная организация территории отличается большей сложностью, дополнительно идентифицирован промышленный источник.

Сельские и пригородные участки с преобладанием пахотных земель и лесов (рис. 5 б, в) характеризуются повышенными нагрузками по Cr ($64,37 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$) и Pb ($19,88 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$) при низком уровне загрязнения, что свидетельствует об их литогенном происхождении и влиянии органических удобрений.

Одновременно As ($16,66 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$) и Cd ($0,44 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$) демонстрируют как высокие концентрации, так и значительное превышение нормативов, указывая на агрогенное происхождение, связанное с длительным применением пестицидов и минеральных удобрений. Городские участки с многофункциональной застройкой (рис. 5 г) характеризуются значительным накоплением Zn ($34,43 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$) и Ni ($13,51 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$), особенно в прибрежной зоне, что при учёте пространственной неоднородности и ирригационного фона (наличие орошаемых территорий) указывает на влияние промышленных сточных вод.

Анализ вклада источников (рис. 6) показал, что Cr, Cu и Pb преимущественно связаны с выветриванием материнских пород и внесением органических удобрений (вклад $> 90\%$), As и Cd — с аграрными источниками (58–78 %), а обогащение Zn и Ni в городской среде обусловлено промышленной деятельностью (20–44 %). В целом, сельскохозяйственная деятельность определяет загрязнение As и Cd на сельских и пригородных участках, тогда как пространственное распределение Ni и Zn в городских условиях в значительной степени формируется под влиянием промышленных выбросов и ирригации.

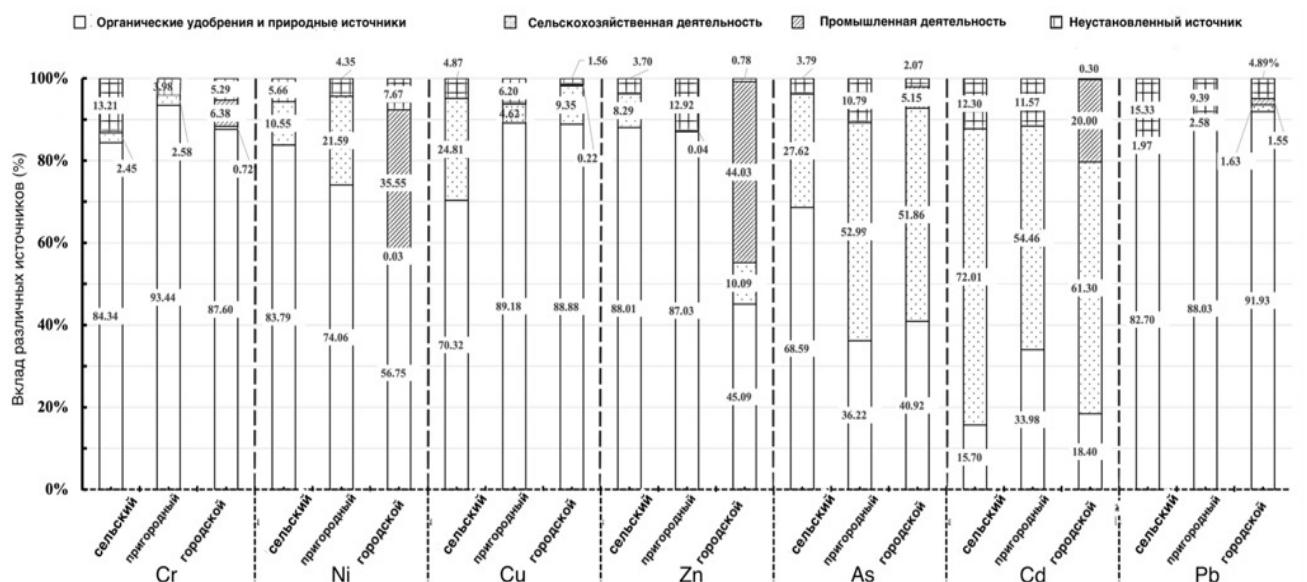


Рисунок 6. Доля вклада источников поступления в красноцветные грунты тяжелых металлов для различных по функциональной организации территории участков на основе модели APCS-MLR

Результаты выполненного анализа подчёркивают актуальность и необходимость дальнейших исследований уровня токсичности в красноцветных грунтах Cd, Pb и As.

Глава 5. Применение фитотестирования для оценки воздействия текущего состава красноцветных грунтов из западной части Сычуаньской впадины на рост высших растений и анализ основных факторов влияния

В данной главе с помощью экспериментального фитотестирования (проводилось по методике ГОСТ18763-2019) оценено воздействие современного состава и свойств красноцветных грунтов из западной части Сычуаньской впадины на рост высших растений (рапса и сорго) на ранних стадиях их развития, а также с использованием многофакторной модели проанализированы основные факторы влияния.

В соответствии с критериями — чувствительностью, репрезентативностью, стабильностью и др. — в качестве тесто-объектов были выбраны широко выращиваемые в исследуемом регионе сельскохозяйственные культуры: рапс (*B. napus* L.) и сорго (*S. bicolor* L.). Эти растения включены в перечень рекомендуемых в международных стандартах по фитотоксикологическим испытаниям (GB/T 31270.10, OECD 208, OECD 227, ГОСТ 18763–2019), а также являются основными экономическими и продовольственными культурами региона.

Экспериментальная схема предусматривала использование исходных образцов красноцветного грунта в качестве экспериментальной группы, а в качестве двух контрольных групп (рис. 7) — дистиллированной воды и референтного грунта (ISO 18763:2016), с последующим сравнительным анализом всхожести растений, длины ростков и корней.

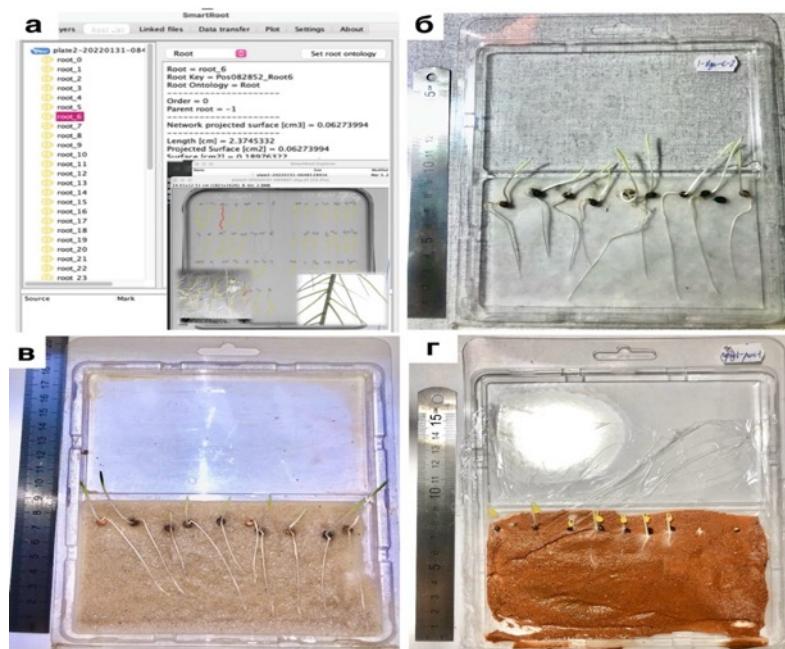


Рисунок 7. Анализ изображений проростков с использованием программы SmartRoot (на базе ImageJ): **а** — интерфейс SmartRoot; **б** — рост рапса в дистиллированной воде; **в** — рост сорго в референтном грунте; **г** — рост рапса в исходных красноцветных грунтах (фото — Пэн Ичжоу)

Результаты показали, что всхожесть в экспериментальной группе была немного ниже (рапс — 77,56 %, сорго — 81,22 %) по сравнению с контролем (80–83 %), но без статистически значимых различий. Ростки и корни значительно укоротились: у рапса — до 55,19 и 52,60 мм, у

сорго — до 89,14 и 84,18 мм (снижение на 15–25 % от контроля). Диаграмма рассеяния и анализ ошибок (табл. 1) подтвердили статистическую значимость: прорастание семян слабо затронуто, тогда как рост существенно подавлен. Это свидетельствует, что в текущих условиях красноцветные грунты западной части Сычуаньской впадины уже оказывают выраженное ингибирующее воздействие на рост рапса (*B. napus L.*) и сорго (*S. bicolor L.*).

Таблица 1

Средние значения тест-параметров при оценке острой фитотоксичности для сорго и рапса

Тип растения	Всхожесть (%)			Длина ростка (мм)			Длина корня (мм)		
	ДВ	РГ	ЭГ	ДВ	РГ	ЭГ	ДВ	РГ	ЭГ
Сорго (<i>S. bicolor</i>)	83,30	80,00	81,22	103,50	107,10	89,14	97,87	102,90	84,18
Рапс (<i>B. napus</i>)	80,00	76,67	77,56	61,40	68,40	55,19	69,50	75,80	52,60

Примечание: ДВ-Дистиллированная вода, РГ- референтный грунт, ЭГ-экспериментальная группа

Для выявления ключевых факторов, влияющих на рост растений в исследуемых грунтах, длина ростков и корней применяемых культур высших растений рассматривались как откликающие переменные, а 15 показателей (ρ_s , C_{CaCO_3} , максимально-молекулярная влагоёмкость (W_{mmw}), содержание тяжёлых металлов и др.) — как предикторы. Анализ проводился с использованием RDA (анализ избыточности) и модели XGBoost–SHAP (рис. 8–9) для построения многовариантной регрессионной модели и многофакторного анализа.

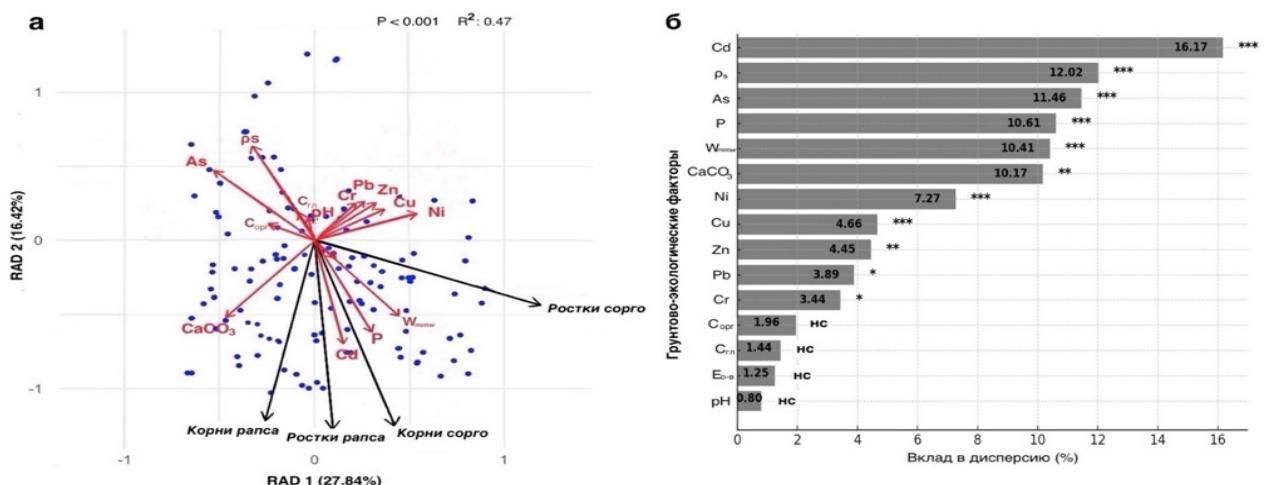


Рисунок 8. Анализ RDA и вклад показателей: а — взаимосвязь между откликами растений и показателями; б — вклад показателей; ($E_{\text{o-e}}$ — окислительно-восстановительный потенциал; ρ_s — плотность твердого компонента; Р-пористость; C_{cl} ($<0,02\text{мм}$) — содержание глины (фракция $<0,02\text{мм}$); C_{org} — содержание органического углерода; W_{mmw} — максимально-молекулярная влагоёмкость)

Результаты, полученные с использованием обеих моделей, оказались согласованными и надёжными: тяжёлые металлы Cd и As, а также содержание карбоната кальция (CaCO_3) были выявлены как основные влияющие факторы. Из них мышьяк (As) оказывал выраженное ингибирующее действие на растения, особенно на рост корней (вклад — 11,46%), тогда как кадмий (Cd) и CaCO_3 в определённых концентрационных пределах демонстрировали стимулирующий эффект. Кроме того, W_{mmw} и пористость положительно коррелировали с ростом растений, тогда как увеличение ρ_s оказывало отрицательное воздействие.

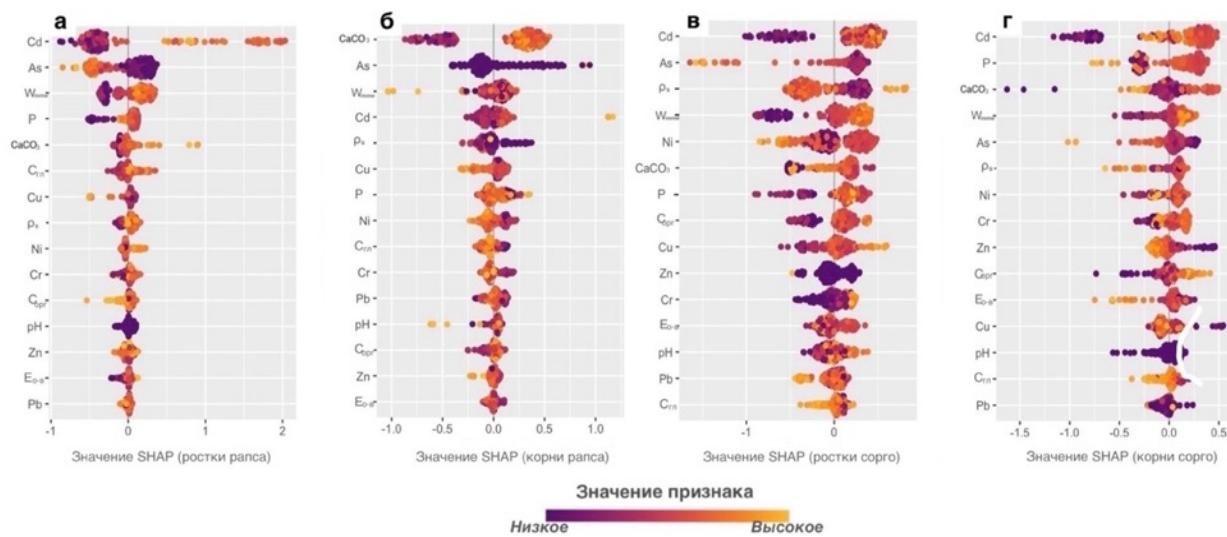


Рисунок 9. Анализ влияния факторов на основе модели XGBoost-SHAP

В совокупности факторы, связанные с содержанием As, Cd и CaCO₃, обладают наибольшим влиянием на рост и развитие растений, что подтверждает их ключевую роль в условиях высоких концентраций в исследуемом регионе. В связи с этим было принято решение осуществить классификацию отобранных 360 исходных образцов красноцветных грунтов по содержанию CaCO₃ и далее, с использованием моделирования поступления соответствующих соединений провести фитотестирование и исследовать механизмы их миграции и трансформации, а также биодоступность и токсические пороговые уровни.

Глава 6. Методика экспериментальной оценки пороговых уровней загрязнения тяжелыми металлами (Cd, Pb и As) красноцветных грунтов в отношении культуры рапса (*B. napus* L.)

и сорго (*S. bicolor* L.)

В настоящей главе представлена строгая методика определения концентрационных порогов и физиологических пределов устойчивости рапса (*B. napus L.*) и сорго (*S. bicolor L.*) к характерным загрязнителям (As, Cd) и историческому загрязняющему элементу Pb при одиночном и смешанном загрязнении, а также механизмов их взаимодействия (синергетического, антагонистического, аддитивного типов). Контролем служили сгруппированные исходные красноцветные грунты, разделённые по содержанию CaCO₃ на две категории: с высоким (элювий K_{1c}, 29,21 %) и низким (элювий J_{3p}–J_{3s}–J_{2s}, 5,31 %) уровнями. Фоновое содержание тяжёлых металлов (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb) в группе грунтов, представленных элювием пород J_{3p}–J_{3s}–J_{2s} выше, различия по остальным физико-химическим параметрам незначительны (см. табл. 2, 3).

Экспериментальные образцы были искусственно загрязнены в лабораторных условиях. Концентрационные градиенты выбраны согласно национальным стандартам КНР (GB 15618–2018, HJ 332–2006) и токсикологическим порогам из научной литературы. Одиночное загрязнение: Cd (1,2,5,10,20 мг·кг^{−1}, Cd(NO₃)₂·4H₂O), Pb (100,200,500,1000,2000 мг·кг^{−1}, Pb(NO₃)₂).

As (20,50,100,200,500 мг·кг⁻¹, Na₂AsO₄·7H₂O). Смешанное загрязнение: четыре сценария (Cd–Pb, Cd–As, Pb–As, Cd–Pb–As) в равных массовых соотношениях.

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в контролльном грунте (мг·кг ⁻¹)								
Тип грунта	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
Элювий K _{1c}	37,91	23,66	13,07	43,60	13,45	0,29	10,89	0,02
Элювий J _{3р} -J _{3s} -J _{2s}	77,69	41,05	33,28	96,59	16,99	0,36	23,30	0,03

Таблица 3

Основные свойства контролльного грунта								
Тип грунта	<i>E_{o-b}</i>	pH	ρ_s	P	CaCO ₃	C _{cl}	C _{org}	W _{mmw}
	МВ	/	г/см ³	%				
Элювий K _{1c}	550,41	8,65	2,43	42,31	29,21	26,54	1,03	11,63
Элювий J _{3р} -J _{3s} -J _{2s}	555,94	8,48	2,45	40,40	5,31	32,32	0,98	12,65

E_{o-b} — окислительно-восстановительный потенциал; ρ_s — плотность твердого компонента; P — пористость; C_{cl} (<0,02мм) — содержание глины (фракция <0,02 мм); C_{org} — содержание органического углерода; W_{mmw} — максимально-молекулярная влагоёмкость

Оценка токсических порогов проведена по показателям EC₁₅₀ (стимулирующий эффект Cd) и IC₅₀ (ингибирующий эффект Pb и As). Для одиночного загрязнения применены метод Спирмена—Кербера с усечением (TSK) и логистическая модель с переменным наклоном (VSL). Для смешанного загрязнения впервые использована оптимизированная модель токсических единиц (TU) с последующей экспериментальной проверкой по относительной скорости роста растений (RGR) с помощью VSL. В результате выявлены механизмы синергетического, антагонистического и аддитивного взаимодействия металлов и установлены пороговые концентрации токсичности при комплексном загрязнении.

Глава 7. Пороговые уровни загрязнения тяжелыми металлами (Cd, Pb и As) в красноцветных грунтах при одиночном и смешанном загрязнении для рапса (*B. napus* L.) и сорго (*S. bicolor* L.)

В настоящей главе проведён системный анализ пороговых концентраций (EC₁₅₀ и IC₅₀) кадмия (Cd), свинца (Pb) и мышьяка (As) для рапса (*B. napus* L.) и сорго (*S. bicolor* L.) в условиях одиночного и смешанного загрязнения. Исследованы токсикологические характеристики, типы взаимодействий и механизмы действия тяжёлых металлов в указанных условиях.

В условиях грунта с высоким содержанием CaCO₃ (Элювий K_{1c}, 29%) при одиночном загрязнении Cd отмечен выраженный стимулирующий эффект роста у рапса (EC₁₅₀ росток/корень: 13,47/4,45 мг·кг⁻¹), тогда как у сорго значимого влияния не выявлено. Pb и As оказывают концентрационно-зависимое ингибирующее воздействие на оба растения (рис. 10 и табл. 4): IC₅₀ для ростков и корней рапса составили для Pb 1111/460 мг·кг⁻¹, для As 178/125 мг·кг⁻¹ соответственно; аналогичные показатели у сорго составили для Pb 1411/770 мг·кг⁻¹ и для As 386/181 мг·кг⁻¹.

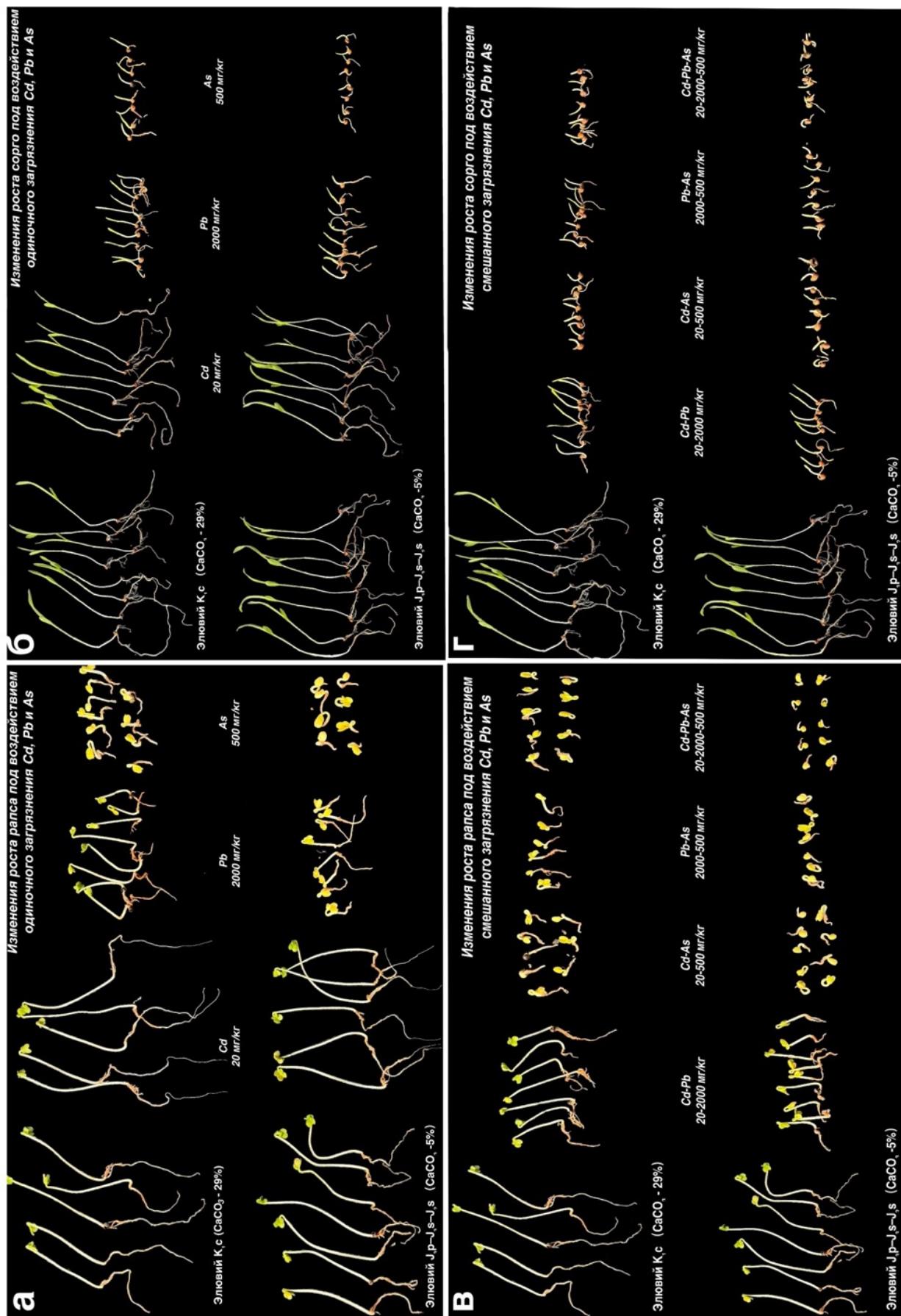


Рисунок 10. Внешний вид проростков рапса и сорго, выращенных в красноцветных грунтах при высоких концентрациях Cd, Pb и As в условиях одиночного (а, б) и смешанного (в, г) загрязнения

Таблица 4

Пороговые уровни одиночного и смешанного загрязнения Cd, Pb и As для рапса и сорго

Тип загрязнения	Орган растения	Тип эффекта	Рапс (<i>B. napus L</i>)		Сорго (<i>S. bicolor L</i>)	
			Элювий K _{1c}	Элювий J _{3p} -J _{3s} -J _{2s}	Элювий K _{1c}	Элювий J _{3p} -J _{3s} -J _{2s}
Cd	Росток	EC ₁₅₀ /IC ₅₀ (мг·кг ⁻¹)	13,47/18,08*	6,75/15,45*	В указанном диапазоне эффекты не наблюдались, EC ₁₅₀ и IC ₅₀ не рассчитаны	
	Корень		4,45/12,32*	1,52/10,02*		
Pb	Росток		1111,39	841,43	1411,01	779,11
	Корень		460,1	299,27	770,21	442,04
As	Росток		177,13	115,37	386,12	218,16
	Корень		125,32	82,04	182,07	134,08
Cd-Pb	Росток		2,17	1,78	0,99	0,79
	Корень		1,67	1,45	0,87	0,68
Cd-As	Росток	IC ₅₀ (TU -Toxic Unit, токсическая единица)	1,67	1,35	0,88	0,65
	Корень		1,22	1,61	0,77	0,46
Pb-As	Росток		2,82	2,33	3,09	2,75
	Корень		2,48	2,18	2,73	2,29
Cd-Pb-As	Росток		1,95	1,48	2,26	1,91
	Корень		1,51	1,84	1,86	1,71

*Рост дважды проходит через EC₁₅₀ при разных концентрациях Cd

В условиях смешанного загрязнения (Cd-Pb, Cd-As, Pb-As, Cd-Pb-As) наблюдается выраженное подавление роста растений, диапазоны IC₅₀ составляют 0,77–3,09 TU, при этом комбинации с As демонстрируют более высокую токсичность. В грунтах с низким содержанием CaCO₃ (элювий J_{3p}-J_{3s}-J_{2s}, 5 %) концентрационные пороги загрязнителей снижаются. Корневая система проявляет большую чувствительность к загрязнению по сравнению с надземной частью, рапс более восприимчив к токсическому воздействию изучаемых элементов.

Проведён детальный анализ механизмов токсичности тяжёлых металлов при одиночном и смешанном загрязнении (рис. 11). Для Cd выявлен характерный двухфазный эффект: при низких концентрациях (<5 мг·кг⁻¹) кратковременно активируется антиоксидантная система растений, а при высоких концентрациях (≥10 мг·кг⁻¹) наблюдается накопление активных форм кислорода (ROS), приводящее к окислительному повреждению мембран. Pb ингибирует рост корней за счёт нарушения сигнализации Ca²⁺ и подавления электрон-транспортной цепи митохондрий. Мышьяк (As) поступает в растения, имитируя фосфат-ион, и быстро восстанавливается до более токсичного As (III), вызывая нарушение энергетического обмена и снижение активности антиоксидантных ферментов.

Cd, Pb, As-стесс: адаптивные механизмы в клетках рапса и сорго

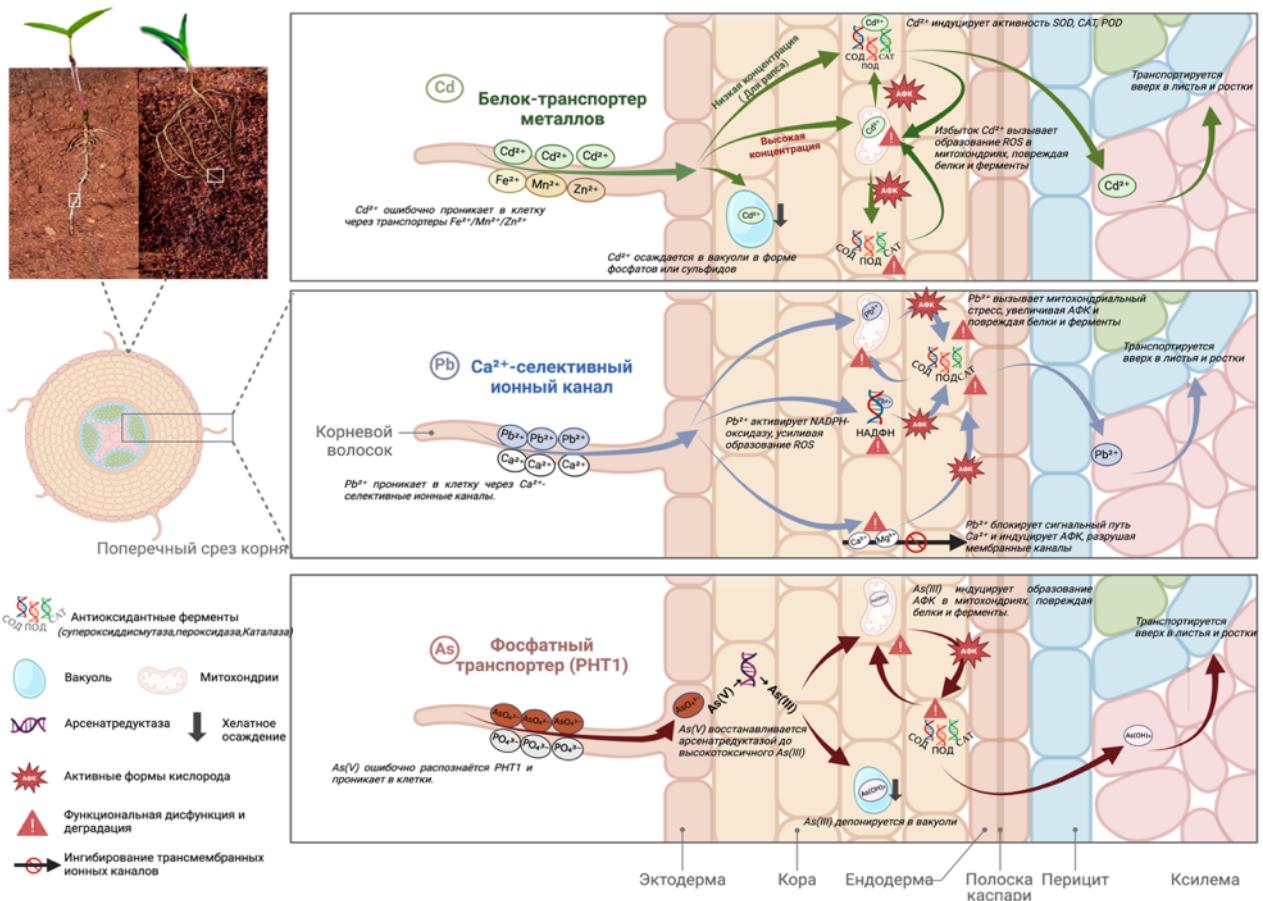


Рисунок 11. Клеточные механизмы адаптации рапса и сорго к Cd, Pb и As-стессу

При смешанном загрязнении конкуренция Cd, Pb и As за лигандные центры Ca²⁺, CO₃²⁻ и формирование различных минеральных комплексов существенно изменяют их биодоступность (рис. 12). В сравнении с одиночным загрязнением совместное присутствие металлов усиливает общий токсический стресс в растениях, изменяя индивидуальные механизмы действия каждого металла.

По мере увеличения концентрации от низкой (Cd 1–2 мг·кг⁻¹, Pb 100–200 мг·кг⁻¹, As 10–50 мг·кг⁻¹) до средней (Cd 5 мг·кг⁻¹, Pb 500 мг·кг⁻¹, As 50–100 мг·кг⁻¹) и высокой (Cd ≥10 мг·кг⁻¹, Pb ≥1000 мг·кг⁻¹, As ≥200 мг·кг⁻¹) взаимодействие металлов переходит от антагонистического к аддитивному и, в итоге, к синергетическому эффекту. В системе Cd–Pb на низких концентрациях антиоксидантный ответ, индуцированный Cd, обладает антагонистическим эффектом, с увеличением концентрации эффект снижается и переходит в синергетическое ингибирование, прежде всего корней. Система Cd–As демонстрирует кратковременный антагонизм лишь на крайне низких концентрациях, быстро переходя к синергизму вследствие восстановления As(V) до As(III) и ингибирования Cd механизмов детоксикации. В системе Pb–As благодаря образованию малорастворимых осадков (например, Pb₃(AsO₄)₂) сохраняется антагонизм на широком диапазоне концентраций, синергизм проявляется лишь на крайне высоких уровнях загрязнения. Трёхкомпонентная система Cd–Pb–As демонстрирует

концентрационно-зависимую динамику: низкие концентрации нейтрализуются, средние приводят к аддитивности, а высокие — к синергизму.

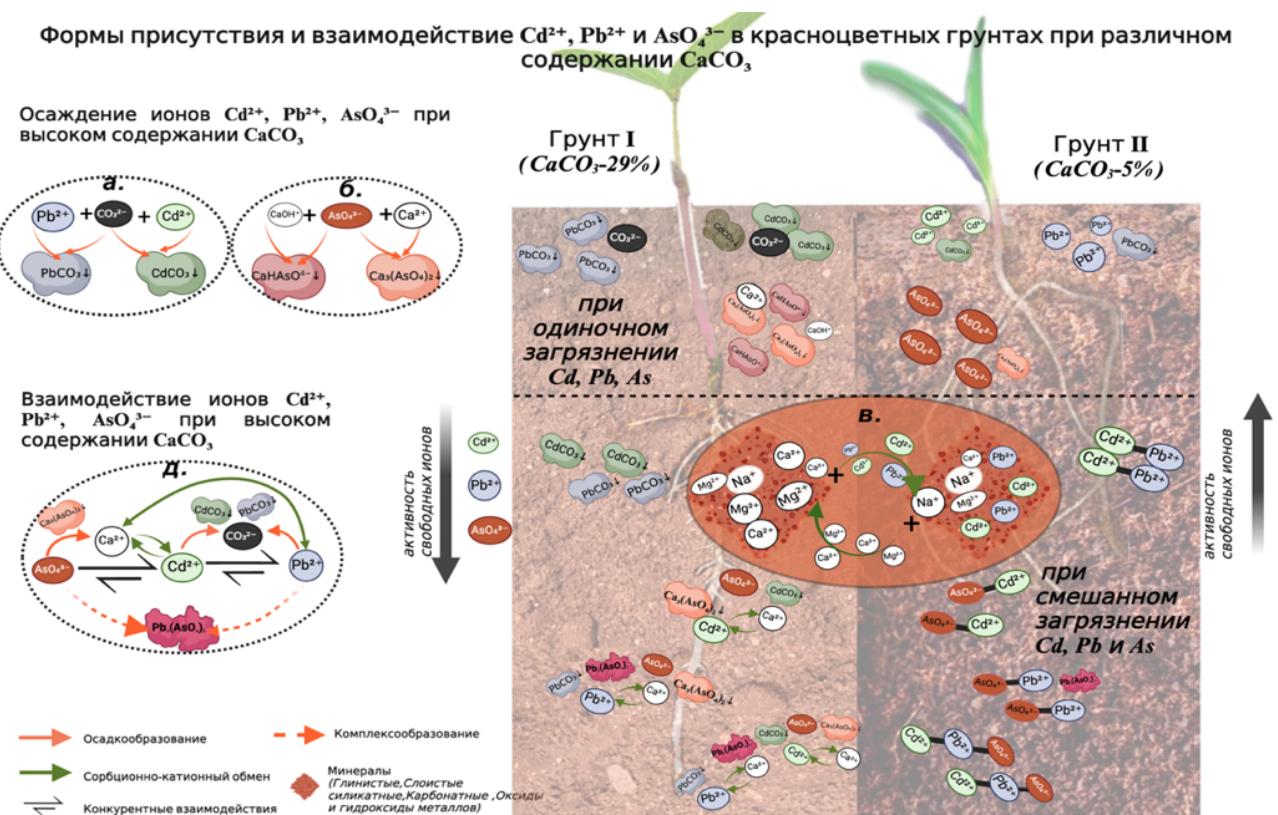


Рисунок 12. Формы присутствия и взаимодействие Cd^{2+} , Pb^{2+} и AsO_4^{2-} в красноцветных грунтах при различном содержании $CaCO_3$: *а, б* — образование комплексов или осадков Cd , Pb и As с Ca^{2+} и CO_3^{2-} ; *в* — ионный обмен Cd и Pb с минералами в грунте; *г* — конкуренция Cd , Pb и As за Ca^{2+} и CO_3^{2-} в условиях смешанного загрязнения

Содержание CaCO_3 в грунтах существенно влияет на биодоступность тяжёлых металлов и пороговые концентрации токсичности для растений. При высоком содержании CaCO_3 (элювий K_{1c} , 29 %) ионы Ca^{2+} и CO_3^{2-} эффективно связывают Cd^{2+} , Pb^{2+} и частично As(V) , снижая их активность в грунтовом растворе и замедляя токсические эффекты. При низком содержании CaCO_3 (элювий $J_{3p}-J_{3s}-J_{2s}$, 5,31 %) ограниченность центров связывания и слабая фиксация металлов повышают биодоступность и токсичность, вызывая негативные эффекты у растений при низких концентрациях.

Глава 8. Стратегии восстановления территорий распространения красноцветных грунтов, загрязненных тяжёлыми металлами на основе выявленных пороговых значений

для сельскохозяйственных культур, и перспективы дальнейших исследований

На основе выявленных пороговых концентраций EC_{150} и IC_{50} для рапса и сорго предложена дифференцированная стратегия управления загрязнёнными сельскохозяйственными землями Сычуаньской впадины: территории подразделяются на зоны низкого (концентрации $< ПДК$ и $< 70\% IC_{50}$), среднего (концентрации $\approx ПДК$ или $70\% - 100\% IC_{50}$) и высокого (концентрации $> ПДК$ и $> IC_{50}$) уровней загрязнения с применением экологических, комплексных и радикальных мер

соответственно, включая иммобилизацию, биоремедиацию, замену грунта и регулирование землепользования. Рекомендуется усиление контроля источников загрязнения Cd и As и применение хелатирующих агентов для снижения токсичности. Предложено формирование региональной базы данных пороговых значений и дозо-эффектных зависимостей для различных культур, создание интегрированной информационной платформы и оптимизация мониторинга на основе фитотестирования. Будущие исследования должны быть направлены на изучение механизмов загрязнения в полевых условиях с применением метагеномики, мультиомных и микроскопических технологий.

ВЫВОДЫ

Основные научные выводы, полученные в ходе исследования, заключаются в следующем:

1. Красноцветные грунты демонстрируют выраженную унаследованность от исходных пород по минеральному, гранулометрическому составу и содержанию основных оксидов. При этом породы свиты мелового возраста (K_1c) и сформировавшиеся на их основе грунты характеризуются существенно более высоким содержанием кальцита и оксида кальция (CaO) по сравнению с породами и грунтами юрских свит (J_3p , J_3s , J_2s).
2. Красноцветные грунты западной части Сычуаньской впадины загрязнены Cd (0,03–1,12 $mg \cdot kg^{-1}$) и As (7,75–32,14 $mg \cdot kg^{-1}$) преимущественно вследствие применения органических удобрений (навоза животных), особенностей выветривания исходных пород, использования пестицидов и минеральных удобрений, а также сброса промышленных сточных вод.
3. Существующие значения показателей состава, состояния и свойств красноцветных грунтов значительно подавляют рост рапса и сорго. Ключевые факторы влияния: содержание As, Cd, и $CaCO_3$.
4. Высокое содержание $CaCO_3$ (29%) в грунте усиливает стимулирующее действие Cd на рапс, но Pb и As значительно ингибируют оба вида, особенно в смесях с As; снижение $CaCO_3$ до 5% уменьшает порог токсичности.
5. При смешанном загрязнении Cd, Pb и As в красноцветных грунтах металлы конкурируют за связывание с Ca^{2+} и CO_3^{2-} , формируют комплексы и изменяют биодоступность, вызывая различные типы взаимодействий.
6. Рапс чувствительнее сорго к загрязнению Cd, Pb и As, сорго защищается корневыми барьерами и хелатированием металлов; корни повреждаются быстрее ростков.
7. Предлагается разработать поэтапную систему мониторинга и восстановления на основе пороговых концентраций, выявленных в ходе фитотестирования. Эти значения также рекомендуется учитывать при разработке региональных нормативов содержания тяжёлых металлов в грунтах на сельскохозяйственных территориях.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук, опубликованные автором по теме диссертации

1. Peng Y., Grigorieva I. Yu. Purple soil inheritance and source of parent rock material and tectonic background in the Sichuan Basin, China // *Geology, Ecology, and Landscapes*. – 2025. – Vol. 9. – No. 2. – Pp. 718–731. Объем публикации: 1,2 п.л., объем вклада соискателя: 0,8 п.л. Импакт-Фактор 0,73 (SJR), <https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2265125>.
2. Peng Y., Grigorieva I. Yu. Prediction of the impact of ecological restoration technology on the restoration of heavy metal pollution in agricultural soil // *Geology, Ecology, and Landscapes*. – 2025. – Vol. 9. – No. 3. – Pp. 775–791. Объем публикации: 1,2 п.л., объем вклада соискателя: 0,9 п.л. Импакт-Фактор 0,73 (SJR), <https://doi.org/10.1080/24749508.2024.2328900>.
3. Пэн И., Григорьева И. Ю. Причины унаследованности состава и свойств красноцветных грунтов современной коры выветривания в пределах западной части Сычуаньской впадины Китая // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2024. – № 3. – С. 44–58. Объем публикации: 1,1 п.л., объем вклада соискателя: 0,7 п.л. Импакт-Фактор 0,43 (РИНЦ), EDN: SPQXSV.
4. Peng Y., Grigorieva I. Yu. Assessment of heavy metal pollution on agricultural land in Chengdu city under different anthropogenic pressures based on APGS-MLR modelling // *Ecological Indicators*. – 2024. – Vol. 165. – Article No. 112183. Объем публикации: 1,5 п.л., объем вклада соискателя: 1,1 п.л. Импакт-Фактор 7,40 (JIF), <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112183>.
5. Peng Y., Grigorieva I. Yu. Model multifactor analysis of soil heavy metal pollution on plant germination in Southeast Chengdu, China: Based on redundancy analysis, factor detector, and XGBoost–SHAP // *Science of the Total Environment*. – 2024. – Vol. 954. – Article No. 176605. Объем публикации: 1,9 п.л., объем вклада соискателя: 1,4 п.л. Импакт-Фактор 8,00, (JIF) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176605>.