



«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. ректора РХТУ им Д.И. Менделеева
д-р.н., профессор Е.В. Румянцев

«23» _____ 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Локализация иода-129 в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов бентонитами, модифицированными соединениями серебра» по научной специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов (химические науки) выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» на кафедре химии высоких энергий и радиозэкологии.

В процессе подготовки диссертации Прядко Артем Викторович, «14» июня 1995 года рождения, был аспирантом кафедры химии высоких энергий и радиозэкологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» с 2019 г. по 2023 г.

В настоящее время работает ассистентом кафедры химии высоких энергий и радиозэкологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Диплом об окончании аспирантуры выдан в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в 2023 году.

Научный руководитель – кандидат технических наук по специальности 05.17.01 – Технология неорганических веществ, доцент, доцент кафедры химии высоких энергий и радиозэкологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» Тюпина Екатерина Александровна.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Локализация иода-129 в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов бентонитами, модифицированными соединениями серебра» принято следующее заключение.

Актуальность темы. Радиоактивный иод является одним из основных продуктов деления ^{235}U и входит в состав радиоактивных отходов (РАО) 1 и 2 классов (высокоактивных и долгоживущих среднеактивных отходов). Он представляет большую опасность для человека и остальной биосферы ввиду его органотропности и высокой подвижности в окружающей среде. Иммобилизация радиоиода происходит в формах иодид-анионов I^- и иодат-

анионов IO_3^- , в этих же формах возможна его миграция в окружающей среде. Для захоронения РАО 1 и 2 класса в настоящее время в Российской Федерации идёт проектирование пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) на участке «Енисейский» (Красноярский край), ключевым изоляционным элементом которого являются инженерные барьеры безопасности (ИББ) на основе бентонитовых глин. Благодаря высокой способности бентонитов к катионному обмену и низкой водопроницаемости, такие барьеры будут надёжно удерживать большинство радионуклидов в пределах хранилищ. Однако бентонитовые барьеры не препятствуют миграции радиоактивного иода, представленного анионными формами. Таким образом, включение в состав ИББ некоторого количества материала, обладающего сорбционными свойствами по отношению к анионам иода, позволит решить проблему локализации радиоиода в пределах ПГЗРО на участке «Енисейский» и обеспечить его безопасность для человека и окружающей среды. Анализ литературных источников показывает, что для предотвращения миграции радиоиода за пределы ПГЗРО чаще рассматриваются сорбенты, содержащие Ag, Cu(I), Pb, Hg и Tl, фиксация иода на которых происходит за счёт образования нерастворимых иодидов и иодатов. При этом материалы с развитой поверхностью, модифицированные нерастворимыми соединениями серебра, такими как Ag, Ag_2O и AgCl , характеризуются как наиболее высокой селективностью и необратимостью фиксации анионов иода ввиду наиболее низкой растворимости AgI и AgIO_3 , так и наибольшей устойчивостью серебра к воздействию агрессивных сред, поэтому данные сорбенты представляют наибольший интерес.

Научная новизна.

1. Разработаны новые методы модифицирования бентонитов Ag, Ag_2O и AgCl , не требующие применения опасных реагентов и специфических реакций в отличие от представленных в литературных источниках.
2. Впервые определены сорбционные характеристики бентонитов, модифицированных Ag, Ag_2O и AgCl , по отношению к анионным формам иода в водных средах различного химического состава.
3. Показана устойчивость Ag и AgCl в составе модифицированного бентонита к вымыванию в растворах с ионной силой 0 – 3 моль/л и pH 7 – 12,4.
4. Впервые установлены закономерности распределения Ag и AgCl в структуре бентонитов.
5. Впервые методом сквозной диффузии определены кажущийся и эффективный коэффициент диффузии I^- в образцах компактированного бентонита, модифицированного Ag и AgCl .
6. Расчётный прогноз на основе программы PhreeqC показал, что инженерные барьеры безопасности, содержащие 10 масс.% бентонита, модифицированного AgCl в количестве 0,5% по Ag от массы породы, обеспечат удельную активность ^{129}I в геосфере ниже уровня вмешательства в течение 2000 лет после начала миграции ^{129}I .

Теоретическая и практическая значимость.

1. Определены оптимальные условия реакций нанесения Ag, Ag₂O и AgCl на поверхность бентонитовых глин.
2. Получены материалы на основе бентонитов, модифицированных Ag и AgCl с высокой сорбционной способностью и селективностью по отношению I⁻, а также бентонитов, модифицированных Ag₂O, по отношению к I⁻ и IO₃⁻.
3. Определено влияние на сорбцию I⁻ структуры бентонита, количества, химической формы серебра и метода его нанесения на бентонит, рассчитаны изотермы и установлены механизмы сорбции I⁻ на бентоните, модифицированном Ag и AgCl.
4. Установлена высокая склонность нанесённого на бентонит Ag₂O к восстановлению до Ag в процессе модифицирования, вследствие чего показана низкая устойчивость нанесённого Ag₂O на бентонит.
5. Показана высокая прочность фиксации Ag и AgCl на модифицированном бентоните в средах с различным химическим составом, ионной силой и pH.
6. Определено влияние метода модифицирования бентонита на распределение Ag и AgCl в структуре бентонита.
7. При исследовании диффузии I⁻ определено влияние химической формы и метода нанесения серебра на скорость миграции I⁻ в компактированном бентоните.
8. По результатам изучения сорбции и диффузии I⁻, а также устойчивости сорбента установлено, что наиболее перспективным для использования в составе инженерных барьеров безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов является сорбент на основе бентонита месторождения 10-й Хутор, модифицированный AgCl в количестве 0,5% по Ag от массы породы в две стадии: нанесение Ag восстановлением [Ag(NH₃)₂]OH формальдегидом, выделяющимся при термическом гидролизе гексаметилентетрамина с последующим переводом Ag в форму AgCl воздействием раствора FeCl₃ + HCl.
9. На основании экспериментальных данных при помощи программы PhreeqC осуществлён расчётный прогноз изоляционной способности инженерных барьеров безопасности с включением 10 масс.% AgCl-содержащего бентонита (10-й Хутор, 0,5% по Ag) в течение 2000 лет после начала миграции ¹²⁹I.

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 4 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web Of Science, Chemical Abstracts Service, GeoRef.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: Всероссийском интернет-симпозиуме с международным участием, посвященном 100-летию науки о полимерах и 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета «Химически модифицированные минералы и биополимеры в

XXI веке CHEMOPOLYS 2020» (г. Воронеж, 2020 г.); Ninth international conference on radiation in various fields of research (RAD 2021) (Херцег-Нови, Черногория, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021» (г. Севастополь, 2021 г.); VI Всероссийском симпозиуме с международным участием «Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии» (г. Краснодар, 2021 г.); V и VI Российских Совещаниях по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ» (г. Москва, 2022 г.; г. Санкт-Петербург, 2023 г.); Четвертой научно-практической конференции «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров» (г. Сергиев Посад, 2022 г.); X Российской конференции с международным участием «РАДИОХИМИЯ-2022» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); XVII Конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН «ФИЗИКОХИМИЯ – 2022» (г. Москва, 2022 г.); XVIII и XIX Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии (г. Москва, 2023 и 2024 гг.); Геологическом международном студенческом саммите 2024 (г. Санкт-Петербург, 2024 г.); Всероссийском симпозиуме с международным участием «Адсорбенты и промышленные адсорбционные процессы в XXI веке» (г. Москва, 2024 г.); XXII Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (федеральная территория «Сириус», Россия, 2024 г.).

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных

1. Тюпина Е.А., **Прядко А.В.**, Меркушкин А.О. Методика получения серебросодержащего сорбента на основе бентонита для фиксации соединений радиоиода // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2021. – Т. 21, №. 1. – С. 26-32 (**Scopus**)
2. Тюпина Е.А., **Прядко А.В.** Сорбент на основе бентонита, модифицированного хлоридом серебра методом осаждения, для фиксации анионных форм радиоактивного иода // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2023. – Т. 23, №1. – С. 74-85 (**Scopus**)
3. Tyupina E.A., **Pryadko A.V.** Use of silver-containing sorbents in anionic species of radioactive iodine management in nuclear industry and the methods of obtaining them // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2024. – Vol. 333, №. 2. – P. 599-613 (**Scopus, WoS CC, GeoRef, CAS Core**)
4. Tyupina E.A., **Pryadko A.V.**, Klimenko O.M. Effect of silver chloride deposition technique on modified bentonite operating properties for radioactive iodide-ions localization in geological disposal facility for radioactive waste // Progress in Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 171. – p. 105198. (**Scopus, WoS CC, GeoRef**)

Тезисы докладов на всероссийских и международных конференциях

5. Тюпина Е.А., **Прядко А.В.**, Меркушкин А.О. Методика получения серебросодержащего сорбента для фиксации соединений радиоактивного иода // Химически модифицированные минералы и биополимеры в XXI веке CHEMOPOLYS 2020: Материалы Всероссийского интернет-симпозиума с международным участием, посвященного 100-летию науки о полимерах и 90-

летию Воронежского государственного лесотехнического университета, Воронеж, 01 – 02 декабря 2020 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2020. – С. 60-63.

6. Tyupina E., **Pryadko A.**, Marchenko D., Parshina P., Kozlov P. Features of application and durability of metallic silver on bentonite and silica aerogel for obtaining radioiodine getters // Ninth international conference on radiation in various fields of research (RAD 2021). June 14 – 18, 2021, Montenegro. Book of abstracts – RAD Centre, Niš, Serbia, 2021. – P. 265.

7. **Прядко А.В.**, Долженкова Д.И., Паршина П.Ю., Тюпина Е.А. Получение серебросодержащего сорбента на основе силикагеля для фиксации анионных форм радиоактивного йода // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 20–23 сентября 2021 г. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2021. – С. 516-519.

8. **Прядко А.В.**, Долженкова Д.И., Тюпина Е.А. Модификация силикагеля хлоридом серебра с целью получения сорбента для анионных форм радиоактивного йода // Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии. Материалы VI Всероссийского симпозиума с международным участием, г. Краснодар, 26 сентября – 02 октября 2021 года. – Краснодар, Кубанский государственный университет, 2021. – С. 300.

9. **Прядко А.В.**, Паршина П.Ю., Тюпина Е.А. Модификация бентонита хлоридом серебра с целью получения сорбента для анионных форм радиоактивного йода // Глины и глинистые минералы – 2022: Материалы V Российской Школы по глинистым минералам и VII Российского Совещания по глинам и глинистым минералам, посвященные 100-летию со дня рождения Б.Б. Звягина, Москва, 18 – 22 апреля 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, 2022. – С. 275-277.

10. Тюпина Е.А., **Прядко А.В.** Получение сорбента для анионных форм радиоактивного йода на основе силикагеля, модифицированного хлоридом серебра с использованием хлорида железа (III) // Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров: Сборник тезисов Четвертой научно-практической конференции, 21 – 22 сентября 2022 г. / Под общей редакцией проф. Е.А. Ваниной; 2022. – С. 42-43.

11. **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А. Получение сорбента для анионных форм радиоактивного йода на основе силикагеля, модифицированного хлоридом серебра // Радиохимия – 2022: X Российская конференция с международным участием, Санкт-Петербург, 26 – 30 сентября 2022 года. – Москва: ООО «Месол», 2022. – С. 442.

12. **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А. Сравнение методов модифицирования бентонита с целью получения сорбентов для фиксации йодид-ионов в хранилищах РАО // Физикохимия – 2022: Сборник тезисов докладов XVII

Конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН, Москва, 05 – 09 декабря 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, 2022. – С. 184-185.

13. Малышев А.В., **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А. Модифицирование бентонита металлическим серебром с использованием гидразина для получения селективного сорбента к иодид-ионам в хранилищах РАО // Глины и глинистые минералы – 2023: VI Российское Собрание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2023», Санкт-Петербург, 13 – 16 июня 2023 года. – Санкт-Петербург: ИГЕМ РАН, 2023. – С. 209-212.

14. **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А., Тодавич А.В., Сердюк Е.А., Приходько А.С. Влияние модифицирования пористых материалов на сорбционную способность к I-131 // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 9 (271). – С. 128-130.

15. Малышев А.В., Бубнов А.С., **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А. Исследование функциональных свойств бентонита, модифицированного металлическим серебром, как компонента инженерного барьера безопасности в хранилищах радиоактивных отходов // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 9 (271). – С. 15-17.

16. Сапранова А.А., **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А. Оценка эффективности модифицирования пористых материалов оксидом серебра (I) с целью повышения сорбционных свойств по отношению к анионам иода в условиях ПГЗРО // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 9 (271). – С. 70-72.

17. Козлов П.П., Тюпина Е.А., **Прядко А.В.**, Тодавич А.В., Клименко О.М. Влияние взаимодействия подземных вод Нижнеканского массива с бетоном на сорбцию йодид-ионов модифицированным бентонитом // Geological international student summit 2024. Геологический международный студенческий саммит 2024. Материалы конференции (4 – 8 апреля 2024 года, Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2024. – С. 104-108.

18. **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А. Сорбция иодид-ионов на бентонитах различных месторождений, модифицированных хлоридом серебра методом осаждения // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 3 (282). – С. 79-81.

19. **Прядко А.В.**, Тюпина Е.А. Сорбент на основе бентонита месторождения Даш-Салахлинское для фиксации иодид-ионов в ПГЗРО // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 10 (289). – С. 42-44.

20. Тюпина Е.А., **Прядко А.В.** Сорбционные свойства бентонита, модифицированного хлоридом серебра, по отношению к иодид ионам в различных средах // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, 7-12 октября, 2024, Федеральная территория «Сириус», Россия. Сборник тезисов докладов в 7 томах. Том 7. – М.: ООО «Буки Веди», 2024. – 276 с. – ISBN 978-5-00202-671-5 [т. 7] – С. 228.

Патент

21. Серебросодержащий сорбент для анионных форм радиоактивного иода: пат. 2801938 Рос. Федерация / Тюпина Е.А., **Прядко А.В.**, Меркушкин А.О., Паршина П.Ю. № RU2022119431 заявл. 15.07.2022; опубл. 21.08.2023, Бюл. № 24. 6 с.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части:

п. 10. Снижение отходности производств, фиксация отходов в виде малоподвижных, безопасных для окружающей среды соединений или трансформация их в полезные продукты.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Прядко Артема Викторовича является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Прядко Артему Викторовичу; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Локализация иода-129 в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов бентонитами, модифицированными соединениями серебра» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Диссертация рассмотрена на расширенном заседании кафедры химии высоких энергий и радиоэкологии, состоявшемся «18» марта 2025 года, протокол №7. В обсуждении приняли участие: заведующий кафедрой химии высоких энергий и радиоэкологии, к.х.н., доцент Магомедбеков Э.П.; заведующий кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, д.т.н., доцент Растунова И.Л.; доцент кафедры химии высоких энергий и радиоэкологии, к.т.н., доцент Тюпина Е.А.; доцент кафедры химии высоких энергий и радиоэкологии, к.х.н., доцент Клименко О.М.; доцент кафедры химии высоких энергий и радиоэкологии, к.т.н. Обручиков А.В.; доцент кафедры химии высоких энергий и радиоэкологии, к.х.н. Меркушкин А.О.;

доцент кафедры химии высоких энергий и радиозэкологии, к.х.н. Антропова И.Г.; доцент кафедры химии высоких энергий и радиозэкологии, к.х.н., доцент Богородская М.А.; заведующий лабораторией, к.т.н. Мамаева Н.Б.

Принимало участие в голосовании 9 человек. Результаты голосования: «За» – 9 человек, «Против» – 0 человек, «Воздержались» – 0 человек, протокол № 7 от «18» марта 2025 г.

Заведующий кафедрой
химии высоких энергий и радиозэкологии
к.х.н., доцент



Магомедбеков Э.П.

Секретарь заседания
доцент кафедры
химии высоких энергий и радиозэкологии
к.х.н.



Антропова И.Г.