

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Иванова Федора Дмитриевича «Оценка эффективности индуцированной биоремедиации почв углеотвалов Восточного Донбасса», представленную на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальностям 1.5.19 – Почвоведение (биологические науки) и 1.5.15 – Экология (биологические науки).

Актуальность темы диссертационного исследования

К наиболее опасным загрязнителям окружающей среды относят тяжелые металлы из-за их неспособности к биодegradации. Растения адаптировались к выживанию в почвах с высоким содержанием металлов, используя различные механизмы, в том числе связывание металлов с фитохелатинами и металлотионинами, а также с азотсодержащими и серосодержащими соединениями. Известно также, что растения синтезируют регуляторы роста и антиоксидантные ферменты, такие как супероксиддисмутаза и каталаза, для снижения токсичности тяжелых металлов. В этой связи фиторемедиация является экологичной и экономически выгодной технологией очистки почв от моно- и полиметаллического загрязнения, а также восстановления их экосистемных функций. К примеру, удаление металлов из почвы может обеспечить фитоэкстракция, направленная на преимущественную транслокацию тяжелых металлов в надземные части растений, которые в дальнейшем можно собрать и безопасно утилизировать. В почве доступность металлов значительно зависит от локальных условий. Важно понимать, что помимо влияния хелатирующих агентов на фитоэкстракцию и рост растений, происходит их влияние на биологическую активность почвы во время фиторемедиации. Этот аспект в почвах, загрязненных тяжелыми металлами, изучен недостаточно. Перспективным методом восстановления почв считается индуцированная фиторемедиация, при которой тяжелые металлы переходят в подвижную форму за счет действия комплексобразующего соединения, что приводит к увеличению их накопления растениями-фиторемедиантами.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационного исследования Иванова Ф.Д., посвященная изучению и комплексной оценке эффективности индуцированной биоремедиации техногенно загрязненных почв углеотвалов Восточного Донбасса, является актуальной, своевременной и весьма перспективной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается большим объемом полевых данных, корректностью методологии проведенных

исследований и репрезентативностью использованных методов. Научные положения, вынесенные на защиту, являются обоснованными применительно к техногенно загрязненным почвам углеотвалов Восточного Донбасса, и подтверждаются большим объемом собственных экспериментальных данных и результатами проведенного метаанализа данных научной литературы по оценке влияния микроорганизмов на фиторемедиационный потенциал растений при загрязнении почв тяжелыми металлами.

Научные выводы, сформулированные в диссертационной работе, в полной мере и адекватно отражают суть представленных научных исследований, являются обоснованными и достоверными, что подтверждается использованием соответствующих методов анализа, статистической обработкой результатов экспериментальных исследований с использованием критериев математической статистики.

В основе диссертационной работы, как указано в диссертации и автореферате, лежат оригинальные материалы, полученные лично автором в результате полевых, лабораторных и аналитических исследований с 2021 по 2025 годы. Планирование исследований и анализ полученных результатов, формулировка положений защищаемой диссертации и выводов, произведены автором при поддержке научных руководителей. Диссертационная работа выполнена на междисциплинарном уровне, охватывающем спектр научных дисциплин, таких как почвоведение, экология, природопользование.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы

Получены новые данные о качественном и количественном составе микробных сообществ в техногенно нарушенных почвах углеотвалов в условиях естественного полиметаллического загрязнения, вносящие существенный вклад в такие фундаментальные разделы почвоведения, как теоретические и научно-методические вопросы химии, биологии и биохимии почв. Результаты оценки воздействия индуцированной биоремедиации на свойства почвы, растений и микробных сообществ дополняют теоретические положения в области факториальной экологии по закономерностям влияния абиотических и биотических факторов на организмы, и механизмы адаптации организмов к различным факторам среды.

Ивановым Ф.Д. впервые проведена оценка воздействия таких хелатирующих агентов, как Na-ЭДТА, лимонная и щавелевая кислоты, на состав микробного сообщества и эффективность фиторемедиации почв углеотвалов Восточного Донбасса с полиметаллическим загрязнением, включающим такие тяжелые металлы, как цинк, кадмий, никель, свинец, медь и марганец. Показана интенсивность накопления этих тяжелых металлов растениями и изменение численности почвенной микробиоты хемозема в

процессе индуцированной биоремедиации. К приоритетам работы относится и установленный автором синергический эффект микоризной инокуляции грибами рода *Glomus* в сочетании с лимонной кислотой для повышения устойчивости и увеличения фиторемедиационного потенциала. Доказано, что внесение в почву хелатора и микоризы, как совместно, так и отдельно, стимулирует транслокацию металлов, особенно кадмия, свинца и меди, в корни пырея ползучего, и накопление металлов в стеблях люцерны посевной, что подтверждает повышение фитостабилизационного и фитоэкстракционного соответственно потенциала этих растений.

Практическая ценность работы связана с разработкой и апробацией метода индуцированной биоремедиации с использованием хелатирующего агента, растительного сообщества и микоризного гриба *Glomus sp.* для техногенно нарушенных почв в зоне влияния породных углеотвалов шахт «Аютинская» и «Майская». Доказана эффективность применения метода для таких почв с полиметаллическим загрязнением, как чернозем обыкновенный карбонатный техногенно-нарушенный, хемозем и пелозем типичный.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность научных положений и выводов обеспечена большим объемом натуральных исследований, собранным и проанализированным материалом, использованием классических и современных методик определения свойств техногенно нарушенных почв углеотвалов Восточного Донбасса и их статистической обработкой. В диссертационной работе Иванова Ф.Д. представлен метаанализ публикаций зарубежных и отечественных авторов по оценке влияния микроорганизмов на фиторемедиационный потенциал растений при загрязнении почв тяжелыми металлами.

Достоверность и новизна научных положений и выводов подтверждается тем фактом, что работа была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы развития межрегионального научно-образовательного центра Юга России (FENW-2024-0001) и Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030»).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и 1 приложения. Работа изложена на 147 страницах печатного текста, содержит 22 таблицы и 26 рисунков. Список литературы включает 253 источника, в том числе 205 на иностранных языках.

В первой главе диссертации «Обзор литературы» (стр. 10-27) представлен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме исследования. Рассмотрены механизмы защиты растений от токсичности

тяжелых металлов; фиторемедиация как подход к очистке загрязненных тяжелыми металлами почв. Детально рассмотрены растительно-микробные ассоциации как форма существования растений, в том числе в присутствии тяжелых металлов, и перспективы их использования в фиторемедиации. Обстоятельно изложено влияние микроорганизмов на поглощение тяжелых металлов в процессе фиторемедиации. Автор в обзоре коснулся также проблем оценки эффективности биологических агентов индуцированной ремедиации.

В тоже время появилось **замечание**, что отсутствует итог приведенного обзора литературы, как он помог определиться с задачами практического исследования, методологией и выбором методов?

Возник также **вопрос** – как соотносятся описанные по действию концентрации тяжелых металлов с уровнем ПДК (или ОДК) этих металлов в почве?

Во второй главе «Объекты методы исследования» (стр. 28 - 37) представлены характеристика и особенности почв, выбранных в качестве объектов исследования для изучения состава микробного сообщества техногенно нарушенных почв углеотвалов Восточного Донбасса. Ивановым Ф.Д. изучены почвы зоны влияния породных углеотвалов шахт «Аютинская» и «Майская», которые были классифицированы как чернозем обыкновенный карбонатный техногенно-нарушенный, хемозем и на склоне пелозем типичный. В качестве фоновой незагрязненной почвы исследована ненарушенная почва ООПТ «Персиановская заповедная степь».

В разделе «Методы исследования» описано проведение метаанализа по базе данных Scopus, содержащей 14392 тематических научных статьи за период с 1993 по 2023 года. При этом метаанализ был сосредоточен на 67 исследованиях, содержащих информацию о концентрациях тяжелых металлов в побегах и корнях растений. Следует отметить, что Иванов Ф.Д. использовал программное обеспечение Comprehensive Meta Analysis 3.0 (Biostat, USA), и для анализа данных была реализована модель смешанного эффекта.

В этом разделе описан также отбор почвенных образцов и определение основных физико-химических свойств почв; определение содержания тяжелых металлов в почве и растениях с применением рентгеновского спектрометра «Спектроскан МАКС-GV» в соответствии с аттестованной методикой. Автор рассчитывал акропетальный коэффициент и коэффициент накопления для оценки барьерной функции корней и аккумулирующей способности исследуемых растений по современным методикам. Для расчетов коэффициента накопления использованы результаты определения подвижных соединений тяжелых металлов в почве по методу Т.М. Минкиной. Описан также расчет суммарного показателя загрязнения почв.

Представлено определение микробиологических показателей – численности аммонифицирующих, целлюлозолитических, прототрофных бактерий и актиномицетов, плесневых грибов и дрожжей. С целью оценки доминирующей экологической стратегии (R- или K) определялась доля быстрорастущих микроорганизмов от общего их числа.

Комплекс методических подходов, используемых в работе, соответствует современному уровню исследований, и свидетельствует о достаточно высокой квалификации диссертанта.

Замечание. В разделе статистических анализов не представлены ссылки на источники.

В третьей главе «Методология исследований» (стр. 38-56) описано проведение метаанализа данных литературы о влиянии микроорганизмов на накопление тяжелых металлов растениями; приведена аналитическая характеристика исследуемых в рамках метаанализа новых публикаций (с 2001 по 2023 гг.) о влиянии микроорганизмов на фиторемедиацию тяжелых металлов; влиянии различных родов микроорганизмов на поглощение тяжелых металлов растениями; влияние рода растений на восприимчивость к микробно-индуцированной фиторемедиации.

Представляют научный интерес материалы раздела «Анализ влияния внесения микроорганизмов на накопление тяжелых металлов при фиторемедиации». На основании метаанализа показано, что использование эндомикоризных грибов рода *Glomus* способствует стимуляции фитостабилизации, что и было выбрано Ивановым Д.Ф. для модельного эксперимента. Выбор растений родов *Elytrigia* и *Medicago* был обоснован их представленностью в местной флоре и отсутствием валидных исследований их потенциала при индуцированной фиторемедиации.

Далее в этой главе достаточно подробно описана закладка модельных экспериментов в лабораторных условиях для определения наиболее эффективных хелатирующих агентов и концентраций для фиторемедиации хемозема угольного отвала шахты «Аютинская». Был проведен модельный вегетационный опыт в лабораторных условиях при комнатной температуре с использованием тех же загрязненных почв, а в качестве контроля – чернозем миграционно-сегрегационный среднегумусированный карбонатный из ООПТ «Персиановская заповедная степь».

Замечания: 1 – автор в тексте использовал термин «слегка суглинистую почву», есть ли такой тип почв? 2 – по тексту указано для одного варианта почв, что 2 кг были помещены в горшки, а для другого – 2 кг почвы помещали в сосуды. Вероятно, речь идет в обоих случаях о стандартных вегетационных сосудах для проведения в лабораторных условиях почвенных экспериментов?

ГЛАВА 4 «Техногенно загрязненные почвы углеотвалов восточного Донбасса и их микробные сообщества» (стр. 57 – 76) включает представление авторских результатов по изучению влияния породных отвалов на накопление тяжелых металлов в почвах; определено валовое содержание и подвижные формы тяжелых металлов для исследуемых почв.

В разделе «Микробиологические свойства исследуемых почв углеотвалов» представлено описание качественного и количественного состава микробного сообщества для чернозема миграционно-сегрегационного, чернозема миграционно-сегрегационного техногенно-нарушенного, хемозема и пелозема типичного. Ярко выраженных закономерностей общей численности изучаемых групп микроорганизмов не было выявлено. Проведенный статистический анализ показал наличие ряда корреляционных связей между показателями загрязнения почв районов угледобычи и численностью отдельных групп культивируемых микроорганизмов.

ГЛАВА 5 «Влияние хелатирующих агентов на биодоступность тяжелых металлов и структуру микробных сообществ хемозема» (стр. 77 – 91) представлены данные исследования влияния хелатирующих агентов на валовое содержание и подвижность тяжелых металлов в хемоземе; влияние хелатирующих агентов на накопление тяжелых металлов в растениях. Убедительно показан дозозависимый эффект между накоплением тяжелых металлов растениями и увеличением подвижности металлов при внесении хелатирующих агентов. Аналогичная зависимость выявлена между концентрацией подвижных металлов и концентрацией хелатирующих агентов в почве. Ивановым Д.Ф. получены также данные влияния хелатирующих агентов на структуру микробных сообществ хемозема.

ГЛАВА 6. «Оценка эффективности биоремедиации почв углеотвалов восточного Донбасса» (стр. 92-110) посвящена описанию результатов исследования влияния микоризации и хелатирующих агентов на физико-химические свойства хемозема. Представлены данные влияния на морфометрические показатели дикорастущих травянистых растений при разном уровне загрязнения почв. Проанализированы результаты влияния микоризации и хелатирующих агентов на подвижность и накопление тяжелых металлов в почвах и в дикорастущих травянистых растениях. Проведена комплексная оценка эффективности применения индуцированной биоремедиации на техногенно загрязненной почве с использованием биогеохимических показателей. В целом полученные результаты позволили автору сделать вывод о возможности и перспективности использования пырея ползучего и люцерны посевной в комплексе с лимонной кислотой и микоризой в восстановлении загрязненных тяжелыми металлами почв углеотвалов.

Выводы представлены на страницах 111-112, сформулированы корректно и отражают полученные результаты диссертационного исследования.

Основные положения диссертационной работы были обсуждены на всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации опубликованы 4 статьи в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science, из них 3 публикации в журналах категории Q1, что согласно Положениям о присуждении ученых степеней ЮФУ и ВАК РФ приравнивается к категории K1.

Замечания: 1 – в списке опубликованных работ автора отсутствует перечень тезисов или материалов указанных 6-ти конференций, форумов, съездов, хотя в eLibrary у Иванова Ф.Д. список из 31 публикации.

2 – по тексту диссертации автор использовал русские названия модельных растений как пырей и люцерна. Это неправильно хотя бы потому, что просто Люцерна — это род однолетних и многолетних трав или полукустарников семейства Бобовые, объединяющий 103 вида, а у автора в работе была *Medicago sativa* – люцерна посевная. И *Elytrigia répens* – это пырей ползучий, а не какой-то другой. При этом на рисунках и в тексте они же на латинском языке были написаны правильно (в бинарной номенклатуре).

Эти замечания и сделанные выше по тексту, не подвергают сомнению достоверность результатов и выводов диссертации и носят уточняющий характер.

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.5.19. Почвоведение по пунктам:

– 6. Теоретические и научно-методические вопросы химии почв. Изучение взаимодействия органических и минеральных компонентов почв. Техногенное и агрогенное химическое загрязнение почв, изменение их естественной кислотности, химического состава и физико-химических свойств;

– 7. Теоретические и научно-методические вопросы биологии и биохимии почв. Изучение катионно-анионного равновесия в почвах и взаимодействия в них органических и минеральных составляющих, изучение состава и свойств органического вещества почв. Почвенная зоология и микробиология.

А также соответствует паспорту специальности 1.5.15. Экология по пункту 1 – Закономерности влияния абиотических и биотических факторов на организмы. Экофизиология (факториальная экология). Адаптации организмов к различным факторам среды. Жизненные формы и адаптивные типы. Изменение организмами среды обитания.

Общее заключение. Работа написана грамотным научным языком, хорошо иллюстрирована. Материал представлен в логической последовательности, стиль изложения и оформление соответствуют уровню требований, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Полученные результаты, сделанные выводы и сформулированные положения научно обоснованы, достоверны, подтверждены значительным натурным и аналитическим материалом, имеют существенную научную значимость и большую практическую ценность.

Диссертация Иванова Федора Дмитриевича на тему: «Оценка эффективности индуцированной биоремедиации почв углеотвалов Восточного Донбасса», по своей актуальности, современным методам исследования, объему фактического материала и качеству его анализа и обработки, научной новизне и практической значимости соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ЮФУ» (№66-ОД от 29.03.2024 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. А ее автор, Иванов Федор Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата биологических наук по специальностям 1.5.19. Почвоведение (биологические науки) и 1.5.15. Экология (биологические науки).

Официальный оппонент:

доктор биологических наук по специальностям:
03.00.16 – экология и 03.02.03 – микробиология,
профессор, заведующий кафедрой

«Экология и техносферная безопасность»

СГТУ имени Гагарина Ю.А.



Тихомирова Елена Ивановна

Подпись д.б.н., профессора Тихомировой Е.И. «Заверяю»

Ученый секретарь Ученого совета

СГТУ имени Гагарина Ю.А.



Потапова А.В.

10.12.2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корпус 5.

Телефон: (8452)-998530; 8-905-3230419; e-mail: tichomirova_ei@mail.ru.