

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора химических наук, профессора
Тунаковой Юлии Алексеевны
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

В результате ознакомления с диссертационной работой, авторефератом и опубликованными работами по теме диссертации было отмечено следующее:

1. Актуальность темы диссертации

Коллоидно-химические аспекты взаимодействия органических отходов с ионами тяжелых металлов в почвенных системах имеют особую значимость в контексте разработки эффективных методов экологической ремедиации. Подвижные формы тяжелых металлов, обладая высокой биохимической активностью, способны накапливаться в биологических средах и в отличие от органических загрязнителей, тяжелые металлы не подвергаются деструкции, а лишь перераспределяются между компонентами экосистемы, что обуславливает необходимость поиска эффективных и экономически доступных методов снижения их подвижности.

Одним из перспективных направлений является использование органических сорбционных материалов, содержащих гуминовые вещества, способные к образованию прочных хелатных комплексов с катионами металлов. В качестве такого материала может выступать зоокомпост, образующийся при промышленном культивировании личинок мухи *Hermetia illucens*. Установление коллоидно-химических закономерностей взаимодействия данного отхода с ионами тяжелых металлов и оценка возможности его применения для иммобилизации поллютантов в почвенных системах представляют собой актуальную научную задачу, решение которой имеет важное значение для развития технологий ремедиации загрязненных территорий и утилизации органических отходов.

2. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе Бомбы И.В., базируются на всестороннем анализе литературных источников, охватывающих фундаментальные аспекты

коллоидной химии природных дисперсных систем, механизмы взаимодействия гуминовых веществ с ионами металлов, а также современные представления о миграции и трансформации тяжелых металлов в почвах.

Экспериментальная часть работы выполнена с применением комплекса современных физико-химических методов исследования, включая электронную микроскопию, ИК-спектроскопию, рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ, капиллярный электрофорез и атомно-абсорбционную спектрометрию. Выводы по каждой главе и общее заключение логически вытекают из полученных экспериментальных данных и не противоречат современным теоретическим представлениям коллоидной химии. Статистическая обработка результатов с использованием методов регрессионного анализа и математического планирования эксперимента подтверждает достоверность установленных закономерностей. Поэтому обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, не вызывает сомнений.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартизированных и аттестованных методик измерений, проведением экспериментов на современном оборудовании, а также хорошей воспроизводимостью экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в установлении коллоидно-химических закономерностей снижения подвижности ионов тяжелых металлов в загрязненных почвенных коллоидных системах, обусловленных комплексообразованием катионов Cu^{2+} , Zn^{2+} и Cd^{2+} с функциональными группами гуминовых кислот зоокомпоста. Автором 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. Автором установлены зависимости сорбционной емкости зоокомпоста от природы иона тяжелого 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.

Доказано, что внесение зоокомпоста в модельные почвы, загрязненные ионами Cu^{2+} , приводит к снижению содержания меди в тест-растении до 90%, а также способствует повышению буферной емкости почвы на 27% относительно контроля. Установлено, что доля десорбированных ионов Cu^{2+} не превышает 7% от общего количества связанного металла, что свидетельствует о высокой прочности иммобилизации.

4. Значимость результатов для науки и практики

Научная ценность диссертационного исследования Бомбы И.В. заключается в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении эффективности применения зоокомпоста – отхода промышленного культивирования личинок *Hermetia illucens* – в качестве сорбционного материала для иммобилизации ионов тяжелых металлов в загрязненных почвах. Автором выявлены закономерности коллоидно-химического взаимодействия зоокомпоста с модельными растворами, содержащими ионы Cu^{2+} , Zn^{2+} и Cd^{2+} , доказано наличие гуминовых кислот в составе материала и предложена схема образования хелатного комплекса. Показано влияние функциональных групп ЗК ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$) на его сорбционные свойства, отрицательное значение ζ -потенциала ЗК (-28,4 мВ) способствует образованию комплексов с ИТМ.

Практическую значимость работы подтверждают определенные рациональные параметры процесса извлечения ионов тяжелых металлов из модельных растворов: масса добавки зоокомпоста 15 г/дм³, время взаимодействия 20 минут, температура среды 25 °С. Разработан состав почвосмесей на основе зоокомпоста, защищенный патентом РФ на изобретение № 2733662. Проведены полупромышленные испытания технологии на площадках ООО «БИ-ОРЕСУРС» и ООО «ЮЮБА», результаты которых подтверждены соответствующими актами. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке обучающихся по направлениям «Техносферная безопасность» и «Природообустройство и водопользование».

5. Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа Бомбы Ильи Васильевича посвящена решению актуальной научной задачи, выполнена на высоком научном уровне и имеет значение для развития коллоидной химии природных дисперсных систем и экологической безопасности. Работа представляет собой логически завершенное исследование, оформленное в соответствии с требованиями ВАК РФ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 164 наименования, и четырех приложений. Результаты изложены на 170 страницах машинописного текста, содержат 24 таблицы и 68 рисунков. Содержание глав соответствует поставленным задачам и отражает последовательность их решения – от анализа физико-химических основ иммобилизации тяжелых металлов до разработки технологической схемы и оценки эколого-экономической эффективности.

6. Подтверждение основных результатов диссертации в опубликованных научных изданиях

Основные научные результаты диссертационного исследования в полной мере представлены научной общественности и профильным специалистам. 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.

7. Соответствие содержания автореферата идеям и выводам диссертации

Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы, включая актуальность, цель и задачи исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию, основные положения, выносимые на защиту, и заключение. Материал изложен в достаточном объеме и проиллюстрирован необходимым количеством графиков и таблиц.

8. Замечания и недостатки диссертационного исследования

1. В разделе 4.2 при анализе изотерм адсорбции автор использует как модель Ленгмюра, так и модель Фрейндлиха, причём для обеих получены высокие значения коэффициентов детерминации. С точки зрения коллоидной химии эти модели описывают принципиально разные типы поверхностей – энергетически однородную и гетерогенную. Не ясно какая модель более обоснована для описания адсорбции на зоокомпосте.

2. При расчёте энергии сорбции по модели Дубинина–Радушкевича были получены значения в диапазоне 4–7 кДж/моль, что формально соответствует физической адсорбции, тогда как другие методы (ИК-спектроскопия, изменение ζ -потенциала) указывают на хемосорбцию.

3. В разделе 4.5 при анализе лимитирующей стадии кинетики адсорбции не использовалась модель Еловича, которая часто применяется для описания хемосорбции на гетерогенных поверхностях и могла бы дать дополнительную информацию о распределении энергий активации процесса.

4. В разделе 5.6 выполнен расчет предотвращенного эколого-экономического ущерба с использованием коэффициента, учитывающего наличие трех загрязнителей, однако в работе не обсуждено различие классов опасности кадмия, меди и цинка, что могло бы повлиять на итоговую величину ущерба в рамках действующих методик оценки вреда почвам.

5. При описании методики определения удельной поверхности по адсорбции метиленового голубого автор указывает значение рН 2–3, но не приводит сведений о способе контроля кислотности и погрешности визуальной фиксации конечной точки титрования, что снижает воспроизводимость методики.

6. На ряде графиков, иллюстрирующих эффективность очистки и кинетические кривые, не обозначены доверительные интервалы или планки погрешностей, что затрудняет визуальную оценку воспроизводимости представленных данных.

7. В тексте диссертации встречаются незначительные опечатки редакционного характера. Так, в подрисуночной подписи к рисунку 4.5 вместо обозначения «а — с карбоксильной, и б — аминогруппой ГК» указано «а — с карбоксильной, и в — аминогруппой ГК».

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

9. Заключение

Считаю, что диссертационная работа Бомбы Ильи Васильевича «Коллоидно-химические особенности взаимодействия ионов тяжелых металлов с зоокомпостом культивирования личинок мухи *Hermetia illucens*» представляет собой самостоятельно выполненную, завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой содержится решение научной задачи по установлению коллоидно-химических закономерностей иммобилизации ионов тяжелых металлов зоокомпостом и разработке на этой основе способа снижения их подвижности в почвенных системах. Вышеуказанная задача имеет значение для развития соответствующей области коллоидной химии в экологии. Представленные в

диссертации научные результаты, выводы и рекомендации отличаются новизной, а также теоретической и практической значимостью.

Диссертация и автореферат написаны автором самостоятельно, грамотным техническим языком, обладают внутренним единством, оформлены в соответствии с требованиями ВАК РФ. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В связи с вышеизложенным 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 ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции) для кандидатских диссертаций, а ее автор, Бомба Илья Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.4.10. Коллоидная химия.

Официальный оппонент:

Доктор химических наук
(специальность 03.00.16 – Экология),
профессор, заведующий кафедрой
общей химии и экологии ФГБОУ ВО
«Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»



Тунакова
Юлия Алексеевна

« 5 » мае 2026 г

Адрес: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10

Телефон: +7 (843) 231-02-62

E-mail: juliaprof@mail.ru

Подпись Тунаковой Ю. А.
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля

