

На правах рукописи



БОМБА ИЛЬЯ ВАСИЛЬЕВИЧ

**КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С  
ЗООКОМПОСТОМ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ЛИЧИНОК МУХИ  
*HERMETIA ILLUCENS***

1.4.10. Коллоидная химия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном  
бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования «Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова»

**Научный руководитель:** **Свергузова Светлана Васильевна**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры промышленной  
экологии ФГБОУ ВО «Белгородский  
государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова»

**Официальные оппоненты:** **Тунакова Юлия Алексеевна**  
доктор химических наук, профессор,  
заведующая кафедрой общей химии и  
экологии ФГБОУ ВО «Казанский  
национальный исследовательский  
технический университет им.  
А.Н. Туполева-КАИ»

**Воловичева Наталья Александровна**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры общей химии ФГАОУ ВО  
«Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет»

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»

Защита состоится «4» июня 2026 года в 14:00 на заседании диссертаци-  
онного совета 24.2.276.01 при ФГБОУ ВО «Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова». Адрес: 308012, г. Белгород,  
ул. Костюкова, 46, ауд. ГК 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ им. В.Г. Шухова  
и на сайте: [http://gos\\_att.bstu.ru/dis/Vomba](http://gos_att.bstu.ru/dis/Vomba)

Автореферат разослан «8» апреля 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



В.А. Полуэктова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Коллоидно-химические особенности взаимодействия органических отходов с ионами тяжелых металлов (ИТМ) в почвах имеют практическое значение для экологической устойчивости, управления отходами и защиты здоровья населения. Понимание этих процессов важно для разработки эффективных технологий утилизации и переработки отходов с минимальным негативным воздействием на окружающую среду. Подвижные формы тяжелых металлов (ТМ) характеризуются высокой биохимической активностью и накапливаются в биосредах. В отличие от органических загрязнителей, которые могут разлагаться, металлы как загрязнители имеют особенность лишь перераспределяться между различными компонентами окружающей среды.

В настоящее время для снижения подвижности ИТМ применяются различные методы, включая фитомелиорацию, биоремедиацию, применение адсорбентов и химических реагентов. Для связывания ИТМ применяются такие адсорбенты, как активированный уголь, цеолиты или глины, однако сохраняется потребность в создании эффективных и доступных материалов.

Диссертационная работа посвящена изучению коллоидно-химических особенностей взаимодействия зоокомпоста (ЗК) с ИТМ для снижения их подвижности и доступности для растений. Одним из основных способов снижения мобильности ТМ в почвах и растворах является использование органических сорбентов, образующих труднорастворимые хелатные соединения с поллюгантами. Особенно эффективным представляется использование материалов, способствующих снижению токсичности веществ, например, добавок, содержащих гуминовые кислоты (ГК) и их соли. В этом случае происходит связывание подвижных форм ТМ в малоподвижные нерастворимые комплексы.

В качестве одного из таких органических сорбционных материалов может выступать ЗК после промышленного выращивания личинок мухи «Черная львинка» (*Hermetia illucens*). В связи с этим, исследование коллоидно-химических процессов взаимодействия зоокомпоста с ИТМ является актуальной научной задачей. Работа выполнялась в рамках Соглашения № 07519SU2000000 между Минобрнауки России и ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» «Создание высокотехнологичного крупномасштабного производства животного белка из личинок мух».

**Степень разработанности темы.** Проблема иммобилизации ТМ с использованием органических сорбционных материалов широко изучена в контексте экологической химии и почвоведения. Многочисленные исследования подтверждают эффективность гуминовых кислот и их производных как ключевых агентов, способных формировать устойчивые комплексы с ИТМ за счет хелатирования и поверхностной сорбции. Применение ЗК, полученного при промышленном культивировании личинок *Hermetia illucens*, представляет собой новое направление, в настоящий момент коллоидно-химические свойства этого материала изучены недостаточно.

**Цель работы.** Изучение коллоидно-химических особенностей применения зоокомпоста культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* в качестве материала для иммобилизации ионов тяжелых металлов в почвенных системах.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

- выделение основных источников, путей попадания и способов снижения биодоступности ТМ, анализ коллоидных аспектов миграции ИТМ в почвенных экосистемах;

- анализ возможности использования зоокомпоста для повышения поглощательной способности почвы с целью снижения подвижности ТМ путём формирования устойчивых хелатных комплексов;

- изучение коллоидно-химических характеристик зоокомпоста (величина и знак  $\zeta$ -потенциала, площадь удельной поверхности, ЕКО, изменение рН и др.), влияющих на связывание ИТМ в малорастворимые комплексы;

- исследование кинетики и анализ процессов извлечения ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  зоокомпостом, определение оптимальных условий процесса сорбции;

- оценка влияния ЗК на агрохимические показатели почвы в условиях загрязнения ТМ, включая параметры всхожести, морфометрические характеристики и аккумуляцию ТМ в растительных тканях.

**Научная новизна работы.** Выявлены закономерности снижения подвижности ионов тяжелых металлов в загрязненных почвенных коллоидных системах, обусловленные комплексобразованием катионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  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 ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) 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 металла: максимальные значения достигают 0,504 ммоль/г для  $\text{Cu}^{2+}$ , 0,405 ммоль/г для  $\text{Zn}^{2+}$  и 0,187 ммоль/г для  $\text{Cd}^{2+}$ , что обусловлено различиями в константах устойчивости образующихся металл-гуматных комплексов.

Определено, что при внесении зоокомпоста в модельные почвы, загрязнённые ионами  $\text{Cu}^{2+}$ , содержание 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  $\text{Cu}^{2+}$  составляет до 7 % от общего количества меди, связанного зоокомпостом, что свидетельствует о высокой прочности иммобилизации ионов меди.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** 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  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$ , доказано наличие гуминовых кислот в ЗК, показана предполагаемая схема образования хелатного комплекса с ИТМ. Показано влияние функциональных групп ЗК ( $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ) на его сорбционные свойства, отрицательное значение  $\zeta$ -потенциала ЗК ( $-28,4$  мВ) способствует образованию комплексов с ИТМ.

Показано снижение концентрации ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  в модельных растворах, что позволяет использовать зоокомпост в качестве сорбента ионов тяжелых металлов. Определены рациональные параметры процесса извлечения ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  из модельных растворов, сорбционная емкость зоокомпоста составляет, ммоль/г: 0,504; 0,405; 0,187 для  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  соответственно. Экспериментально установлена оптимальная дозировка добавки зоокомпоста ( $15$  г/дм<sup>3</sup>), температура среды ( $25$  °С) и время адсорбционного взаимодействия ( $20$  мин).

Установлено на примере ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , что использование ЗК в качестве добавки к модельной почве снижает содержание меди в зеленой массе растений *Avena sativa* на  $89,17\%$  (при добавлении  $10\%$  ЗК), высота растений увеличивается на  $35,00\%$ , зеленая масса – на  $76,32\%$ . ЗК не только иммобилизует ТМ, но и обогащает почву питательными элементами: содержание гумуса ( $31,50\%$ ), калия ( $10,90\%$ ), кальция ( $8,66\%$ ), магния ( $5,91\%$ ) и фосфора ( $4,99\%$ ) в его составе позволяет использовать ЗК в качестве органоминерального удобрения. Разработан состав почвосмесей на основе зоокомпоста, практические результаты работы защищены патентом № 2733662 С1 на изобретение.

**Методология и методы исследования.** Для достижения поставленных целей был использован комплекс методов, включающий: анализ и обобщение научной и технической литературы по исследуемой теме; экспериментальные исследования, современные физико-химические методы исследований: электронная микроскопия, дифференциально-термический, фотоэлектроколориметрический, рентгенофазовый анализ, атомно-абсорбционная спектроскопия, определение  $\zeta$ -потенциала методом электрофореза. Обработка результатов осуществлялась с использованием методов математической статистики.

**Положения, выносимые на защиту:**

- коллоидно-химические особенности сорбции ТМ зоокомпостом, обусловленные его физико-химическими свойствами и взаимодействием с функциональными группами;
- физико-химические характеристики ЗК как сорбционного материала для связывания ИТМ в почвенных системах;
- влияние гуминовых кислот, входящих в состав ЗК, на процессы связывания ИТМ за счет образования хелатных комплексов;
- рациональные параметры процесса очистки модельных растворов, содержащих ионы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$ , зоокомпостом.

**Степень достоверности полученных результатов.** Полученные научные данные подтверждаются применением классических физико-химических методов исследования, стандартных методик и современной приборной базы, применением известных численных методов обработки экспериментальных данных, воспроизводимостью полученных результатов.

**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 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).

**Внедрение результатов исследований.** 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 результатах полупромышленных испытаний. Технология ремедиации почв ЗК будет принята к реализации в 2027 году, предотвращенный эколого-экономический ущерб составит около 1,06 млн руб./га. Теоретические и экспериментальные результаты исследований используются в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке обучающихся по направлениям «Техносферная безопасность», «Природообустройство и водопользование».

**Публикации.** 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.

**Личный вклад.** Автором теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования ЗК личинок мухи *Hermetia illucens* для снижения подвижности ИТМ. Изучены физико-химические характеристики ЗК, влияющие на процесс связывания ИТМ. Проведены комплексные исследования коллоидно-химических аспектов взаимодействия ЗК с ионами  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  и  $Cu^{2+}$ . Исследовано влияние ЗК на показатели роста тест-растений и содержание подвижных форм металлов в зеленой массе. Осуществлен расчет термодинамических параметров сорбции и проведена статистическая обработка полученных результатов.

**Объем и структура 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Эффективным способом снижения подвижности ИТМ традиционно является использование органических сорбентов. Известно, что гуминовые кислоты содержат функциональные группы (-ОН, -СООН), которые способны образовывать устойчивые хелатные комплексы с ионами металлов. Поэтому ЗК культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* может рассматриваться как перспективный материал для иммобилизации ИТМ, что и явилось научной гипотезой данного исследования.

**Во введении** изложена актуальность, дана общая характеристика диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и апробация работы.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы, посвященный особенностям физико-химических процессов взаимодействия ТМ с природными грунтами. Рассмотрен характер взаимодействия гуматов, содержащихся в ЗК, с ИТМ, представлены источники, пути попадания, способы снижения, подвижность и биодоступность ИТМ в дисперсных грунтах. Описана проблема поступления в почву неорганических загрязнителей, выявлена необходимость в новых материалах для иммобилизации ИТМ и, следовательно, снижения токсичности загрязнённой почвы.

**Вторая глава** содержит описание объектов и методов исследования. Объектами исследования в работе являются: модельные растворы, содержащие ионы  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  и  $Cu^{2+}$  в концентрациях 50 мг/дм<sup>3</sup>; ЗК «Гермения» – отход промышленного культивирования личинок мухи «Черная львинка», почвы Белгородской области. Представлены методы определения физико-химических свойств ЗК, сорбционных исследований.

**В третьей главе** изложены результаты исследований структурных, физико-химических и сорбционных характеристик ЗК. ЗК «Гермения», используемый в работе, предоставлен ООО «ЭкоБелок» (Московская область). Обобщенные показатели и биогенные компоненты ЗК представлены в табл.1.

**Таблица 1** – Обобщенные показатели и биогенные компоненты зоокомпоста

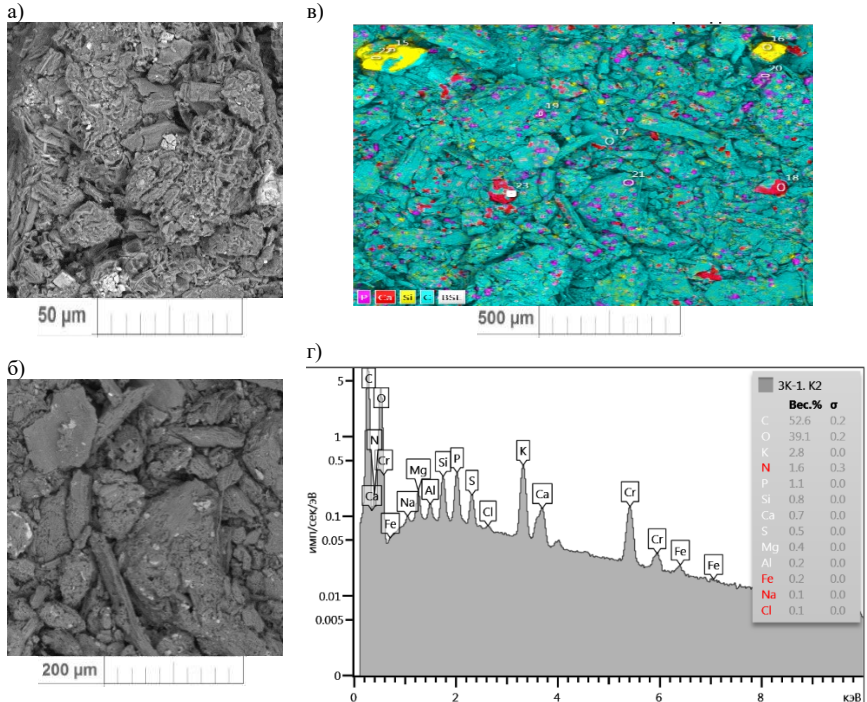
Влажность, %	pH H <sub>2</sub> O	pH <sub>KCl</sub>	Общее солесодержание, %		Общая щелочность, ммоль-экв/100 г		Гумус, %
			сухой остаток	прокаленный остаток	карбонатная	гидрокарбонатная	
$\frac{57,99}{> 25,0^*}$	$\frac{7,57}{6,0 - 8,5^*}$	$\frac{7,53}{6,0 - 8,5^*}$	$\frac{5,704}{< 1,5^{**}}$	$\frac{1,882}{-}$	$\frac{6,23}{-}$	$\frac{17,9}{-}$	$\frac{31,5}{> 20,0^*}$
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/кг	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/кг	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/кг	Общий азот (N), мг/кг	Сорг, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мг/100 г	SO <sub>3</sub> , мг/100 г
$\frac{656,2}{-}$	$\frac{2,66}{-}$	$\frac{8178,7}{-}$	$\frac{6871,15}{> 2,0^{**}}$	$\frac{17,2}{-}$	$\frac{120,33}{< 0,8^{**}}$	$\frac{26,00}{< 0,5^{**}}$	$\frac{0,4}{< 0,3^{**}}$

\*ГОСТ 33830-2016 «Удобрения органические на основе отходов животноводства»

\*\*ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические, сапропели».

ЗК содержит в себе необходимые макро- и микроэлементы, а также биогенный кальций, необходимые для растений. Проанализировав данные табл. 1, можно сделать вывод, что ЗК по ряду показателей соответствует органическим удобрениям.

Методом электронной микроскопии проведены исследования поверхностной структуры зоокомпоста (рис. 1, а, б), элементный состав определили методом ЭДС-спектроскопии (рис. 1, в, г).



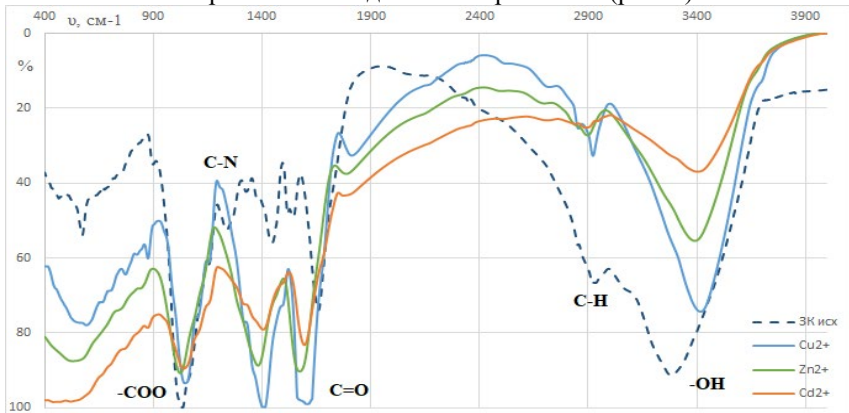
**Рисунок 1** – Микроструктура (а, б), пространственное распределение элементов (в) и элементный состав (г) зоокомпоста (ЭДС-анализ)

На рис. 1 (а, б) представлена структура микрорельефа зоокомпоста, включающего поры, трещины и выемки, формирующие развитую удельную поверхность. Пористая структура ЗК обеспечивает капиллярный эффект, улучшая водоудерживающую способность почвы, а шероховатость частиц усиливает адгезию к почвенным агрегатам. Многослойная карта ЭДС (рис. 1, в) отражает неоднородное распределение элементов в образце. Данные ЭДС-анализа (рис. 1, г) демонстрируют химический состав зоокомпоста с преобладанием углерода (52,6%) и кислорода (39,1%), что характерно для органических материалов с высоким содержанием гуминовых веществ. Наличие калия (2,8%), фосфора (1,1%), серы (0,8%) и азота (1,6%) подтверждает питательную ценность компоста как удобрения.

В составе ЗК содержатся гуминовые кислоты (гумус 31,50%), которые, как известно, способны связывать ионы ТМ в хелатные комплексы. Гуминовые кислоты представляют собой сложные полимеры с разнообразными функциональными группами (ФГ), участвующими в процессах адсорбции, ионного обмена, комплексообразования и хелатирования.

Депротонированная карбоксильная группа ( $-\text{COO}^-$ ) образует ионную связь с  $\text{Me}^{2+}$ , а также может создавать хелатные циклы (если две группы расположены рядом); фенольный кислород ( $-\text{O}^-$ ) образует координационную связь с металлом; кислород карбонильной группы ( $\text{C}=\text{O}$ ) выступает донором электронов, образуя координационный комплекс с  $\text{Me}^{2+}$ ; аминогруппа ( $-\text{NH}_2$ ) связывает металлы через донорно-акцепторное взаимодействие; сера в  $-\text{SH}$  группе образует прочные ковалентные связи с металлами; гидроксильные группы ( $-\text{OH}$ ) участвуют в слабых взаимодействиях, например, через гидратацию ИТМ.

Для определения типа ФГ, а также оценки возможности их взаимодействия с ИТМ был применен метод ИК-спектроскопии (рис. 2).



**Рисунок 2** – ИК-спектр зоокомпоста культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* до (ЗК<sub>исх</sub>) и после очистки от ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$

Исходный спектр ЗК демонстрирует широкий пик в области 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$ , что свидетельствует о наличии гидроксильных групп ( $-\text{OH}$ ), пики в области 2900-2800  $\text{cm}^{-1}$ , связаны с колебаниями метильных и метиленовых групп ( $\text{C}-\text{H}$ ), а также пики в области 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$ , которые могут быть связаны с карбонильными группами ( $\text{C}=\text{O}$ ). Деформационные колебания спиртовых гидроксидов и эфиров отражаются в поглощении при 1000-1300  $\text{cm}^{-1}$ , свидетельствуя о наличии полисахаридных фрагментов.

Анализ ИК-спектров зоокомпоста культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* до (ЗК<sub>исх</sub>) и после очистки от ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  позволяет выявить ключевые особенности их структурных изменений. После очистки от ТМ наблюдается снижение интенсивности или исчезновение не-

которых полос. Например, уменьшение пика в области  $1650 \text{ см}^{-1}$  может свидетельствовать о разрушении или модификации амидных связей, которые могли участвовать в хелатировании ионов металлов. В области  $1300\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$ , связанной с колебаниями карбоксильных групп ( $-\text{COOH}$ ), также присутствуют изменения, что указывает на участие в связывании  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ . Основные пики, такие как полоса  $\text{O-H/N-H}$  и  $\text{C-O}$ , сохраняются, демонстрируя, что структурная основа органической матрицы остается стабильной.

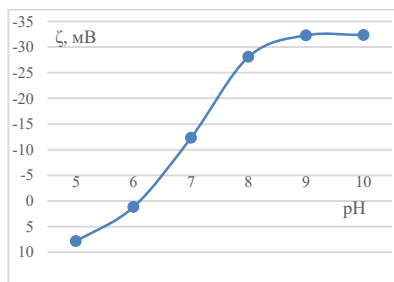
Гуминовые кислоты играют ключевую роль в формировании поверхностного заряда частиц зоокомпоста, что опосредованно влияет на величину  $\zeta$ -потенциала в плоскости скольжения. Эти соединения содержат функциональные группы ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ), способные к диссоциации или протонированию в зависимости от pH среды. Это определяет плотность заряда на поверхности частиц, которая регулирует структуру двойного электрического слоя (ДЭС) и, как следствие, значение  $\zeta$ -потенциала на границе раздела фаз.

Исследована зависимость  $\zeta$ -потенциала от pH среды (рис. 3). Полученные данные свидетельствуют о том, что повышение pH среды вызывает диссоциацию кислотных групп ЗК ( $-\text{COOH} \rightleftharpoons -\text{COO}^- + \text{H}^+$ ), что приводит к увеличению доли отрицательно заряженных участков на поверхности и снижению  $\zeta$ -потенциала на границе раздела фаз. Аминогруппы ЗК, напротив, в кислой среде присоединяют протоны, превращаясь в положительно заряженные ( $-\text{NH}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{R}-\text{NH}_3^+$ ), что вносит вклад в положительный заряд. Точка нулевого заряда ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ ) находится в слабокислой области предположительно в интервале pH 6,2 – 6,5, что обусловлено преобладанием кислых функциональных групп органического вещества.

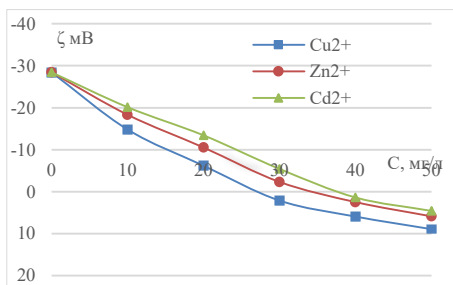
Добавление ЗК (pH 7,57) в системы, содержащие  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$ , создает условия для начала гидратообразования, поскольку pH среды превышает точки начала осаждения гидроксидов:  $\sim 6,2$  для  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\sim 6,4$  для  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\sim 8,2$  для  $\text{Cd}^{2+}$ . Однако полного осаждения не происходит из-за недостаточной величины pH для завершения процесса ( $\text{Cd}(\text{OH})_2 > 9,7$ ;  $\text{Zn}(\text{OH})_2 > 8,0$ ;  $\text{Cu}(\text{OH})_2 > 7,1$ ) и ограниченной буферной емкости системы. Следовательно, гидролиз вносит второстепенный вклад в уменьшение подвижности ИТМ, не обеспечивая полного осаждения.

С целью доказательства предполагаемого механизма процесса, протекающего в модельных растворах ЗК, содержащих ионы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$ , исследовали изменение величины  $\zeta$ -потенциала в растворах с различными концентрациями ионов металлов. Для ЗК культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* значение  $\zeta$ -потенциала равно  $-28,4 \text{ мВ}$  (pH 7,57). Зависимость  $\zeta$ -потенциала частиц системы при изменении концентраций ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  представлена на рис. 4.

При увеличении концентрации ионов кадмия и цинка в растворе до  $30 \text{ мг/дм}^3$  и меди до  $40 \text{ мг/дм}^3$ ,  $\zeta$ -потенциал становится положительным, что можно объяснить образованием прочных комплексных связей между ионами металлов и функциональными группами ЗК.



**Рисунок 3** – Зависимость величины ζ-потенциала от pH среды



**Рисунок 4** – Зависимость величины ζ-потенциала от концентрации ионов Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> и Cd<sup>2+</sup>

Диссоциированные карбоксильные группы (-COO<sup>-</sup>) взаимодействуют с ионами металлов, образуя комплексы и уменьшая долю отрицательно заряженных участков на поверхности частиц:  $Me^{2+} + 2(-COO^{-}) \rightarrow (-COO)_2Me$ . Наиболее значительное влияние на ζ-потенциал оказывают ионы Cu<sup>2+</sup>, что может быть связано с ролью электронной структуры Cu<sup>2+</sup> (d<sup>9</sup>) и подтверждено рядом констант устойчивости комплексов ТМ с ГК (Cu > Zn > Cd).

Ионные связи преимущественно формируются между функциональными группами ГК зоокомпоста и катионами щелочноземельных металлов. Функциональные группы, содержащие свободные электронные пары, способны выступать донорами при связывании с металлами, что позволяет им служить моно-, би- или полидентатными лигандами. С целью выявления роли ионного обмена в процессе сорбции проводили анализ катионного состава водных вытяжек зоокомпоста (табл. 2).

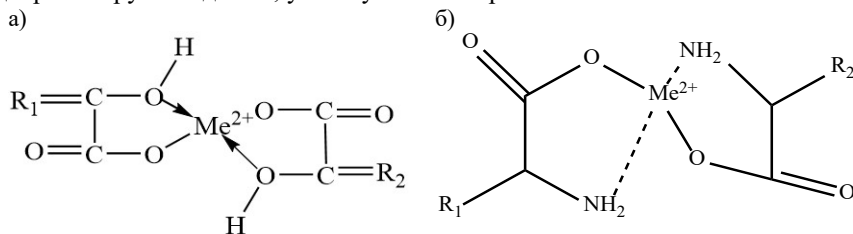
**Таблица 2** – Катионный состав водных вытяжек ЗК

Среда анализа	Катион, ммоль-экв/дм <sup>3</sup>						
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>
H <sub>2</sub> O	1,449	4,821	0,308	0,154	-	-	-
Р-р, содержащий [Cu <sup>2+</sup> ] = 0,79 ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	1,521	5,300	0,339	0,168	0,071	-	-
Р-р, содержащий [Zn <sup>2+</sup> ] = 0,76 ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	1,497	5,133	0,335	0,164	-	0,114	-
Р-р, содержащий [Cd <sup>2+</sup> ] = 0,45 ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	1,481	4,991	0,319	0,159	-	-	0,081

При контакте ЗК с растворами, содержащими Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> или Cd<sup>2+</sup>, наблюдается увеличение концентраций основных катионов (K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) в вытяжке по сравнению с контролем (H<sub>2</sub>O). Это свидетельствует о частичном замещении катионов обменного комплекса ЗК на добавленные ИТМ. Количество сорбированных ионов тяжелых металлов (0,37 – 0,72 ммоль-экв/дм<sup>3</sup>) во всех случаях превышает эквивалентное количество вытесненных в раствор катионов (ΔΣ ≈ 0,22 – 0,60 ммоль-экв/дм<sup>3</sup>). Это доказывает, что значи-

тельная часть фиксации  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  обусловлена специфическим координационным связыванием с функциональными группами ЗК – образованием хелатных комплексов.

Предполагаемое образование хелатного комплекса ИТМ с группами гуминовых кислот (рис. 5) происходит за счёт координационного взаимодействия функциональных групп ГК с катионом металла. В щелочной или нейтральной среде карбоксильные группы ( $-\text{COOH}$ ) ГК теряют протоны, превращаясь в депротонированные карбоксилаты ( $-\text{COO}^-$ ), которые выступают основными центрами связывания. Отрицательно заряженный кислород карбоксильных групп притягивает положительно заряженный ион  $\text{Me}^{2+}$ , образуя ионные и координационные связи. Одновременно фенольные гидроксильные группы ( $-\text{OH}$ ), входящие в состав ароматических фрагментов (Ar) ГК, также депротонируются до  $-\text{O}^-$ , участвуя в хелатировании.



**Рисунок 5** – Образование хелатных комплексов  $\text{Me}^{2+}$ : а – карбоксильной, и б – аминогруппой ГК, где  $\text{R}_1$ ,  $\text{R}_2$  – алифатические или ароматические соединения

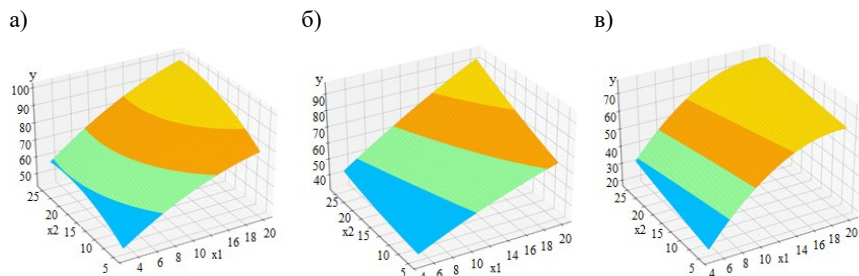
Определены параметры сорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  из модельных растворов зоокомпостом, а также зависимость эффективности очистки этих растворов от температуры раствора, массы сорбента и времени взаимодействия. В результате статистической компьютерной обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие полученные зависимости:

$$Y(\text{Cu}^{2+}) = 7,222 + 3,2072x_1 + 2,0599x_2 + 0,9088x_3 + 0,0259x_1x_2 + 0,0387x_1x_3 - 0,0843x_1^2 - 0,0527x_2^2 - 0,0195x_3^2$$

$$Y(\text{Zn}^{2+}) = 17,588 + 1,9463x_1 - 0,6767x_2 + 0,5520x_3 + 0,0603x_1x_2 + 0,0283x_1x_3 + 0,0178x_2x_3 - 0,0356x_1^2 + 0,0128x_2^2 - 0,0158x_3^2$$

$$Y(\text{Cd}^{2+}) = -25,001 + 8,6436x_1 + 0,4944x_2 + 0,3239x_3 - 0,0161x_1x_2 + 0,0023x_1x_3 + 0,0029x_2x_3 - 0,2235x_1^2 + 0,0037x_2^2 - 0,0047x_3^2$$

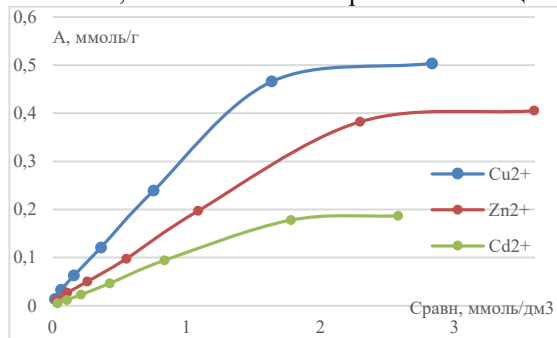
Построены поверхности отклика, позволяющие проанализировать влияние варьируемых факторов на выходной параметр (рис. 6). Анализ относительной важности коэффициентов показал, что основное влияние на эффективность очистки оказывают время взаимодействия ( $X_1$ ) и масса добавки ЗК ( $X_2$ ). Квадратичные эффекты для этих факторов значимы и отрицательны, что свидетельствует о наличии оптимального диапазона значений – дальнейшее увеличение массы или времени сверх определённого уровня не приведет к значительному увеличению эффективности очистки.



**Рисунок 6** – Поверхность отклика регрессионной модели, показывающая зависимость эффективности очистки ( $Y$ , %)  $\text{Cu}^{2+}$  (а),  $\text{Zn}^{2+}$  (б) и  $\text{Cd}^{2+}$  (в) от времени взаимодействия ( $X_1$ , мин) и массы ЗК ( $X_2$ , г/дм<sup>3</sup>), при фиксированной температуре раствора ( $X_3$ , 25 °С)

Фактор температуры раствора ( $X_3$ ) продемонстрировал слабый отрицательный линейный эффект, в то время как его квадратичный вклад и эффекты парных взаимодействий с другими переменными оказались статистически менее значимыми, что позволило отнести этот параметр к второстепенным. В качестве оптимальных параметров процесса сорбции приняты: масса добавки ЗК – 15 г/дм<sup>3</sup>, время взаимодействия – 20 минут, температура раствора 25 °С.

Удельная поверхность зоокомпоста по адсорбции метиленового голубого составляет 152,93 м<sup>2</sup>/г, что подтверждает его развитую структуру и высокий потенциал для применения в качестве сорбента. С целью описания механизма взаимодействия адсорбата с адсорбентом, строились изотермы адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  на поверхности частиц ЗК (рис. 7).



**Рисунок 7** – Изотермы адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  ЗК

Максимальная сорбционная емкость ЗК по ионам  $\text{Cu}^{2+}$  составляет 0,504 ммоль/г, для ионов  $\text{Zn}^{2+}$  0,405 ммоль/г, для ионов  $\text{Cd}^{2+}$  0,187 ммоль/г.

Наибольшая сорбционная емкость наблюдается для ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , что значительно превышает значения для  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$ , это свидетельствует о более эффективном связывании  $\text{Cu}^{2+}$  с функциональными группами ЗК. Полученные данные подтверждаются рядом устойчивости комплексов ГК с металлами:  $\text{Cu}^{2+}$  ( $\log \beta = 8.0\text{--}10.0$ ) >  $\text{Zn}^{2+}$  ( $\log \beta = 5.0\text{--}6.0$ ) >  $\text{Cd}^{2+}$  ( $\log \beta = 4.0\text{--}5.0$ ) и указывают на то, что хелатный эффект и способность к образованию координационных связей играют ключевую роль в процессе сорбции.

Для определения характера адсорбции и изучения механизма взаимодействия между сорбентом и сорбатом экспериментально полученные изотермы были обработаны с использованием классических моделей адсорбции: Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина–Радушкевича. Результаты математической обработки, включая коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) и расчётные константы моделей, приведены в табл. 3.

По своей форме изотермы адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  зоокомпоном близки к I типу по классификации БДДТ, что обычно связывают с мономолекулярной адсорбцией. Однако анализ математической обработки изотерм указывает на заметную гетерогенность сорбционных центров, о чем свидетельствуют самые высокие коэффициенты детерминации модели Фрейндлиха  $\text{Cu}^{2+}$  ( $R^2 = 0,9948$ ),  $\text{Zn}^{2+}$  ( $R^2 = 0,9890$ ),  $\text{Cd}^{2+}$  ( $R^2 = 0,9962$ ). Значения константы интенсивности сорбции ( $n$ ) в модели Фрейндлиха больше 1 для всех ионов ( $\text{Cu}^{2+}$ –2,132,  $\text{Zn}^{2+}$ –1,678,  $\text{Cd}^{2+}$ –1,428), что указывает на благоприятные условия процесса сорбции.

**Таблица 3** – Уравнения регрессии и константы

Модель	Уравнение регрессии	$R^2$
$\text{Cu}^{2+}$		
Ленгмюра	$y = 1,0347 + 0,0434x$ ; $K_L = 23,824$	0,9661
Фрейндлиха	$y = 0,2255 + 0,4691x$ ; $K_F=1,681$ ; $n =2,132$	0,9948
Дубинина– Радушкевича	$y = 1,2511 - 0,1063x$ ; $A_\infty=3,494$ ; $E=7598,597$ Дж/моль	0,9895
$\text{Zn}^{2+}$		
Ленгмюра	$y = 1,387 + 0,113x$ ; $K_L=12,279$	0,9872
Фрейндлиха	$y = 0,1178 + 0,596x$ ; $K_F=1,312$ ; $n=1,678$	0,9890
Дубинина– Радушкевича	$y = 1,5482 - 0,2068x$ ; $A_\infty=4,703$ ; $E=5499,026$ Дж/моль	0,9629
$\text{Cd}^{2+}$		
Ленгмюра	$y = 1,3987 + 0,2152x$ ; $K_L=6,501$	0,9853
Фрейндлиха	$y = 0,0805 + 0,7002x$ ; $K_F=1,204$ ; $n=1,428$	0,9962
Дубинина– Радушкевича	$y = 2,2811 - 0,3507x$ ; $A_\infty=9,787$ ; $E=4183,834$ Дж/моль	0,8940

Константа  $K_L$  в модели Ленгмюра, отражающая энергию взаимодействия сорбат-сорбент, закономерно уменьшается в ряду  $\text{Cu}^{2+}$  ( $K_L=23,824$ ) >  $\text{Zn}^{2+}$  ( $K_L=12,279$ ) >  $\text{Cd}^{2+}$  ( $K_L=6,501$ ), указывая на наибольшую силу связывания ионов меди с поверхностью по сравнению с цинком и кадмием. Эта тенденция подтверждается энергией сорбции  $E$  в модели Дубинина–Радушкевича:  $\text{Cu}^{2+}$  (7598,6 Дж/моль) >  $\text{Zn}^{2+}$  (5499,0 Дж/моль) >  $\text{Cd}^{2+}$  (4183,8 Дж/моль).

Энергия Гиббса  $\Delta G_0$  для данных процессов рассчитана по уравнению:

$$\Delta G_0 = -R \times T \times \ln K_L \quad (1)$$

где  $\Delta G_0$  – энергия Гиббса, кДж/моль; R, T,  $K_L$  – параметры и константы уравнений.

Значения  $\Delta G_0(\text{Cu}^{2+}) = -7,84$  кДж/моль,  $\Delta G_0(\text{Zn}^{2+}) = -6,20$  кДж/моль и  $\Delta G_0(\text{Cd}^{2+}) = -4,62$  кДж/моль свидетельствуют о самопроизвольном протекании процесса сорбции.

Сродство между адсорбатом и адсорбентом оценивалось с использованием параметра уравнения Ленгмюра ( $K_L$ ) по величине безразмерного коэффициента  $R_L$ :

$$R_L = 1 / (1 + K_L \times C_n) \quad (2)$$

где  $C_n$  – начальная концентрация адсорбата, ммоль/дм<sup>3</sup>.

Значения  $R_L$  ( $\text{Cu}^{2+} = 0,051$ ;  $\text{Zn}^{2+} = 0,096$ ;  $\text{Cd}^{2+} = 0,260$ ) находятся в интервале  $0 < R_L < 1$ , что свидетельствует о благоприятных условиях сорбции.

Исследование кинетики адсорбции (табл. 4) включало построение и сравнение четырёх кинетических моделей: внешнедиффузионной, внутридиффузионной, псевдопервого и псевдодвухго порядка. Все модели продемонстрировали высокие коэффициенты аппроксимации ( $R^2 > 0,9$ ), что указывает на их статистическую значимость. Расчёт коэффициента Био ( $0,1 < Bi < 10$ ) подтверждает, что кинетика адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  на зоокомпосте контролируется смешанным диффузионным механизмом.

**Таблица 4** – Коэффициент Био (Bi) и параметры для его расчёта

	$\text{Cu}^{2+}$	$\text{Zn}^{2+}$	$\text{Cd}^{2+}$
Радиус частиц сорбента r (м)	0,00008	0,00008	0,00008
Толщина плёнки раствора вокруг гранул сорбента $\delta$ (см)	0,005	0,005	0,005
Коэффициент распределения $K_p$	2,22	1,49	1,22
Коэффициент внешней диффузии $D_{вн}$	$4,17 \times 10^{-9}$	$3,02 \times 10^{-9}$	$2,16 \times 10^{-9}$
Коэффициент внутренней диффузии $D_i$	$1,40 \times 10^{-11}$	$1,43 \times 10^{-11}$	$1,42 \times 10^{-11}$
Коэффициент Био Bi	2,15	2,26	2,00

**В четвертой главе** исследованы процессы модификации почвенных коллоидных систем под воздействием ЗК на примере модельных почв, содержащих ионы  $\text{Cu}^{2+}$ . Полученные результаты показывают, что содержание меди в зеленой массе растений при внесении 10% ЗК снизилось с  $1921 \pm 385$  мкг/кг до  $208 \pm 52$  мкг/кг, что составляет 89,17%, при добавке 2,5% ЗК снижение составило 82,87% (табл. 5). Данный эффект объясняется образованием прочных хелатных комплексов между ионами  $\text{Cu}^{2+}$  и функциональными группами гуминовых веществ ЗК.

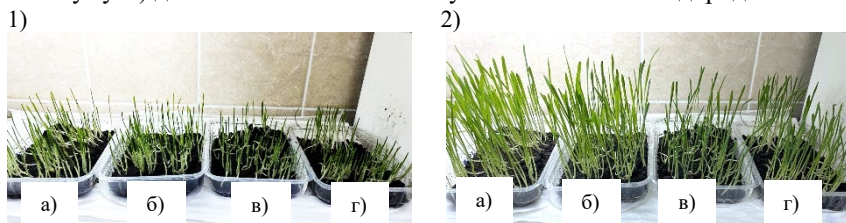
**Таблица 5** – Содержание  $\text{Cu}^{2+}$  в зеленой массе при различной дозе ЗК

Содержание ЗК в почве, %	10%	5%	2,5%	0%
Содержание $\text{Cu}^{2+}$ , мкг/кг	$208 \pm 52$	$263 \pm 62$	$329 \pm 82$	$1921 \pm 385$

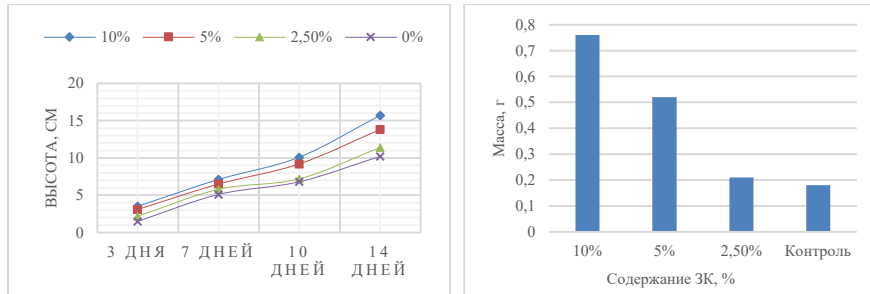
Изотерма десорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  с зоокомпоста показала, что высвобождается ~ 6,6% (при pH 7,5) от сорбированного количества ( $0,03336$  ммоль/г из  $0,5035$  ммоль/г), что свидетельствует о преимущественно необратимом и

прочном связывании меди активными центрами зоокомпоста. Внесение зоокомпоста в дозе 15 г/дм<sup>3</sup> увеличило буферную емкость почвы на 27,3% (с 17,41 до 22,17 ммоль-экв/100 г) по сравнению с контролем, что объясняется ростом содержания органического вещества.

Влияние ЗК на биологические объекты оценивалось с использованием тест-культуры *Avena sativa* (рис. 8). Эксперименты показали (рис. 9), что при содержании 10% ЗК наблюдается значительное увеличение энергии прорастания семян по сравнению с контролем: на 7 сутки всхожесть составила 64% (против 8% в контроле), на 14 сутки - 67% (против 10%). Улучшение агрохимических показателей почвы (повышение содержания калия, кальция, магния и гумуса) дополнительно способствует повышению плодородия.



**Рисунок 8** – Всхожесть семян *Avena sativa* через 7 (1) и 14 (2) дней на почвах загрязненных ионами  $\text{Cu}^{2+}$  в присутствии различных дозровок ЗК: а) – 10%, б) – 5%, в) – 2,5%, г) – 0%

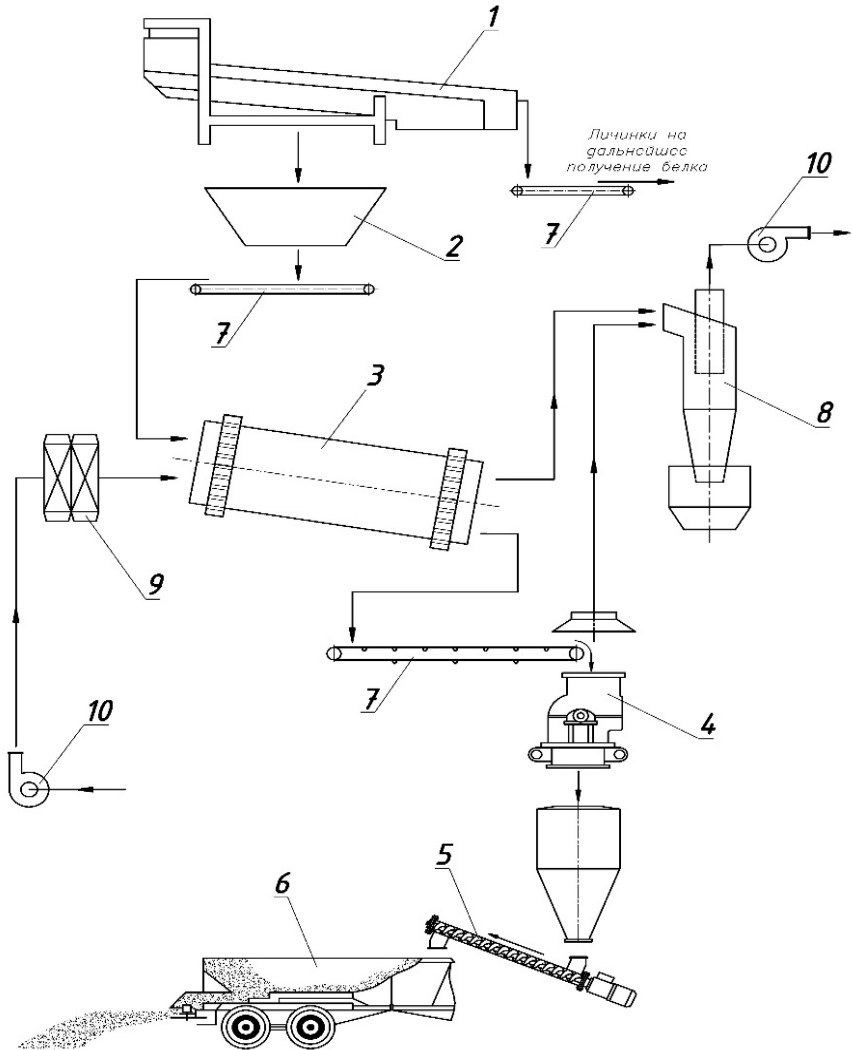


**Рисунок 9** – Зависимость высоты (а) и зеленой массы (б) *Avena sativa* от дозы добавки ЗК

Экономическая оценка показала, что использование ЗК предотвращает экологический ущерб в 1,06 млн руб./га за счет снижения токсичности, деградации почв и утилизации отходов биотехнологий. Эти расчеты демонстрируют, что ЗК не только нейтрализует токсичное воздействие металлов за счет коллоидно-химических механизмов, но и трансформирует органические отходы в ценный ресурс, исключая необходимость их захоронения.

На основании созданных искусственных почвосмесей из ЗК промышленного культивирования мухи *Hermetia illucens* получен патент на изобретение

(№ 2733662 С1 РФ). Принципиальная технологическая схема процесса подготовки и внесения зоокомпоста промышленного культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* в загрязненные почвы представлена на рисунке 10.



**Рисунок 10** – Принципиальная технологическая схема процесса подготовки и внесения зоокомпоста культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* в загрязненные почвы: 1 – вибросито, 2 – бункер ЗК, 3 – барабанная сушилка, 4 – молотковая дробилка, 5 – бункер со шнековым транспортером, 6 – разбрасыватель кузовного типа, 7 – ленточный конвейер (3 шт.), 8 – циклон пылеуловитель, 9 – калорифер, 10 – вентилятор (2 шт.)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность стабилизации ионов тяжелых металлов отходом промышленного культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* – зоокомпостом. Установлено наличие в составе зоокомпоста гидроксильных (–ОН), карбоксильных (–СООН) и аминогрупп, обеспечивающих взаимодействие с ИТМ с образованием прочных хелатных комплексов. Использование зоокомпоста в качестве сорбционного материала позволяет одновременно решать проблему утилизации данного отхода и снижать экотоксичность ионов тяжелых металлов в почвах.

Методом ИК-спектроскопии выявлено содержание в ЗК разнообразных функциональных групп, влияющих на процесс связывания ИТМ в малорастворимые комплексы. Отрицательное значение  $\zeta$ -потенциала ЗК (-28,4 мВ) влияет на его сорбционные и ионообменные свойства. При повышении рН диссоциация карбоксильных (–СООН) и гидроксильных (–ОН) групп усиливает отрицательный заряд поверхности ЗК, тогда как в кислой среде аминогруппы (–NH<sub>2</sub>) протонируются, создавая локальные положительные участки. Повышение концентрации ИТМ в растворе вызывает как сжатие ДЭС за счет роста ионной силы, так и специфическую адсорбцию катионов, приводящую к перезарядке поверхности и смене знака  $\zeta$ -потенциала. Подтверждено, что добавление ионов Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> и Cd<sup>2+</sup> в концентрациях (30–40 мг/дм<sup>3</sup>) инвертирует  $\zeta$ -потенциал ЗК с отрицательного (-28,4 мВ при рН 8,1) на положительный (7,9 мВ при рН 5,0), что объясняется образованием устойчивых хелатных комплексов.

Определены оптимальные параметры процессов сорбции ТМ из модельных растворов зоокомпостом (масса добавки ЗК – 15 г/дм<sup>3</sup>, время взаимодействия – 20 мин, температура раствора 25 °С), получены уравнения регрессии, адекватно описывающие данные зависимости. При внесении Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> и Cd<sup>2+</sup> наблюдается снижение концентраций катионов (K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) в растворе ЗК по сравнению с контролем, количество вытесненных катионов ( $\Sigma \Delta K^+ + Na^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}$ ) значительно меньше количества сорбированных ИТМ, что подтверждает вторичность механизма ионного обмена в процессе извлечения ИТМ.

Максимальная сорбционная емкость ЗК по отношению к ионам Cu<sup>2+</sup> составляет 0,504 ммоль/г, Zn<sup>2+</sup> – 0,405 ммоль/г и Cd<sup>2+</sup> – 0,187 ммоль/г соответственно, удельная поверхность ЗК составляет 152,93 м<sup>2</sup>/г. Обработка экспериментальных данных с помощью уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина–Радушкевича позволила вычислить коэффициенты, характеризующие параметры сорбции. Рассчитанные значения энергии Гиббса  $\Delta G_0$  отрицательны, что свидетельствует о самопроизвольном протекании процесса адсорбции. Коэффициент R<sub>L</sub>, рассчитанный с использованием параметра уравнения Ленгмюра K<sub>L</sub> (Cu<sup>2+</sup>=0,051; Zn<sup>2+</sup>=0,096; Cd<sup>2+</sup>=0,260), указывает на благоприятные условия сорбции и практически необратимый процесс.

На модельных почвах, загрязненных ионами меди  $\text{Cu}^{2+}$ , изучено влияние ЗК на всхожесть, высоту и массу стеблей *Avena sativa*, а также содержание меди в зеленой массе. Высота зеленой части при добавлении 10% ЗК увеличилась на 35%, зеленая масса – на 76,32%. Полученные результаты атомно-абсорбционной спектроскопии зеленой массы указывают на то, что ЗК не только улучшает прорастание и рост *Avena sativa*, но и способствует снижению содержания меди в зеленой массе на 89,17% при добавке ЗК 10% в почвосмеси.

Анализ изотермы десорбции показал, что с поверхности насыщенного зоокомпоста высвобождается лишь около 6,6% (при pH 7,5) связанных ионов  $\text{Cu}^{2+}$  (0,03336 ммоль/г от максимальной сорбционной ёмкости 0,5035 ммоль/г), что свидетельствует о прочном и преимущественно необратимом характере их связывания с сорбентом. Внесение ЗК в дозе 15 г/дм<sup>3</sup> способствует увеличению буферной емкости почвы на 27,3% (с 17,41 до 22,17 ммоль-экв/100 г) по сравнению с контролем.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, 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».

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

### **СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ**

1. *Свергузова, С.В.* Ремедиация почв, загрязненных ионами  $\text{Cd}^{2+}$ , зоокомпостом после культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* / С.В. Свергузова, И.Г. Шайхiev, Е.А. Пендюрин, Ж.А. Сапронова, **И.В. Бомба** // *Chemical Bulletin*. – 2021. – Т. 4, № 3. – С. 34–45. (СА(pt)).

2. *Свергузова, С.В.* Сорбционная активность зоокомпоста по отношению к ионам меди  $\text{Cu(II)}$  / С.В. Свергузова, И.Г. Шайхiev, Ж.А. Сапронова, **И.В. Бомба**, С.Е. Спесивцева // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2023. – Т. 23, № 6. – С. 1051–1059. (СА(pt)).

3. *Пендюрин, Е.А.* Зоокомпост - решение проблемы органических отходов и материал для ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами / Е.А. Пендюрин, Л.М. Смоленская, Ж.А. Сапронова, **И.В. Бомба** // *Агрохимия*. – 2024. – № 2. – С. 79–83. (СА(pt)).

**В изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus**

4. *Sverguzova, S.V.* Sorption Extraction of  $Zn^{2+}$  Ions from Aqueous Environment with Zoo Compost of Black Soldier Fly / S.V. Sverguzova, **I.V. Bomba**, E.A. Pendyurin // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 147. – P. 337–343 (*Scopus Q4*).

**В иных рецензируемых научных изданиях**

5. *Сапронова, Ж.А.* Влияние водных вытяжек зоокомпоста личинок *Hermetia illucens* на прорастание пшеницы / Ж.А. Сапронова, С.В. Свергузова, И.Г. Шайхиев, **И.В. Бомба** // Sciences of Europe. – 2021. – № 71–1(71). – С. 13–18.

6. *Свергузова, С.В.* Сравнение сорбционных свойств зоокомпоста по отношению к ионам  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  / С.В. Свергузова, **И.В. Бомба**, Ж.А. Сапронова // XXI век. Техносферная безопасность. – 2024. – Т. 9, № 2(34). – С. 152–160.

**В сборниках трудов конференций**

7. *Свергузова, С.В.* Адсорбция красителя «Бриллиантовый зеленый» зоокомпостом от культивирования личинок мухи «Черная львинка» (*Hermetia illucens*) / С.В. Свергузова, И. Г. Шайхиев, Р.Р. Гафаров, Е.С. Иевлева, **И.В. Бомба** // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: сборник докладов. Международная научная конференция, Алушта-Белгород, 01–05 июня 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 51–56.

8. *Бомба, И.В.* Использование зоокомпоста от культивирования личинок мухи «Черная львинка» для извлечения ионов  $Cu^{2+}$  из водных сред / **И.В. Бомба**, С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, И.Г. Шайхиев // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: сборник докладов. Международная научная конференция, Алушта-Белгород, 01–05 июня 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 277–280.

9. *Сапронова, Ж. А.* Зоокомпост личинок мухи *Hermetia illucens* как перспективный материал для поддержания плодородия в почвах / Ж.А. Сапронова, **И.В. Бомба** // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: сборник докладов. Международная научная конференция, Алушта-Белгород, 01–05 июня 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 332–335.

10. **Бомба, И.В.** Очистка маслосодержащих сточных вод производства липидного концентрата из личинок мухи *Hermetia illucens* / **И.В. Бомба**, Е.С. Антюфеева, Е.М. Георгиева // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 11–15 октября

2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 76–82.

11. **Бомба, И.В.** Использование зоокомпоста от культивирования личинок мухи «Черная львинка» для извлечения ионов железа из водных сред / **И.В. Бомба**, Е.С. Антюфеева, А.В. Матушкина // Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1325–1330.

12. **Кирюшина, Н.Ю.** Использование зоокомпоста от культивирования личинок мухи «Черная львинка» для извлечения ионов  $\text{Cu}^{2+}$  из водных сред / Н.Ю. Кирюшина, **И.В. Бомба**, С.С. Омелянова // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 04–08 октября 2022 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 251–255.

13. **Бомба, И.В.** Исследование токсического действия ЗК культивирования мухи «Черная львинка» на *Daphnia magna* / **И.В. Бомба**, С.В. Свергузова, В.И. Михнев // Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов, Казань, 21–22 марта 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 574–578.

#### ***Объекты интеллектуальной собственности***

14. **Пат. 2733662 С1 РФ.** Искусственная почвосмесь на основе биокомпоста Черной Львинки / Е.А. Пендюрин, **И.В. Бомба**, М.И. Василенко [и др.]. Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2020113764; заявл. 03.04.2020; опубл. 06.10.2020. – 6 с.

**БОМБА ИЛЬЯ ВАСИЛЬЕВИЧ**

**КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С  
ЗООКОМПОСТОМ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ЛИЧИНОК МУХИ  
*HERMETIA ILLUCENS***

1.4.10. Коллоидная химия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.04.2026.  
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,28. Тираж 100 экз. Заказ № 38

Отпечатано в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова.  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46