



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ
И АТОМНОМУ НАДЗОРУ
(РОСТЕХНАДЗОР)

Федеральное бюджетное учреждение
«НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПО ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ»
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Малая Красносельская ул., д. 2/8, корп. 5
вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский,
Москва, 107140
Телефон: (499) 264-00-03, факс: (499) 264-28-59
E-mail: secnrs@secnrs.ru, <http://www.secnrs.ru>
ОКПО 00257414, ОГРН 1027739079499
ИНН/КПП 7725010048/770801001

09.09.2025 № 15-04/3985

На № _____ от _____
Отзыв ведущей организации

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
ФБУ «Научно-технический центр
по ядерной и радиационной
безопасности»,
канд. техн. наук

Хамаза А.А.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Прядко Артема Викторовича «Локализация иода-129 в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов бентонитами, модифицированными соединениями серебра», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 2.6.8 Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Радиоактивные изотопы иода являются одними из значимых продуктов деления ^{235}U и представляют значительную опасность для человека и остальной биосферы в силу их органотропности и высокой миграционной активности, в том числе, долгоживущий изотоп ^{129}I , который может содержаться в радиоактивных отходах 1 и 2 классов. Согласно требованиям федерального закона от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» захоронение твердых высокоактивных долгоживущих и твердых среднеактивных долгоживущих радиоактивных отходов осуществляется в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). В соответствии со «Стратегией создания ПГЗРО», утвержденной 28.03.2018, созданию ПГЗРО будет предшествовать реализация подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), опыт эксплуатации которой станет основанием для принятия решения о возможности создания ПГЗРО. В рамках фазы 2 «Стратегии создания ПГЗРО»

выполняются экспериментальные работы по оптимизации составов инженерных барьеров безопасности (ИББ). В качестве материалов для создания ИББ рассматриваются глины различного состава. Это позволяет считать тему диссертационной работы А.В. Прядко, направленную на модифицирование бентонитов для локализации ^{129}I в ПГЗРО, актуальной.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Сформированы не требующие применения опасных реагентов и специфических реакций новые методы модифицирования бентонитов Ag, Ag_2O и AgCl .

2. Определены сорбционные характеристики бентонитов, модифицированных Ag, Ag_2O и AgCl , по отношению к анионным формам иода в водных средах различного химического состава.

3. Продемонстрирована 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. Установлены закономерности распределения Ag и AgCl в структуре бентонитов.

5. Определены кажущийся и эффективный коэффициент диффузии I^- в образцах компактированного бентонита, модифицированного Ag и AgCl методом сквозной диффузии.

6. Расчётный прогноз на основе программы для электронных вычислительных машин (ЭВМ) PhreeqC показал, что ИББ, 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 .

Практическая значимость работы:

1. Определены оптимальные условия реакций нанесения Ag, Ag_2O 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 Ag_2O , по отношению к I^- и IO_3^- .

3. Определено влияние структуры бентонита на сорбцию I^- , 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 к восстановлению до Ag нанесённого на бентонит Ag_2O в процессе модифицирования, вследствие чего показана низкая устойчивость нанесённого Ag_2O 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 ИББ ПГЗРО 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 гексаметиленetetрамина, с последующим переводом Ag в форму AgCl воздействием раствора FeCl₃ + HCl.

9. На основании экспериментальных данных при помощи программы для ЭВМ PhreeqC осуществлён расчётный прогноз изоляционной способности ИББ с включением 10 масс.% AgCl-содержащего бентонита (10-й Хутор, 0,5% по Ag) в течение 2000 лет после начала миграции ¹²⁹I.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ, опубликованных автором. Общий объем работы 145 страниц, включая 107 рисунков, 16 таблиц, библиографию из 151 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1. Литературный обзор посвящен анализу данных по сорбентам для селективного извлечения анионных форм йода из водных растворов, а также методам их получения. Показано, что наибольшей перспективностью использования в качестве сорбентов для фиксации анионных форм йода из водных сред отличаются материалы с развитой поверхностью, модифицированные серебром в виде нерастворимых соединений, таких как Ag, Ag₂O и AgCl. Отмечено, что существующие методы модифицирования пористых материалов соединениями серебра требуют использования опасных реагентов или основаны на специфических реакциях.

Во **второй главе** (Методическая часть) представлено описание методики модифицирования образцов бентонитов различных месторождений, приведены методы проведения исследований и анализов, приведены уравнения для обработки экспериментальных данных по сорбции, диффузии

I⁻ и вымыванию нанесённого серебра, также методики осуществления расчетного прогноза изоляционной способности полученных ИББ.

В третьей главе приедены результаты разработки методов получения модифицированных образцов, их сорбционные свойства, устойчивость и микроструктура бентонитов, модифицированных Ag, Ag₂O и AgCl.

В первом разделе приведены результаты разработки методов модифицирования бентонитов Ag, Ag₂O и AgCl, эффективность которых подтверждена исследованиями с использованием РФА.

Во втором разделе представлены результаты изучения сорбционных свойств серебросодержащих бентонитов. Получены равновесные и кинетические характеристики сорбции иода всеми полученными модифицированными образцами бентонитов.

В третьем разделе приведены результаты исследования прочности фиксации Ag и AgCl на бентоните 10X в различных средах. Отмечается, что только воздействие 3 М HNO₃, выбранной в качестве наиболее агрессивной среды, приводит к частичному вымыванию (60 – 80%) металлической формы серебра, закрепленного на поверхности бентонита.

В четвертом разделе представлены результаты исследования микроструктуры модифицированных бентонитов. Сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия образцов модифицированного Ag и AgCl бентонита 10X показали равномерное распределение как Ag, так и AgCl, в материале. Анализ методами BET, DFT, T-методом Halsey полученных образцов позволяет заключить, что Ag, нанесенный методом I, и AgCl, нанесенный методами I, III и IV, находятся преимущественно в поровом пространстве бентонитов, а при модифицировании бентонита Ag, нанесённым методом II, и AgCl, нанесенным методом II, находятся преимущественно вне порового пространства.

В пятом разделе оценена возможность использования других соединений серебра для модифицирования бентонита, однако предложенные соединения (сульфид и иодид серебра) не характеризуются значительной сорбционной способностью по отношению к иоду.

В четвертой главе приведены результаты исследования диффузии I⁻ в компактированном бентоните и расчётный прогноз изоляционной способности ИББ на основе модифицированного бентонита.

В первом разделе представлены процесс получения образцов компактированного бентонита для исследования диффузии и схематическое изображение диффузионной ячейки, приведены результаты исследования миграции иодид-иона в образцах с использованием модельного раствора подземной воды участка «Енисейский». Показано, что кажущийся коэффициент диффузии (D_a) убывает в ряду: природный бентонит \approx Ag метод

$I \approx Ag$ метод II < AgCl метод I < AgCl метод II < AgCl метод IV; что подтверждается увеличением коэффициента распределения (K_d) в ряду. Образец, модифицированный AgCl методом IV, характеризуется наименьшим значением эффективного коэффициента диффузии (D_e), что обосновывает его выбор в качестве объекта для прогнозирования изоляционной способности ИББ по отношению к I.

Во втором разделе представлены результаты прогноза изоляционной способности ИББ толщиной 1000 мм, выполненного при помощи геохимического моделирования на программе для ЭВМ PhreeqC, демонстрирующие, что включение в состав ИББ 10 масс.% бентонита месторождения 10-й Хутор, модифицированного AgCl в количестве 0,5% по серебру от массы породы методом IV, позволит существенно замедлить миграцию радиоиода в ИББ на основе бентонита. При исходной объёмной активности ^{129}I 84,6 Бк/л обеспечивается объёмную активность ^{129}I в геосфере ниже уровня вмешательства в течение как минимум 2000 лет после начала миграции ^{129}I .

По работе можно сделать следующие замечания:

1. В литературном обзоре указано, что перспективным материалом для сорбции анионных форм иода также являются органоглины, что определяет целесообразность сравнения их свойств с полученными автором модифицированными материалами.

2. Немаловажным фактором при обосновании выбора предложенного состава ИББ является стоимость модифицирования 1 т бентонита месторождения 10-й Хутор, модифицированного AgCl в количестве 0,5% по серебру от массы породы методом IV. Учитывалась ли стоимость модификации ИББ при определении общей стоимости сооружения ПГЗРО?

3. При реализации прогнозной модели изоляционной способности бентонитовых ИББ не учтен состав порового раствора, который может изменять состав модельного раствора, тем самым влиять на сорбцию ^{129}I .

4. В разделе 4.2 прогноз преобразования нанесенного на бентонит AgCl в Ag_2S и в Ag_3PO_4 нереалистичен, так как в качестве модельного раствора используется модельная подземная вода участка «Енисейский», в составе которой среди анионов нет фосфатов, а принятая в модели окислительная обстановка (0,195 В) не будет способствовать восстановлению сульфатов до сульфидов. К тому же сделан некорректный вывод о том, что преобразование AgCl не приведет к потере ИББ противомиграционных свойств по отношению к радиоiodу, т.к. превышение уровня вмешательства по радиоiodу при наличии непреобразованного AgCl не происходит в течение 2000 лет, а при преобразовании AgCl в Ag_2S происходит спустя 751 год, при преобразовании AgCl в Ag_3PO_4 спустя 1513 лет.

5. В подразделах 1.1.1, 1.1.2 указано, что ^{129}I содержится в РАО класса 1, 2 при этом следует отметить, что по результатам предварительных работ по определению радионуклидного состава остеклованных ЖРО категории ВАО (от переработки ОЯТ) показано отсутствие значимых количеств ^{129}I в стеклоподобном компаунде (значительное количество изотопа уходит в выбросы). Вместе с тем указанный изотоп может содержаться в РАО других типов. Таким образом, рекомендуется рассмотреть возможность применения разработанной технологии модифицирования бентонитов при сооружении ИББ пунктов приповерхностного захоронения РАО.

6. В подразделе 1.1.2 указано, что «условия в большинстве хранилищ [пунктах захоронения] РАО исключают наличие сильных окислителей и высокие значения pH (более 8) среды», следует отметить, что данное утверждение обосновано не в полной мере в части значений кислотности, поскольку наличие железобетонных конструкций (контейнеры, крепь) с высокой степенью вероятности приведет к формированию слабощелочной или щелочной среды (pH более 8) в ячейках захоронения.

7. В тексте диссертационной работы и автореферата отсутствуют данные по методике, согласно которой проводились сорбционные эксперименты на модифицированных сорбентах: время сорбции/десорбции, объемы, количество повторяемых экспериментов, погрешность измерений. Также не указаны характеристики модифицируемого бентонита (включая гранулометрический состав). Не показана сорбционная емкость полученного сорбента.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку данной диссертационной работы, выполненной на высоком научном и экспериментальном уровне.

Достоверность полученных автором результатов подтверждается использованием современных методов исследования (УФ-спектromетрии, рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии (СЭМ-ЭДС), анализа поверхности по низкотемпературной адсорбции азота, гамма-спектromетрии и др.), воспроизводимостью результатов и их согласованностью с данными, представленными в независимых источниках по близкой тематике. Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

Результаты работы могут быть рекомендованы для изучения и внедрения в научных организациях (ИФХЭ РАН, ИБРАЭ РАН), а также на предприятиях Госкорпорации «Росатом», в частности, ФГУП «НО РАО».

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы представлены в материалах 13 научных конференций и опубликованы в 4 статьях в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных

в 4 статьях в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, в том числе 3 в журналах, входящих в международные базы данных научного цитирования Scopus, Web Of Science, Chemical Abstracts Service, GeoRef.

По своему содержанию диссертационная работа Прядко Артема Викторовича соответствует паспорту научной специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части направления исследований «Снижение отходности производств, фиксация отходов в виде малоподвижных, безопасных для окружающей среды соединений или трансформация их в полезные продукты».

Диссертация Прядко Артема Викторовича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи модифицирования бентонитов, используемых в качестве ИББ ПГЗРО, для обеспечения иммобилизации ^{129}I , имеющей существенное значение для ядерной отрасли страны.

По актуальности, новизне, практической значимости диссертация соответствует 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 диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Прядко Артем Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата химических наук по специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Отзыв на кандидатскую диссертацию Прядко А.В. был рассмотрен и одобрен на заседании НТС ФБУ «НТЦ ЯРБ» 05.09.2025г. (протокол № 7 от 05.09.2025).

Кандидат технических наук,
заместитель директора
ФБУ «Научно-технический
центр по ядерной
и радиационной безопасности»



Понизов Антон Владимирович

Малая Красносельская ул., д. 2/8, корп. 5
вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский,
Москва, 107140
Тел: +7 (499) 753-05-39, доб. 118
E-mail: ponizov@secnrs.ru