

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидат технических наук (специальность 02.00.11 – Коллоидная химия и физико-химическая механика), доцента

**Воловичевой Натальи Александровны**

на диссертационную работу **Бомбы Ильи Васильевича**

**«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 диссертационной работы** заключается в том, что изучение коллоидно-химических особенностей взаимодействия органических материалов с ионами тяжелых металлов в почвенных системах приобретает всё большее значение в контексте обеспечения экологической устойчивости и разработки эффективных технологий обращения с отходами. 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.

Снижение подвижности ионов тяжёлых металлов в почвах достигается, главным образом, за счёт их перевода в труднорастворимые комплексы, что реализуется через механизмы хелатирования, ионного обмена и поверхностной адсорбции на границе раздела фаз дисперсной системы. Перспективным направлением в этой области является применение органических сорбентов, содержащих гуминовые кислоты, которые благодаря наличию карбоксильных, гидроксильных и аминогрупп выступают в качестве полидентатных лигандов, формирующих устойчивые металл-органические соединения.

В качестве такого материала может рассматриваться зоокомпост, образующийся при промышленном культивировании личинок мухи *Hermetia illucens*. В связи с этим установление закономерностей коллоидно-химического взаимодействия зоокомпоста с ионами тяжёлых металлов и оценка его детоксицирующей способности в почвенных коллоидно-дисперсных системах представляют собой актуальную научную задачу.

**Высокая степень обоснованности научных положений и выводов,** представленных в диссертационной работе Бомбы И.В., обусловлена тщательным анализом научных публикаций и патентной документации, охватывающей фундаментальные вопросы коллоидной химии природных дисперсных систем, механизмы комплексообразования гуминовых веществ с катионами металлов, а также современные подходы к оценке подвижности тяжёлых металлов в почвах.

Экспериментальная часть исследования выполнена с привлечением широкого спектра современных физико-химических методов, включая растровую электронную микроскопию, ИК-спектроскопию, рентгенофазовый анализ, капиллярный электрофорез, атомно-абсорбционную спектрометрию и фотоэлектроколориметрию. Полученные экспериментальные данные подвергнуты статистической обработке с применением методов регрессионного анализа и математического планирования эксперимента. Обоснованность научных положений, выводов и практических рекомендаций, содержащихся в работе, является убедительной и не вызывает сомнений.

**Достоверность полученных в диссертационной работе результатов** обеспечена применением стандартизованных методик измерений, использованием современного аналитического оборудования и высокой воспроизводимостью экспериментальных данных.

**Научная новизна работы** состоит в установлении коллоидно-химических закономерностей снижения подвижности ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  в почвенных системах, обусловленных образованием хелатных комплексов с гидроксильными и карбоксильными 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.

**Научная значимость** диссертационного исследования Бомбы И.В. определяется тем, что в работе на основе комплексного подхода обоснована и экспериментально верифицирована способность зоокомпоста – побочного продукта промышленного разведения личинок *Hermetia illucens* – выступать в роли эффективного сорбента для иммобилизации ионов тяжёлых металлов в загрязнённых почвенных коллоидных системах. Автором детально охарактеризованы коллоидно-химические характеристики зоокомпоста, влияющие на процесс связывания поллютантов, доказано наличие в его составе гуминовых кислот и предложена предполагаемая схема образования хелатного комплекса с ионами тяжёлых металлов. Показано, что функциональные группы зоокомпоста, а также отрицательное значение  $\zeta$ -потенциала играют определяющую роль в сорбционных процессах.

**Практическую значимость** работы подтверждают установленные рациональные параметры процесса извлечения ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  из модельных растворов: доза зоокомпоста 15 г/дм<sup>3</sup>, время контакта 20 минут, температура 25 °С. Разработан состав почвосмесей на основе зоокомпоста, новизна которого защищена патентом РФ на изобретение № 2733662. **Достоверность и эффективность предлагаемого технологического решения** подтверждена актами полупромышленных испытаний, проведённых на производственных площадках ООО «БИ-ОРЕСУРС» и ООО «ЮЮБА». Материалы диссертационного исследования интегрированы в образовательные программы БГТУ им. В.Г. Шухова. Величина предотвращённого эколого-экономического ущерба, оценённая на уровне порядка 1,06 млн руб./га, свидетельствует об экономической оправданности внедрения разработанного подхода.

**Анализ содержания диссертационной работы** показывает, что исследование Бомбы Ильи Васильевича направлено на решение конкретной научной задачи, выполнено на высоком научно-методическом уровне и вносит заметный вклад в развитие коллоидной химии природных дисперсных систем, а также в решение задач экологической безопасности. Работа представляет собой целостный и завершённый научный труд, оформленный в соответствии с установленными требованиями ВАК РФ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 164 наименования, и четырёх приложений. Результаты изложены на 170 страницах машинописного текста, содержат 24 таблицы и 68 рисунков. Структура работы логична и соответствует поставленным задачам, а содержание глав отражает последовательность их решения.

**Полнота представления результатов диссертации в научных публикациях** подтверждается тем, что основные научные положения и выводы исследования в полной мере доведены до научной общественности. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий из международных реферативных баз данных, рекомендованных ВАК РФ; 1 публикация в издании, индексируемом в международных базах данных Scopus и Web of Science. Кроме того, получен 1 патент Российской Федерации на изобретение. Результаты работы прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание, включая актуальность, цель и задачи, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию, положения, выносимые на защиту, и заключение. Материал в автореферате изложен в достаточном объёме и проиллюстрирован необходимым количеством графиков и таблиц, позволяющих составить полное представление о выполненной работе.

### **Замечания и недостатки диссертационного исследования**

1. При интерпретации изотерм адсорбции автор использует модели Ленгмюра и Фрейндлиха, которые описывают принципиально разные типы поверхностей – энергетически однородную и гетерогенную соответственно. Хотя в работе отмечено, что наилучшее соответствие даёт модель Фрейндлиха, не приведён детальный анализ того, какой вклад в наблюдаемую гетерогенность вносят различные функциональные группы гуминовых кислот зоокомпоста.

2. Отсутствуют данные о распределении пор по размерам в структуре зоокомпоста, полученные, например, методом низкотемпературной адсорбции азота, что не позволяет в полной мере охарактеризовать пористую структуру сорбента и оценить вклад микропор в общую сорбционную ёмкость.

3. В диссертации не рассмотрено влияние растворённого органического вещества, переходящего из зоокомпоста в водную фазу, на процессы комплексообразования и миграции тяжёлых металлов, что имеет прямое значение при оценке риска вторичного загрязнения.

4. Не исследована десорбция ионов  $Zn^{2+}$  и  $Cd^{2+}$ , аналогично проведённому исследованию для  $Cu^{2+}$  в разделе 5.2, что не позволяет в полной мере оценить прочность связывания всех изученных металлов.

5. В диссертационной работе не исследовано пролонгированное влияние зоокомпоста, связавшего ионы тяжёлых металлов, в различных почвенно-климатических условиях. Не изучено, как со временем деструкция органической матрицы, изменения pH и окислительно-восстановительного режима могут повлиять на прочность закрепления металлов и риск их ремобилизации.

Указанные замечания не имеют принципиального характера, не затрагивают основных научных положений и выводов диссертации и не снижают общей высокой положительной оценки выполненного исследования.

### Заключение

Диссертационное исследование Бомбы Ильи Васильевича «Коллоидно-химические особенности взаимодействия ионов тяжелых металлов с зоокомпостом культивирования личинок мухи *Hermetia illucens*» представляет собой самостоятельно выполненную, целостную и завершённую научно-квалификационную работу, посвящённую актуальной теме. В диссертации решена научная задача, состоящая в установлении коллоидно-химических закономерностей иммобилизации ионов тяжёлых металлов с помощью зоокомпоста и создании на этой основе способа снижения их подвижности в почвенных средах. Решение данной задачи вносит заметный вклад в развитие соответствующего направления коллоидной химии и укрепление экологической безопасности. Представленные в работе научные результаты, выводы и практические рекомендации отличаются новизной, а также обладают выраженной теоретической и прикладной значимостью.

Диссертационная работа и автореферат написаны автором самостоятельно, грамотным научным языком, обладают внутренним единством, оформлены в соответствии с требованиями ВАК РФ. Содержание автореферата в полной мере соответствует основным положениям и выводам диссертационного исследования.

Принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что диссертационная работа «Коллоидно-химические особенности взаимодействия ионов тяжелых металлов с зоокомпостом культивирования личинок мухи *Hermetia illucens*» соответствует критериям пп. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции) для кандидатских диссертаций, а её автор, Бомба Илья Васильевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 1.4.10. Коллоидная химия.

**Официальный оппонент:**

Кандидат технических наук  
(специальность 02.00.11 – Коллоидная химия и физико-химическая механика),  
доцент, доцент кафедры общей химии  
ФГАОУ ВО «Белгородский  
государственный национальный  
исследовательский университет»

«29» апреля 2026 г.

  
Воловичева  
Наталья Александровна

**Адрес организации:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, корп. 17.

**Телефон:** +7 (4722) 301276

**E-mail:** [volovichева@bsuedu.ru](mailto:volovichева@bsuedu.ru)

Подпись канд. техн. наук, доц. Воловичевой Н.А. заверяю:

Личную подпись удостоверяю Специлист отдела кадрового обеспечения Управления организационного и и кадрового обеспечения	Воловичевой Н.А.
	И.С. Чернов
	29 » 04 2026 г.

