

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук Пэн Ичжоу на тему: «Пороговые уровни загрязнения тяжёлыми металлами Cd, Pb и As красноцветных грунтов по данным фитотестирования (западная часть Сычуаньской впадины, Китай)» по специальности 1.6.21. Геоэкология

Актуальность темы. Диссертационная работа Пэн Ичжоу посвящена эколого-геологическому исследованию красноцветных грунтов сельскохозяйственных угодий западной части Сычуаньской впадины; анализу поведения характерных тяжёлых металлов (Cd, Pb, As) и их влияния на рост основных местных культур на основе фитотестирования. В условиях длительной аграрной нагрузки и контрастного содержания CaCO_3 в красноцветных грунтах проблема учёта смешанного загрязнения и реальных биологических эффектов при традиционном нормировании по концентрациям приобретает принципиальное значение. Рассматриваемая диссертация направлена на решение именно этих задач, что определяет и подтверждает её актуальность, а также научную и практическую значимость для эколого-геологической оценки и управления качеством агроландшафтов на красноцветных грунтах.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций можно оценить как высокую. Исследование опирается на согласованный комплекс методов: детальное изучение химико-минерального состава красноцветных грунтов, статистический анализ пространственного распределения металлов, источник-ориентированные модели APCS–MLR и PMF, стандартизированное фитотестирование с применением культур высших растений *Brassica napus* L. и *Sorghum bicolor* L. и последующим многофакторным анализом (RDA, XGBoost–SHAP) и «дозо-эффектным» моделированием (TSK, VSL, модифицированная TU-схема). Достоверность результатов обеспечивается воспроизводимыми лабораторными процедурами, контролем качества аналитических измерений и согласованностью выводов, полученным по независимым экспериментальным и расчетным методам исследования. При этом данные химико-аналитических исследований, фитотестирования и модели взаимодействия металлов дают непротиворечивую картину реакции исследуемой системы «грунт–растение».

Научная новизна работы заключается в интеграции методов анализа источников поступления загрязняющих химических элементов и фитотестирования для красноцветных грунтов Сычуаньской впадины; количественном выделении ведущей роли As и Cd в угнетении роста исследуемых растений; получении пороговых уровней EC_{150} и IC_{50} для Cd, Pb и As при одиночном и смешанном загрязнении и демонстрации перехода от антагонистических к синергическим и аддитивным эффектам металлов при повышении нагрузок. Автором показана ключевая регуляторная роль $CaCO_3$ в миграции, фиксации и фитотоксичности указанных элементов для красноцветных грунтов.

Научная и практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что на основе анализа состава красноцветных грунтов и результатов фитотестирования обоснованно выделены приоритетные загрязнители, охарактеризованы их источники и современные уровни загрязнения, а полученные пороговые параметры EC_{150}/IC_{50} для одиночных и комбинированных воздействий могут служить ориентиром при оценке риска для основных культур региона и планировании фиторемедиационных мероприятий. Использование рапса и сорго как индикаторных культур обеспечивает прямую интерпретацию результатов для мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий и разработки регионально ориентированных экологических стандартов. Предложенная эколого-геологическая схема поведения Cd, Pb и As в красноцветных грунтах с разным содержанием $CaCO_3$ создаёт основу для уточнения нормативно-методической базы, выбора приоритетных участков восстановления и совершенствования экотоксикологических подходов к оценке многокомпонентного загрязнения.

Структура диссертация объёмом 226 страниц включает введение, восемь глав, заключение, список литературы из 193 наименований и пять приложений; текст содержит 72 рисунка и 35 таблиц. Структура работы выстроена логично, последовательность глав отражает постановку целей, решение задач и формирование итоговых выводов. Содержание автореферата в полной мере соответствует основным положениям и результатам, представленным в диссертации.

В первой главе на основе литературных данных обстоятельно рассмотрены принципы и направления биодиагностики экологического

состояния природных ценозов и, в первую очередь, почв. Автор знаком с современными нормативными источниками, международными и российскими стандартами, имеющими отношение к оценкам воздействий на почвы по реакциям растений. Дано обоснование высокой чувствительности методов фитотестирования, подчеркивается их интеграционный потенциал в оценке экологических эффектов тяжёлых металлов, сформулирована общая концепция пороговой оценки состояния среды. Важным в этой части работы представляется раздел, посвященный недостаткам в исследованиях динамики взаимодействий между тяжёлыми металлами и характеристиками состава и свойств грунтов.

Во второй главе, посвященной геологическим аспектам района исследования, охарактеризованы условия формирования красноцветных грунтов Сычуаньской впадины, подробно рассмотрены особенности рельефа и климата, других важных особенностей генезиса выбранных для исследования необычных почвенных грунтов. В контексте задач и цели диссертационной работы важно было подчеркнуть выраженные аномалии по содержанию микроэлементов в красноцветных грунтах Сычуаньской впадины: концентрации В, Cu, Ni, Cr, Pb и Hg значительно превышают средние уровни по почвам Китая и мира, тогда как Zn и Mn находятся на пониженном уровне.

В третьей главе, с которой начинается экспериментальная часть текста диссертации, описаны материалы и методы исследования. Дана схема отбора проб и приведены характеристики состава и ряда физических и физико-химических свойств. Показано, что минеральный состав красноцветных грунтов представлен преимущественно кварцем, полевыми шпатами и слоистыми силикатами; показаны особенности распределения содержания CaCO_3 в грунтах. Для всех участков опробования зафиксированы частые превышения фонового уровня по содержанию As и Cd с приближением к ПДК и выраженным антропогенным влиянием, а также пространственной неоднородностью.

В четвёртой главе с использованием ряда показателей и индексов (Igeo, NPI и PERI) дана оценка степени загрязнения исследуемых красноцветных грунтов тяжёлыми металлами; анализ источников загрязнения выполнен на основе объемного экспериментального материала с привлечением современной статистической обработки (статистического апостериорного анализа факторных оценок – множественной линейной регрессии (APCS-MLR, Absolute Principal Component Scores–Multiple Linear Regression) и положительной матричной

факторизации (PMF, Positive Matrix Factorization) В итоге этого анализа сделаны выводы о том, что к источникам загрязнения микроэлементами относятся как природные источники (особенности грунтов) и органические удобрения (навоз). Сельскохозяйственная и промышленная деятельность являются основными источниками тяжёлых металлов на сельских, пригородных и городских участках. Детально показано, что загрязнения As и Cd преимущественно связаны с минеральными удобрениями, тогда как Ni и Zn контролируются совместным влиянием промышленных источников и ирригационно-дренажных процессов.

В пятой главе по выполнено фитотестирование исходных образцов с двумя контрольными вариантами (дистиллированная вода и референтный грунт) на двух видах тест-растений, представляющих, как и положено в комплексных исследованиях, классы однодольных и двудольных растений. Исследования показали разную чувствительность: масличный рапс (*Brassica napus*) проявляет высокую чувствительность к загрязнению, по сравнению с сорго (*Sorghum bicolor*)

Интересен тот факт, что естественное состояние красноцветных грунтов уже существенно угнетает рост используемых растений. Многомерный анализ (RDA и XGBoost-SHAP) показал, что концентрации As, Cd и CaCO_3 представляют собой основные факторы, определяющие реакции рапса (*Brassica napus*) и сорго (*Sorghum bicolor*) и, соответственно, выраженный отрицательный фитоэффект исследуемых грунтов.

В шестой главе сформирована система пороговой оценки: для одиночного загрязнения Cd, Pb и As и для смешанных сценариев (Cd-Pb, Cd-As, Pb-As и тройная комбинация) пороговые уровни EC_{150} и IC_{50} оценены на основе двух моделей - TSK и VSL, а для смеси использована связка TU-RGR-VSL для проверки комбинированных эффектов. Установлена ведущая роль CaCO_3 в значениях пороговых уровней, поскольку группы образцов с высоким и низким содержанием CaCO_3 образовывали две исследуемые совокупности красноцветных грунтов в рассмотренных моделях обработки данных.

В седьмой главе проведено последовательное сравнение пороговых уровней и «дозо-эффектных» зависимостей для рапса и сорго. Анализ проводился по ростовым функциям растений с оценкой длины ростков и корней в двух группах красноцветных грунтов, различающихся по содержанию CaCO_3 . Показано, что сочетания загрязняющих веществ с участием As в целом

оказывают более сильный ингибирующий эффект. При этом корни растений, как и следовало ожидать, показали более высокую чувствительность, чем ростки. При низком содержании CaCO_3 пороговые значения смещались в сторону более низких концентраций.

В восьмой главе сделаны важные практические выводы. На основе полученного комплекса пороговых значений содержания анализируемых загрязняющих веществ предложены подходы к территориальному зонированию и регулированию системы землепользования. Кроме того, обсуждены направления формирования базы данных порогового содержания исследуемых веществ и системы мониторинга для красноцветных грунтов в пределах западной части Сычуаньской впадины.

В конце каждой главы даны формулировки выводов, которые ставят акценты на проанализированном и служат логичными связками при переходе к следующим главам. Работа выполнена очень большая, к анализу и структурированию огромного объема собственных данных автором привлечены разнообразные математические модели и варианты статистической обработки.

Таким образом, к числу наиболее значимых и в теоретическом, и в практическом аспектах проведенного исследования следует отнести выявленное значение исходного химического состава грунтов на поведение загрязняющих элементов в отношении фитоценозов. В работе убедительно показано, что наиболее значимым фактором, оказывающим влияние на реакцию растений при многоэлементном загрязнении красноцветных грунтов, является содержание CaCO_3 . При загрязнении элементами Cd , Pb и As по отдельности сила воздействия на растения заметно отличается от того, что наблюдается при смешанном загрязнении. Автор предлагает гипотезу, объясняющую эти наблюдения механизмами конкуренции воздействующих ионов за связывание с Ca^{2+} и CO_3^{2-} , комплексообразования, при которых меняется ионная активность и ответные реакции растений.

При анализе работы возникли следующие вопросы и замечания.

1. Среди множества почвенных свойств как физических, так и химических, недостаточно уделено внимания микробиомам красноцветных грунтов. Влияние микробных сообществ и их ферментативной активности, очевидно тоже влияющих на подвижность металлов и их доступность растениям, практически

не рассматриваются, а эта биологическая активность почв весьма вероятно могла повлиять и на отклик тест-растений. Интересно мнение автора на этот счет.

2. На Рисунках 7.15 и 7.16 в диссертации и на Рисунке 11 в автореферате смело представлены клеточные механизмы адаптации рапса и сорго к стрессам, вызванным разными химическими агентами - Cd, Pb и As. Поскольку не было глубоких цитологических и гистологических исследований растительных клеток и тканей, во всяком случае, в диссертации, исследований внутриклеточного строения и реакций на анатомическом уровне не представлено, то следовало бы дать более адекватное название этим схемам, например, указав, что они в основе своей гипотетические.

3. Тщательная и кропотливая работа при проведении фитотестирования, проделанная диссертантом, достойна восхищения. Одновременно возникает вопрос были ли попытки избежать некоторые технические процедуры и сократить время на снятие учет результатов фитотестов в планшетном варианте, сканируя длину корней и ростков программой SmartRoots прямо в планшетах, разложив семена на фильтровальную бумагу, укрывающую образцы, как это рекомендуется, например, в бельгийской методике компании Microbiotests). Почему этот прием не использовался?

Есть несколько замечаний стилистического и оформительского характера.

Одно из них касается единообразия обозначений в научных работах. При первом упоминании латинских названий видов растений родовое и видовое название пишут полностью и обязательно добавляют автора, в последующем уже можно не давать полное название рода, и совершенно точно к такому сокращенному названию уже не надо добавлять автора. Повторное указание автора после сокращения, как и отсутствие курсива при написании латинских названий считаются ошибками.

Другое – для облегчения восприятия иллюстраций. В указанных содержательных и интересных, но гипотетических пока схемах, следовало бы либо пронумеровать разные блоки, либо обозначить химическими элементами, поскольку при таком разрешении рисунка не сразу понятно, чем один блок отличается от другого.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного

рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.21. Геоэкология (по геолого-минералогическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Пэн Ичжоу заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.21. Геоэкология.

Официальный оппонент:

доктор биологических наук, профессор,
кафедра земельных ресурсов и оценки почв, факультет почвоведения
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет имени М.
В. Ломоносова» (МГУ)

Терехова Вера Александровна

03.12.2025

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 930-03-95, e-mail: _____

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: доктор биологических наук, специальности: 03.00.16 – экология
(биологические науки), 03.00.24 – микология (биологические науки)

Адрес места работы:

119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП -1, Ленинские горы, д. 1,
стр.12, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В.
Ломоносова» (МГУ), Факультет почвоведения,
кафедра земельных ресурсов и оценки почв

Подпись сотрудника

Терехова В.А.