

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»
(ПНИПУ)**

614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29.

Тел.: 8(342) 219-80-67. Факс: 8(342) 219-89-27

E-mail: rector@pstu.ru; <http://www.pstu.ru>

ОКПО 02069065 ОГРН 1025900513924 ИНН/КПП 5902291029/590201001

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям
ФГАОУ ВО «ПНИПУ»,

д-р физ.-мат. наук, доцент
Алексей Игоревич

Швейкин

2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» на диссертационную работу

Бомбы Ильи Васильевича

на тему: **«Коллоидно-химические особенности взаимодействия ионов
тяжелых металлов с зоокомпостом культивирования личинок
мухи *Hermetia illucens*»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности 1.4.10. Коллоидная химия

Актуальность темы исследования

Изучение коллоидно-химических особенностей взаимодействия биокомпоста, полученного из органических отходов, с ионами тяжелых металлов (ИТМ) в почвах имеет важное практическое значение для обеспечения экологической устойчивости, рационального управления отходами и защиты здоровья населения. Ионы тяжелых металлов обладают высокой биохимической активностью и способны накапливаться в почвах, при этом, в отличие от органических загрязнителей, подвергающихся биодеструкции, металлы лишь перераспределяются между компонентами окружающей среды.



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

Для снижения подвижности ИТМ традиционно применяют адсорбенты (активированный уголь, цеолиты, глины), однако востребована разработка эффективных, экономически доступных и экологически безопасных материалов. Перспективным направлением исследований является обоснование использования органических сорбентов, содержащих гуминовые кислоты, способных образовывать прочные хелатные комплексы с ИТМ и переводить токсичные формы металлов в малоподвижное состояние.

Особый интерес представляет исследование коллоидно-химических процессов взаимодействия ионов тяжелых металлов с зоокомпостом, образующимся при промышленном культивировании личинок мухи *Hermetia illucens*. Высокое содержание гуминовых веществ в компосте позволяет рассматривать данный материал как потенциально эффективный сорбент для иммобилизации поллютантов в почвенных коллоидных системах. В связи с этим диссертационная работа Бомбы И.В., направленная на установление коллоидно-химических закономерностей взаимодействия зоокомпоста с ионами тяжелых металлов является актуальной.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа изложена на 170 страницах в пяти главах, состоит из введения, основной части, заключения, списка литературы, включающей 164 наименования, содержит 24 таблицы, 68 рисунков, 4 приложения.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической информации о путях поступления, формах нахождения и способах снижения подвижности ионов тяжелых металлов в почвенных коллоидных системах. Особое внимание уделено роли гуминовых кислот в процессах комплексообразования, что логически обосновывает выбор зоокомпоста, как потенциально эффективного сорбционного материала для связывания ИТМ.

Во второй главе охарактеризованы объекты (зоокомпост «Гермеция», модельные растворы солей металлов, почвы) и комплекс современных физико-химических методов исследования: электронная микроскопия, ЭДС-анализ, ИК-спектроскопия, измерение ζ -потенциала, атомно-абсорбционная спектрометрия, методы математической статистики.

В третьей главе представлены результаты изучения физико-химических характеристик зоокомпоста, определяющих его сорбционную активность по отношению к ионам тяжелых металлов. Методом ИК-спектроскопии подтверждено наличие в составе материала разнообразных функциональных групп, способных участвовать в связывании ионов металлов. Показано, что зоокомпост характеризуется отрицательным значением ζ -потенциала ($-28,4$ мВ), величина и знак которого зависят от рН



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

среды и концентрации ионов металлов в растворе. Удельная поверхность зоокомпоста указывает на развитую структуру материала, данные рентгенофазового анализа подтверждают наличие в составе элементов, потенциально способных улучшать агрохимические свойства почв.

В четвёртой главе приведены результаты исследования сорбционных характеристик зоокомпоста по отношению к ионам Cu^{2+} , Zn^{2+} и Cd^{2+} в модельных растворах. Установлено, что эффективность извлечения ионов возрастает с увеличением дозы сорбента и времени контакта, показано, что повышение температуры раствора способствует росту степени очистки. С использованием методов математического планирования эксперимента определены рациональные параметры процесса сорбции: доза зоокомпоста – 15 г/дм^3 , время взаимодействия – 20 мин, температура раствора – $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Максимальная сорбционная ёмкость зоокомпоста составила $0,5 \text{ ммоль/г}$ по ионам Cu^{2+} , $0,4 \text{ ммоль/г}$ по ионам Zn^{2+} и $0,19 \text{ ммоль/г}$ по ионам Cd^{2+} . Обработка экспериментальных изотерм с использованием моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина–Радускевича показала, что наилучшее описание сорбционного процесса достигается в рамках модели Фрейндлиха ($R^2 = 0,9948\text{--}0,9962$), что может свидетельствовать о гетерогенности сорбционных центров материала. Значения константы интенсивности сорбции ($n > 1$) позволяют характеризовать условия процесса как благоприятные. Установленные кинетические закономерности процесса извлечения ИТМ позволило соискателю предположить, что процесс лимитируется смешанным диффузионным механизмом, определены коэффициенты внешней и внутренней диффузии.

В пятой главе представлены результаты оценки эффективности применения зоокомпоста в качестве мелиоранта для почв, загрязнённых ионами тяжёлых металлов, на примере ионов меди. Показано, что внесение 10 % зоокомпоста в модельную почву способствует существенному снижению содержания ионов меди в зелёной массе тест-растений *Avena sativa* (на 89,17 % по сравнению с контролем), отмечено также улучшение показателей всхожести семян и увеличение биомассы растений.

Установлено, что доля десорбированных ионов Cu^{2+} с поверхности зоокомпоста не превышает 6,6 % от максимальной сорбционной ёмкости, что может свидетельствовать о высокой прочности связывания металла. Показано, что внесение зоокомпоста в дозе 15 г/дм^3 приводит к увеличению буферной ёмкости чернозёма на 27,3% (с 17,41 до 22,17 ммоль- экв/100 г) по сравнению с контролем.

Результаты биотестирования водных вытяжек зоокомпоста на *Triticum aestivum L.* и *Daphnia magna* позволили сделать вывод об отсутствии выраженного токсического действия. Приведена оценка предотвращённого эколого-экономического ущерба от внедрения разработанных технических решений, предложена принципиальная технологическая схема подготовки и внесения зоокомпоста в загрязнённые почвы.



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

В заключении сформулированы основные выводы, полностью соответствующие поставленным задачам.

Содержание автореферата полностью соответствует диссертационной работе.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов и обоснованность сформулированных положений и выводов обеспечивается использованием фундаментальных представлений коллоидной химии об электрокинетических явлениях, ионном обмене и механизмах адсорбции, а также анализом и обобщением современной научно-технической литературы по тематике исследования.

Экспериментальная часть работы выполнена с использованием комплекса взаимодополняющих физико-химических методов: электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ, ИК-спектроскопия, атомно-абсорбционная спектрометрия, определение ζ -потенциала методом электрофореза и стандартизированных методик инструментального анализа. Воспроизводимость экспериментальных данных подтверждена статистической обработкой результатов с применением методов математического планирования эксперимента и регрессионного анализа.

Результаты диссертационного исследования, отражающие основные положения работы, изложены в 13 научных публикациях, в том числе: 3 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий из международных реферативных баз данных, рекомендованных ВАК РФ; 1 – в иных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Получен 1 патент РФ на изобретение.

Научная новизна

В ходе выполнения диссертационного исследования автором получены новые научные данные о коллоидно-химических закономерностях взаимодействия зоокомпоста культивирования личинок *Hermetia illucens* с ионами тяжёлых металлов.

Установлены закономерности снижения подвижности ионов тяжелых металлов в загрязненных почвенных коллоидных системах, обусловленные комплексообразованием катионов Cu^{2+} , Zn^{2+} и Cd^{2+} с гидроксильными ($-\text{OH}$) и карбоксильными ($-\text{COOH}$) группами гуминовых кислот зоокомпоста. Установлено, что наличие аминогрупп в структуре зоокомпоста обеспечивает анионообменные свойства за счёт протонирования в кислой среде, изменяя электроповерхностные характеристики сорбента.

Ионообменное замещение катионов (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) в двойном электрическом слое ионами тяжелых металлов свидетельствует о частичном вытеснении катионов из обменного комплекса зоокомпоста. Установлены зависимости сорбционной емкости зоокомпоста от природы иона тяжелого



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

металла: максимальные значения достигают 0,504 ммоль/г для Cu^{2+} , 0,405 ммоль/г для Zn^{2+} и 0,187 ммоль/г для Cd^{2+} , что обусловлено различиями в константах устойчивости образующихся металл-гуматных комплексов.

Определено, что при внесении зоокомпоста в модельные почвы, загрязнённые ионами Cu^{2+} , содержание ионов меди в тест-растении снижается до 90 %. Добавка зоокомпоста способствует повышению буферной ёмкости почвы на 4,76 ммоль-экв/100г, что на 27 % выше контроля. Доля десорбированных ионов Cu^{2+} составляет до 7 % от общего количества меди, связанного зоокомпостом, что свидетельствует о высокой прочности иммобилизации ионов меди.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения зоокомпоста, отхода промышленного культивирования личинок мухи *Hermetia illucens*, в качестве сорбционного материала для иммобилизации ионов тяжелых металлов в загрязненных почвах. Получены закономерности коллоидно-химического взаимодействия зоокомпоста с модельными растворами, содержащими ионы Cu^{2+} , Zn^{2+} и Cd^{2+} , доказано наличие в составе материала гуминовых кислот, показана предполагаемая схема образования хелатного комплекса с ионами тяжелых металлов.

Установлено влияние функциональных групп зоокомпоста ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$) на его сорбционные свойства, отрицательное значение ζ -потенциала ($-28,4$ мВ) способствует образованию устойчивых комплексов с ионами металлов. Определены рациональные параметры процесса извлечения ионов из растворов: доза зоокомпоста 15 г/дм³, температура среды 25 °С, время адсорбционного взаимодействия 20 мин. Сорбционная емкость материала составила 0,504 ммоль/г для Cu^{2+} , 0,405 ммоль/г для Zn^{2+} и 0,187 ммоль/г для Cd^{2+} .

На примере ионов Cu^{2+} установлено, что использование зоокомпоста в качестве добавки к модельной почве (10 %) снижает содержание меди в зеленой массе растений *Avena sativa* на 89,2 %, при этом высота растений увеличивается на 35,0 %, а зеленая масса – на 76,3 %. Показано, что зоокомпост не только иммобилизует тяжелые металлы, но и обогащает почву питательными элементами, что позволяет рассматривать его в качестве органоминерального удобрения.

Разработан состав почвосмесей на основе зоокомпоста, практические результаты работы защищены патентом РФ № 2733662 С1 на изобретение.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских (национальных) конференциях и форумах: Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования (Белгород, 2021, 2022); Рациональное использование природных ресурсов и переработка



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология (Алушта, 2021, 2023, 2025); Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум (Белгород, 2021); Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности (Казань, 2023, 2025).

Для апробации и внедрения результатов работы проведены полупромышленные испытания на площадках ООО «БИ-ОРЕСУРС» и ООО «ЮЮБА»; результаты подтверждены актами о принятиях к внедрению и итогами полупромышленных испытаний. Технология ремедиации почв зоокомпостом будет принята к реализации в 2027 году.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации

Результаты диссертационного исследования, в которых установлены коллоидно-химические закономерности взаимодействия зоокомпоста с ионами тяжелых металлов, могут быть рекомендованы для внедрения на сельскохозяйственных предприятиях и для рекультивации загрязненных территорий; в учебном процессе высших учебных заведений при подготовке студентов направлений «Природообустройство и водопользование», «Техносферная безопасность». Полученные автором данные о сорбционной ёмкости, термодинамических параметрах и кинетических характеристиках процесса представляют ценность для развития представлений о коллоидно-химических процессах в гетерогенных системах с участием природных органических сорбентов.

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в области коллоидно-химических процессов, связанных с углубленным изучением механизмов взаимодействия зоокомпоста с многокомпонентными загрязнителями, модификацией его структуры, а также анализом долгосрочной стабильности хелатных комплексов в различных почвенно-климатических условиях.

Замечания по содержанию и оформлению диссертационной работы

1. Соискателем представлены результаты термического анализа образцов зоокомпоста (кривые ТГ и ДСК). Однако не указано при каких условиях проводился анализ образца: среда (аргон или воздух), темп нагрева и др., и с какой целью проведено исследование. Его результаты не использованы в дальнейшей работе.

2. Автором представлены изотермы адсорбции ионов тяжелых металлов на образцах зоокомпоста. Процесс извлечения ионов протекает в результате ионного обмена и образования металлорганических комплексов с хелатными соединениями, т.е. по механизму химической адсорбции. Автор аппроксимирует полученные изотермы, используя уравнение Дубинина-Радушкевича. Это уравнение описывает процесс физической адсорбции в микропорах сорбента с позиций теории объемного заполнения микропор и его нецелесообразно применять для низкопористых сорбентов.



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

3. Автор использует различные формулы для определения кинетических закономерностей процесса извлечения ИТМ (критерий Био, 1-*F* и др.) без ссылок на источники и необходимых пояснений. В этой связи трудно интерпретировать полученные результаты.

4. Недостаточно понятно описание и обсуждение результатов экспериментов по выделению из зоокомпоста гуминовых кислот. В работе не представлены данные о содержании гуминовых веществ в исходном зоокомпосте, поэтому сложно интерпретировать результаты по эффективности извлечения гуминовых кислот (рис. 5.6).

5. В главе 3 указано, что удельная поверхность зоокомпоста определена методом адсорбции метиленового голубого и составляет 152,93 м²/г. Целесообразно было бы сопоставить это значение с данными, полученными классическим методом низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ).

6. В работе проводились исследования по извлечению зоокомпостом ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} и Cd^{2+} , выбор которых недостаточно обоснован.

7. В разделе 5.2 диссертации при обсуждении десорбции указано, что высвобождается ~6,6 % связанных ионов меди при pH 7,5. Необходимо уточнить, каким реагентом проводилась десорбция и какова продолжительность эксперимента, поскольку устойчивость комплексов может зависеть от вида экстрагента.

Указанные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Бомбы Ильи Васильевича на тему: «Коллоидно-химические особенности взаимодействия ионов тяжелых металлов с зоокомпостом культивирования личинок мухи *Hermetia illucens*» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача, заключающаяся в установлении коллоидно-химических закономерностей иммобилизации ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} и Cd^{2+} отходом производства – зоокомпостом, что имеет существенную значимость для развития соответствующей отрасли знаний – коллоидной химии. Представленная работа содержит обоснованные и достоверные научные результаты, выводы и рекомендации, отличающиеся новизной, а также теоретической и практической значимостью, текст написан соискателем самостоятельно грамотным техническим языком.

По актуальности исследуемых вопросов, научной новизне и практической значимости, числу публикаций диссертационная работа полностью соответствует критериям, установленным пп. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

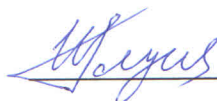
наук, а её автор, Бомба Илья Васильевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 1.4.10. Коллоидная химия.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждён и одобрен на расширенном заседании кафедры «Охрана окружающей среды» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (протокол № 33 от «29» апреля 2026 г.).

Доктор технических наук по специальности 25.00.36 – Геоэкология, профессор, заведующий кафедрой охрана окружающей среды ФГАОУ ВО «ПНИПУ»

 Рудакова Лариса Васильевна

Доктор технических наук по специальности 05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, профессор, профессор кафедры охраны окружающей среды ФГАОУ ВО «ПНИПУ»

 Глушанкова Ирина Самуиловна

« 29 » апреля 2026 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГАОУ ВО «ПНИПУ») 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29
Телефон: +7 (342) 219-80-67
Адрес электронной почты: rector@pstu.ru
Веб-сайт: https://pstu.ru

Подписи зав. каф. ООС проф. Рудаковой Л.В., проф. Глушанковой И.С. заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ФГАОУ ВО «ПНИПУ», канд. ист. наук, доцент

Владимир Иванович Макаревич

(подпись)



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»