

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ – СОСНЫ»
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

Объект авторского права

УДК 621.039.73; 542.81



Леонтьева Татьяна Геннадьевна

**АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ СОРБЕНТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ
ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ», ДЛЯ
БЕЗОПАСНОГО ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ
ОТХОДАМИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.14.03 – ядерные энергетические установки,
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Минск 2025

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси и на кафедре экологического мониторинга и менеджмента Учреждения образования «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета

Научный руководитель **Москальчук Леонид Николаевич**, доктор технических наук, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси

Официальные оппоненты: **Жемжуров Михаил Леонидович**, доктор технических наук, доцент, пенсионер
Кузнецова Татьяна Федоровна, кандидат химических наук, доцент, заведующий лабораторией адсорбентов и адсорбционных процессов Государственного научного учреждения «Институт общей и неорганической химии» Национальной академии наук Беларуси

Оппонирующая организация Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»

Защита состоится 20 февраля 2025 года в 10-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.10.01 при Государственном научном учреждении «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси по адресу: Минский р-н, Луговослободской с/с, район д. Прилесье, 47/22. Телефон ученого секретаря +375 17 272-38-85, e-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by.

Почтовый адрес: 220109, г. Минск, а/я 119.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан «17» января 2025 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат биологических наук, доцент



Н.А. Маковская

ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной энергетики предполагает решение проблем, связанных с образованием на АЭС радиоактивных отходов (РАО) и безопасным обращением с ними. Во всем мире ведется поиск эффективных методов обработки, кондиционирования РАО, их безопасного хранения и захоронения. Вопросы безопасного обращения с РАО весьма актуальны для Беларуси в связи с вводом в эксплуатацию 1-го и 2-го энергоблоков Белорусской АЭС.

Увеличение объемов РАО вследствие интенсивного развития атомной энергетики в мире и одновременное повышение требований по обеспечению радиационной безопасности определило необходимость совершенствования известных технологий обращения с РАО. В качестве аналога известным природным материалам, применяемым в качестве сорбентов радионуклидов, буферной засыпки и сорбционной добавки в цементную матрицу (бентонитовая глина) предлагается использовать алюмосиликатные сорбенты.

Данная диссертационная работа направлена на оценку возможности использования глинисто-солевых шламов, являющихся промышленными отходами переработки сильвинитовой руды на ОАО «Беларуськалий», для получения алюмосиликатных сорбентов, предназначенных для очистки жидких радиоактивных отходов и иммобилизации радионуклидов в цементной матрице. Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью поиска новых сорбционных материалов для безопасного обращения с радиоактивными отходами, а также направлений возможного использования накопившихся на ОАО «Беларуськалий» глинисто-солевых шламов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Беларуси на 2021–2025 гг. в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156, а именно п. 3. Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование: атомная энергетика, ядерная и радиационная безопасность; техника и технологии в сфере сбора, обезвреживания и использования отходов.

Диссертационная работа имеет теоретическое и прикладное значение и выполнена в рамках государственных программ научных исследований: ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» подпрограмма «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии», задание «Научное обоснование применения неорганических сорбентов для предотвращения миграции радиоцезия в почвенном покрове района размещения АЭС в случае аварийных ситуаций» (№ ГР 20141675, 2014–2015 гг.); ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограмма «Атомная энергетика и ядерно-физические технологии»: задание 3.3.04 «Перспективные наноструктурированные алюмосиликатные сорбенты на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий»: структурные особенности, ионообменные и селективные свойства» (№ ГР 20160842, 2016–2018 гг.) и задание 3.3.18

«Исследование и оценка эффективности иллита, выделенного из глинисто-солевых шламов, в качестве сорбционной добавки для иммобилизации жидких радиоактивных отходов в цементную матрицу» (№ ГР 20191480, 2019–2020 гг.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы – научное обоснование возможности использования алюмосиликатных сорбентов, полученных на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий», для очистки и кондиционирования низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов.

В соответствии с поставленной целью основными задачами являлись:

1) изучение физико-химических и сорбционных свойств глинисто-солевых шламов, являющихся промышленными отходами переработки сильвинитовой руды на ОАО «Беларуськалий»;

2) разработка способов получения алюмосиликатных сорбентов путем водной, кислотно-водной обработки глинисто-солевых шламов, совершенствование метода их обогащения;

3) экспериментальное определение физико-химических и сорбционных свойств в отношении радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr алюмосиликатных сорбентов, полученных в результате водной, кислотно-водной обработок и обогащения;

4) оценка эффективности сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr алюмосиликатными сорбентами из модельных растворов, имитирующих жидкие радиоактивные отходы;

5) сравнительный анализ сорбционных свойств алюмосиликатных сорбентов с известными глинистыми материалами и обоснование эффективности использования разработанных сорбентов для очистки низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов, подготовка технических условий на сорбенты;

б) оценка влияния алюмосиликатных сорбентов на скорость выщелачивания ^{137}Cs и ^{85}Sr из цементных компаундов и их механическую прочность.

Предмет исследований – физико-химические и сорбционные свойства алюмосиликатных сорбентов, полученных на основе глинисто-солевых шламов, возможность их применения в качестве сорбентов радионуклидов при обращении с низко- и среднеактивными жидкими радиоактивными отходами.

Объект исследований – образцы алюмосиликатных сорбентов, полученные на основе глинисто-солевых шламов, являющихся промышленными отходами переработки сильвинитовой руды на ОАО «Беларуськалий» (г. Солигорск, Минская обл.).

Методы исследований. В работе использованы экспериментальные методы исследований: рентгенофазовый, микрорентгеноспектральный, аналитической сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, лазерного анализа размера частиц, низкотемпературной адсорбции азота, сорбционный.

Научная новизна заключается в получении новых данных о химическом, минералогическом и гранулометрическом составе образцов глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» и алюмосиликатных сорбентов, полученных на их основе с использованием разработанных способов обработки; установлении закономерностей сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr , параметров селективной сорбции ^{137}Cs и оптимальной очистки модельных растворов, имитирующих жидкие радиоактивные

отходы, в зависимости от pH раствора, продолжительности контакта сорбента с модельным раствором и соотношения сорбент – раствор. Разработаны и научно обоснованы способы получения алюмосиликатных сорбентов для безопасного обращения с низко- и среднеактивными жидкими радиоактивными отходами.

Положения, выносимые на защиту

1. Новые экспериментальные данные о минералогическом, химическом, гранулометрическом составах и структурных особенностях глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий», подтверждающих значительное содержание (67–87 %) в их составе мелкодисперсной фракции (менее 0,01 мм) основного глинистого минерала иллита, имеющего слоистую структуру, что в совокупности обосновывает возможность практического использования глинисто-солевых шламов для получения алюмосиликатных сорбентов [1, 4].

2. Способы физико-химической обработки глинисто-солевых шламов для получения алюмосиликатных сорбентов, отличающихся различным содержанием иллита (42–89,2 %), для которых коэффициент распределения ^{137}Cs в 5–82 раза выше по сравнению с исходными образцами глинисто-солевых шламов, что доказывает эффективность извлечения радионуклида ^{137}Cs из низкосолевых низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов [4–7, 10, 11].

3. Экспериментально установленные показатели сорбции ^{137}Cs для полученных алюмосиликатных сорбентов, которые в системе «сорбент – радиоактивный раствор» имеют коэффициент распределения ^{137}Cs в 5–20 раз выше по сравнению с природными бентонитовыми глинами России, Азербайджана, Казахстана и результаты испытаний эффективности сорбции полученных сорбентов в отношении других радионуклидов ^{85}Sr , ^{152}Eu , ^{241}Am [3, 5, 8, 9].

4. Новые экспериментальные данные о физико-химических свойствах полученных сорбентов, позволяющих эффективно сорбировать радионуклид ^{137}Cs и фиксировать его в цементной матрице при внесении в количестве 5–10 мас. % от массы портландцемента, снижая выщелачивание радионуклидов из цементного компаунда, обеспечивая соблюдение требований ГОСТ Р 51883-2002 [2, 40].

Личный вклад соискателя ученой степени

Автор принимал личное участие в постановке задач исследований, планировании и проведении экспериментов, разработке способов получения алюмосиликатных сорбентов, анализе и обобщении полученных данных, подготовке публикаций, обсуждении результатов работы на международных и региональных конференциях. При непосредственном участии автора разработаны способ получения алюмосиликатного сорбента радионуклидов (Евразийский патент № 031515) и технические условия ТУ ВУ 190341033.006–2024 на алюмосиликатные сорбенты.

Полученные результаты исследований обсуждались с научным руководителем Москальчуком Л.Н., совместно формулировались выводы, заключение и положения. В результате работы с научным руководителем организована научная экспертиза и испытания полученных сорбентов в международных научных коллаборациях (лаборатория хроматографии радиоактивных элементов Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, кафедра радиохимии МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт ядерной

химии и технологий, Варшава, Польша) для подтверждения эффективности их применения для очистки жидких радиоактивных отходов в отношении радионуклидов ^{137}Cs , ^{85}Sr , ^{152}Eu , ^{241}Am и ^{99}Tc .

Автор выражает благодарность старшему научному сотруднику лаборатории Баклаю А.А. за консультации и техническую помощь в проведении экспериментальных исследований, радиометрических измерений и обработке результатов. Автор выражает благодарность Маковской Н.А. за помощь в организации проведения испытаний сорбентов и подготовке научных статей.

Достоверность результатов исследования подтверждается анализом теоретических и экспериментальных работ по исследуемой тематике, современными методами исследования, которые соответствуют поставленным в работе целям и задачам. Научные положения, заключения и выводы, сформулированные в диссертации, основаны на конкретном и достоверном материале, полученном с применением экспериментальных и статистических методов анализа полученных данных, и представляют собой научно установленные факты. Математическая обработка результатов проведенных экспериментов и оценка их погрешности проведена с помощью апробированных методов статистического анализа, обеспечивающего корректность оценок неопределенности измерений.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на национальных и международных конференциях: Междунар. науч. конф. «Сахаровские чтения: экологические проблемы XXI-го века» (Минск, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017); Междунар. молодежном науч. форуме «Ломоносов-2015» (Россия, Москва, 13–17.04.2015); Междунар. научно-технич. конф. «Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления» (Минск, 19–21.10.2016); III Всерос. конф. с междунар. участием «Актуальные проблемы адсорбции» (Москва, 17–21.10.2016); Междунар. (Региональной) науч. конф. «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2017, 2018); 4th International Conference on Environmental Radioactivity «Radionuclides as Tracers of Environmental Processes (ENVIRA2017)» (Vilnius, Lithuania, 29.05–02.06.2017); 82-ой научно-технич. конф. профес.-препод. состава, науч. сотrud. и аспирантов (с междунар. участием) (Минск, 01–14.02.2018); Междунар. конф. «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века» (Минск, 2018, 2020); научно-практич. конф. «Современное состояние и направления развития технологий, машинного и аппаратного обеспечения, эколого-безопасного природопользования и переработки промышленных отходов горнопромышленных комплексов на территории Евразийского экономического пространства» (Минск, 5–6.09.2019); VI Рос. совещании по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2023» (г. Санкт-Петербург, 13–16.06.2023).

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликована 41 научная работа, из них 9 статей (4,8 авторских листа) – в рецензируемых журналах в соответствии с требованиями пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, в том числе 6 статей в зарубежных научных изданиях, включенных в перечень ВАК России, индексируемых в Scopus, Web of

Science и 2 статьи в других зарубежных изданиях, 29 тезисов докладов и материалов международных конференций, получен патент на изобретение. Общий объем опубликованных по теме диссертации материалов составляет 5,9 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 116 страницах машинописного текста и состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка, содержащего 244 наименования и 6 приложений. Основной текст диссертации включает 14 формул, 39 иллюстраций и 43 таблицы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** представлен анализ состояния проблемы образования и накопления жидких радиоактивных отходов (ЖРО), рассмотрены существующие технологии их переработки для обеспечения безопасного обращения с ними. Дана оценка используемых в настоящее время для очистки ЖРО сорбентов на основе природного минерального сырья (клиноптиллолит, вермикулит и др.), которые находят применение на АЭС при обращении с радиоактивными отходами (РАО). Также рассмотрены природные материалы (бентонитовая глина, глауконит и др.), в составе которых имеются глинистые минералы (монтмориллонит и иллит), которые в свою очередь и определяют их высокие сорбционные свойства по отношению к долгоживущим радионуклидам ^{137}Cs и ^{90}Sr .

С развитием атомной энергетики весьма актуален поиск новых сорбционных материалов для очистки различных по составу и солесодержанию ЖРО. Одними из эффективных сорбционных материалов, получаемых из промышленных отходов ОАО «Беларуськалий», могут быть алюмосиликатные сорбенты (АС). Промышленные отходы переработки силвинитовой руды представляют собой иллитсодержащий материал для получения сорбентов, пригодных для очистки низкоактивных ЖРО АЭС от радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и др., а также в качестве сорбционной добавки при иммобилизации радионуклидов в цементную матрицу. Анализ литературы показал необходимость детального изучения физико-химических и сорбционных свойств глинисто-солевых шламов (ГСШ), обозначил научные и технические вопросы при кондиционировании РАО разных типов и составов, что позволило в дальнейшем обосновать методологию проведенных исследований.

Во **второй главе** описаны общепринятые методики исследований физико-химических, сорбционных и селективных свойств в отношении радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr (аналог ^{90}Sr) образцов ГСШ и полученных их основе алюмосиликатных сорбентов. Удельная активность ^{137}Cs и ^{85}Sr в экспериментах составляла в среднем $1,4 \cdot 10^6$ и $1,9 \cdot 10^6$ Бк/дм³ соответственно, что соответствует концентрации данных радионуклидов $3,2 \cdot 10^{-9}$ и $3,4 \cdot 10^{-11}$ моль/дм³.

Представлены способы получения алюмосиликатных сорбентов, отличительной особенностью которых является водная и кислотнo-водная обработка, а также обогащение путем выделения фракции менее 2 мкм седиментационным методом. Водной обработкой исходных образцов ГСШ достигалось удаление

водорастворимых солей KCl и NaCl в полученных образцах алюмосиликатных сорбентов (АС-1о, АС-2о и АС-3о). Кислотно-водная обработка образцов ГСШ раствором соляной кислоты концентрацией 0,1 моль/дм³ позволила избавиться от карбонатных минералов (доломита и кальцита) и получить образцы модифицированных алюмосиликатных сорбентов (АС-1м, АС-2м и АС-3м). Для получения обогащенного образца алюмосиликатного сорбента (АС-3и) использовался седиментационный метод, заключающийся в выделении глинистой фракции (иллита) с размером фракции менее 2 мкм и удалении гипса.

Изложена методика получения образцов цементных компаундов (ЦК) с добавкой алюмосиликатных сорбентов и определения их химической устойчивости посредством длительного выщелачивания. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51833-2002 скорость выщелачивания ¹³⁷Cs из ЦК не должна превышать 1·10⁻³ г/см²·сут на 28 сут эксперимента, а механическая прочность (предел прочности при сжатии) должна быть не менее 4,9 МПа.

В третьей главе приведен анализ результатов исследований свойств и характеристик образцов ГСШ и алюмосиликатных сорбентов, а также закономерности сорбции ¹³⁷Cs и ⁸⁵Sr данными материалами.

Исследования образцов ГСШ, отобранных из шламохранилищ 1–3 рудоправлений (РУ) ОАО «Беларуськалий» (ГСШ-1, ГСШ-2 и ГСШ-3), показали, что существенных различий в их химическом, минералогическом и гранулометрическом составе не наблюдается. Основными минеральными фазами, присутствующими во всех исследуемых образцах ГСШ являются иллит, кварц, полевой шпат в калиевой форме, доломит, кальцит и гипс. Установлено, что водорастворимые соли калия и натрия существенным образом влияют на сорбцию ¹³⁷Cs. При снижении их содержания в образцах ГСШ до значений менее 1 г/дм³ степень сорбции ¹³⁷Cs увеличивается до значений порядка 98–99 %, а значения коэффициента распределения ¹³⁷Cs составляют более 10³ дм³/кг.

Установлено, что по минеральному составу полученные из ГСШ образцы алюмосиликатных сорбентов отличаются незначительно, а основным глинистым минералом в их составе является иллит, неглинистым – доломит.

Таблица 1 – Минеральный состав и удельная поверхность образцов сорбентов

Шифр образца	Содержание основных минералов, %						Удельная площадь поверхности, м ² /г
	Иллит	Доломит	КПШ* (микроклин)	Кварц	Гипс	Кальцит	
АС-1о	42,2	24,8	16,4	6,7	5,1	2,6	27
АС-2о	45,5	23,0	17,7	6,4	5,8	1,7	27
АС-3о	48,2	17,0	21,8	4,9	3,1	1,4	29

Примечание. *КПШ – калиевый полевой шпат

Кислотно-водная обработка ГСШ приводит к разрушению карбонатных минералов (кальцит, доломит) и увеличению содержания иллита до 65,2 мас. % в образце сорбента АС-3м. Полученный в результате обогащения образец сорбента АС-3и с размером фракции менее 2 мкм характеризуется высоким содержанием глинистого минерала иллита (89,2 %) и также следами кальцита и доломита. Структурно-морфологической особенностью образца сорбента АС-3и является

малая толщина частиц иллита (4–7 нм). Установлено, что водная и кислотно-водная обработки ГСШ приводят к увеличению содержания мелкодисперсной фракции, а полученные сорбенты можно отнести к высокодисперсной группе глинистого сырья, так как содержание частиц с размером менее 10 мкм составляет более 85 %.

Основными показателями, определяемыми при изучении сорбционных свойств алюмосиликатных сорбентов, являлись степень сорбции (S , %), и коэффициент распределения (K_d , $\text{дм}^3/\text{кг}$). Степень сорбции ^{137}Cs или ^{85}Sr определяется как отношение удельной активности радионуклида сорбированного твердой фазой сорбента к исходной удельной активности раствора в процентах по формуле

$$S = \frac{A_0 - A_c}{A_0} \cdot 100\% , \quad (1)$$

Коэффициент распределения ^{137}Cs или ^{85}Sr , определяемый как отношение удельной активности радионуклида сорбированного в твердой фазе сорбента к равновесной концентрации радионуклида в растворе, рассчитывали по формуле

$$K_d = \frac{A_0 - A_c}{A_c} \cdot \frac{V}{m} , \quad (2)$$

где A_0 – начальная удельная активность радионуклида в растворе, $\text{Бк}/\text{дм}^3$; A_c – равновесная удельная активность радионуклида в растворе после сорбции, $\text{Бк}/\text{дм}^3$; V – объем радиоактивного раствора, дм^3 ; m – масса сорбента, кг .

Закономерности сорбции ^{137}Cs . Установленная зависимость степени сорбции ^{137}Cs (S , %) от времени (t) показывает, что сорбенты обладают высокой скоростью сорбции, поскольку уже в течение первых 10 мин значение S ^{137}Cs составляет 94–98 % и практически не меняется в течение 30 сут, достигая значения 98–99 %. Время установления сорбционного равновесия составляет не более 1 ч. В дальнейших экспериментах время взаимодействия в системе сорбент – раствор составляло 24 ч. Оценка полученных значений K_d ^{137}Cs , показала, что сорбент АС-1м вследствие более высокого содержания иллита эффективнее сорбирует ^{137}Cs по сравнению с сорбентом АС-1о. Установлено, что при дозе сорбента $1 \text{ г}/\text{дм}^3$ степень сорбции ^{137}Cs образцами сорбентов из водного раствора составляет 97–98 %, а при дальнейшем увеличении дозы до $8\text{--}10 \text{ г}/\text{дм}^3$ достигает 99 %. В дальнейших экспериментах использовалась доза сорбентов (C_{AC}) $10 \text{ г}/\text{дм}^3$.

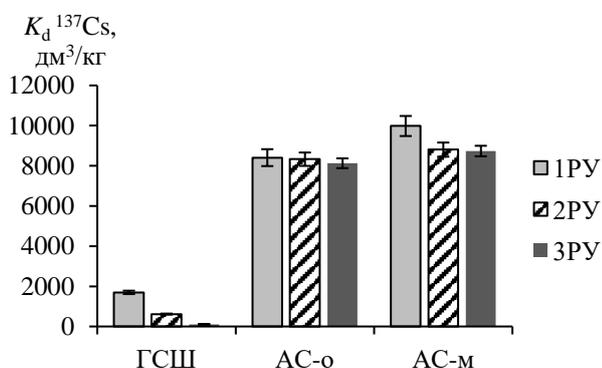


Рисунок 1 – Значения K_d ^{137}Cs для образцов ГСШ и сорбентов, $\text{pH} = 6,1 \pm 0,1$

Из рисунка 1 видно, что в зависимости от способа обработки ГСШ (водная или кислотно-водная) значения K_d ^{137}Cs для образцов сорбентов АС-о и АС-м увеличиваются в 5–82 раза по сравнению с исходными образцами ГСШ. Следовательно, для очистки малосолевых ЖРО (содержание солей менее $10 \text{ г}/\text{дм}^3$) от ^{137}Cs наиболее эффективно использование модифицированных сорбентов.

Исследование селективной сорбции ^{137}Cs образцами сорбентов показало,

что основным механизмом сорбции в системе сорбент – раствор является ионный обмен. Полученные значения потенциала связывания радиоцезия RIP(K) (Radiocaesium Interception Potential) для сорбентов АС-1о и АС-3о, АС-1м и АС-3м составляют не менее 5000 ммоль/кг, что превышает аналогичные значения для природного клиноптилолита и глауконита в 1,5–20 раз.

Установлено, что рН раствора практически не оказывает влияния на степень сорбции ^{137}Cs (S , %) образцами сорбентов АС-1о и АС-1м. Наибольшее влияние на сорбцию ^{137}Cs образцами сорбентов оказывает присутствие в растворе катионов NH_4^+ и K^+ . Калий является химическим аналогом цезия и создает конкуренцию за места сорбции. Ион аммония, обладая наиболее близким к цезию ионным радиусом, является наибольшим конкурентом ^{137}Cs и при концентрации NH_4^+ 0,5 моль/дм³ сорбция ^{137}Cs значительно снижается. Установлено, что присутствие в растворе сильного комплексообразователя (трилон Б) приводит к снижению значения K_d ^{137}Cs для образцов сорбентов АС-1о и АС-1м в 18 и 11 раз соответственно по сравнению со значением K_d ^{137}Cs из водного раствора (дист. вода).

На основании литературных данных, для исследования сорбции ^{137}Cs приготовлены модельные растворы ЖРО (таблица 2), включающие основные химические компоненты, входящие в реальные составы ЖРО АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК. Концентрация указанных солей в растворе составляла 0,1 моль/дм³, трилона Б – 0,01 моль/дм³. Результаты исследований представлены на рисунке 2.

Таблица 2 – Компонентный состав модельных растворов ЖРО

Модельный раствор ЖРО				
1	2	3	4	5
NaNO_3	NaNO_3 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	NaNO_3 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, KNO_3	NaNO_3 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, трилон Б	NaNO_3 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, KNO_3 , трилон Б

Согласно рисунку 2, значения K_d ^{137}Cs для сорбентов в низкосолевых модельных растворах № 1, 2 и 4 (концентрация солей $\leq 0,1$ моль/дм³) составляют 1,0–1,6·10³ дм³/кг и снижаются в 6–8 раз по сравнению с водным раствором ^{137}Cs (дист. вода). В случае повышения концентрации вышеуказанных солей в модельных растворах ЖРО до 1 моль/дм³, а трилона Б – до 0,1 моль/дм³ происходит дальнейшее снижение значений K_d ^{137}Cs для образцов сорбентов до 10² дм³/кг. В растворах № 3 и 5 сорбция ^{137}Cs снижается значительно вследствие присутствия в данных растворах катиона калия, создающего конкуренцию ^{137}Cs .

Отличительной особенностью ЖРО, образующихся на АЭС с реактором ВВЭР, является наличие в их составе солей борной кислоты. Анализ

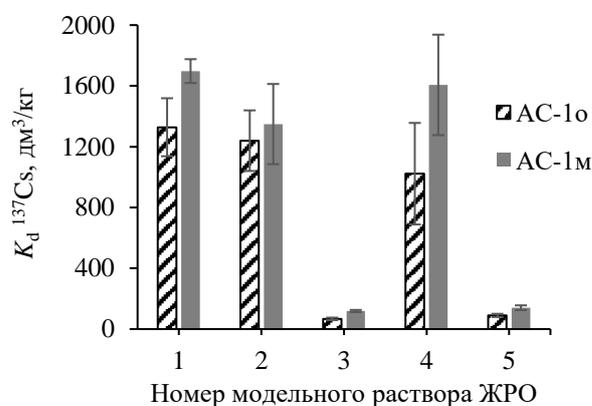


Рисунок 2 – Зависимость K_d ^{137}Cs от состава модельных растворов ЖРО

эффективности сорбции ^{137}Cs образцами сорбентов проведен из модельных растворов ЖРО с различной концентрацией борной кислоты, представленных в таблице 3.

Таблица 3 – Компонентный состав боросодержащих модельных растворов ЖРО

Характеристика ЖРО	Модельный раствор ЖРО			
	1	2	3	4
Компоненты	H_3BO_3	H_3BO_3	NaNO_3 , NaOH , H_3BO_3	NaNO_3 , NaOH , H_3BO_3 , KNO_3
Концентрация, г/дм ³	6,2	61,2	60, 80, 98	60, 80, 98, 40
pH	5,2±0,1	3,2±0,1	12,0±0,1	12,0±0,1

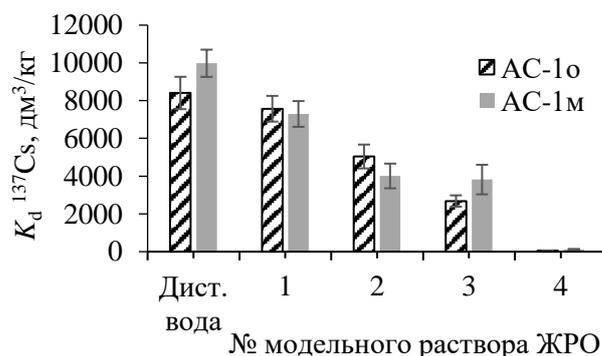


Рисунок 3 – Зависимость K_d ^{137}Cs от состава боросодержащих модельных ЖРО

Согласно данным рисунка 3, увеличение в растворе концентрации борной кислоты от 6,2 (соответствует 0,1 моль/дм³) до 62 г/дм³ (соответствует 1 моль/дм³) приводит к снижению коэффициента распределения ^{137}Cs . По сравнению с низкосолевым раствором ЖРО № 1 значение K_d ^{137}Cs в высокосолевым растворе ЖРО № 2 снижается в 1,5–2 раза. Дальнейшее увеличение концентрации борной кислоты, а также присутствие NaNO_3 и NaOH в составе ЖРО № 3 приводит к снижению K_d ^{137}Cs , однако его значение составляет более 10^3 дм³/кг. Наибольшее влияние на сорбцию ^{137}Cs оказывает присутствие в модельном растворе ЖРО № 4 катиона K^+ , который практически полностью ее подавляет. Таким образом, наличие в составе модельных растворов ЖРО борной кислоты оказывает незначительное влияние на сорбцию ^{137}Cs .

В идентичных условиях проведены исследования сорбции ^{137}Cs образцами алюмосиликатных сорбентов АС-1о и АС-1м, природной бентонитовой глины (БГ) из различных месторождений. Образцы БГ указанных месторождений используются компанией «Бентонит» (г. Москва, Россия) в качестве сорбционных материалов в атомной энергетике Российской Федерации. Результаты исследований представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения коэффициента распределения ^{137}Cs для различных растворов

Сорбционный материал, месторождение	K_d ^{137}Cs , дм ³ /кг		
	Дист. вода	0,1М NaNO_3	1М NaNO_3
АС-1о, Беларусь	$(8,4 \pm 0,9) \cdot 10^3$	$(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(3,6 \pm 0,1) \cdot 10^2$
АС-1м, Беларусь	$(10,0 \pm 2,0) \cdot 10^3$	$(1,7 \pm 0,1) \cdot 10^3$	$(6,4 \pm 0,3) \cdot 10^2$
БПГ, «Острожанское», Беларусь	$(4,8 \pm 2,0) \cdot 10^3$	$(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(5,8 \pm 0,6) \cdot 10^2$
БГ, «10-й Хутор», Хакасия, Россия	$(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^3$	$(2,4 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(0,7 \pm 0,1) \cdot 10^2$
БГ, «Даш-Сахалинское», Азербайджан	$(4,4 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(1,4 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(0,8 \pm 0,3) \cdot 10^2$
БГ, «Таганское», Казахстан	$(5,4 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(3,2 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(0,6 \pm 0,1) \cdot 10^2$

Из таблицы 4 видно, что среди исследованных глинистых материалов высокой сорбцией ^{137}Cs (K_d $^{137}\text{Cs} > 10^3$ дм³/кг) из низкосолевых растворов (дист. вода и 0,1 моль/дм³ NaNO_3) обладают алюмосиликатные сорбенты АС-1о и АС-1м и образец обогащенной бентонитоподобной глины месторождения

«Острожанское». При концентрации NaNO_3 в растворе 1 моль/ дм^3 значение K_d ^{137}Cs снижается на порядок и составляет 10^2 $\text{дм}^3/\text{кг}$. По сравнению с образцами бентонитовой глины (Россия, Казахстан, Азербайджан) K_d ^{137}Cs для алюмосиликатных сорбентов выше в 5–20 раз.

Как видно, полученные образцы алюмосиликатных сорбентов обладают достаточно высокими сорбционными свойствами в отношении ^{137}Cs . Для очистки низкосолевых (до 10 $\text{г}/\text{дм}^3$) низко- (до 10^3 Бк/г) и среднеактивных (10^3 – 10^7 Бк/г) ЖРО от радионуклида ^{137}Cs могут использоваться алюмосиликатные сорбенты АС-1о и АС-м.

Закономерности сорбции ^{85}Sr . На основании экспериментальных данных установлено, что наиболее быстро сорбция ^{85}Sr на сорбенте АС-3и, обогащенном иллитом, протекает в первые 30 мин. Эффективное время достижения максимальной степени сорбции ^{85}Sr (91,9 %) не превышает 60 мин, после чего наступает равновесие и содержание ^{85}Sr в растворе не изменяется. Определенное значение K_d ^{85}Sr в диапазоне $\text{pH} = 6$ – 11 практически не изменяется и составляет $2,2 \cdot 10^3$ $\text{дм}^3/\text{кг}$, а при $\text{pH} < 6$ снижается.

Установлено, что на сорбцию ^{85}Sr из водного раствора, наиболее существенное влияние оказывает присутствие в растворе его химического аналога – катиона Ca^{2+} по сравнению с другими катионами Na^+ , K^+ , NH_4^+ . На поведение ^{85}Sr влияют pH и ионная сила раствора, а сам ^{85}Sr доминирует над большинством щелочных и щелочноземельных металлов при конкуренции за места сорбции в ряду $\text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$. В низкосолевом растворе при концентрации K^+ , NH_4^+ , Na^+ и Ca^{2+} менее $0,001$ моль/ дм^3 образец сорбента АС-3и селективно сорбирует ^{85}Sr . При увеличении концентрации вышеуказанных катионов до $0,01$ моль/ дм^3 значения K_d ^{85}Sr снижаются в 7, 20, 19 и 52 раза соответственно по сравнению с раствором на основе дистиллированной воды, для которого значение K_d ^{85}Sr составляет $3,2 \cdot 10^3$ $\text{дм}^3/\text{кг}$.

Исследование сорбции ^{85}Sr образцом сорбента АС-3и в сравнении с природной бентонитовой глиной месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Россия) из высокосолевого модельного раствора ЖРО (содержание NaNO_3 – 100 $\text{г}/\text{дм}^3$) показало, что степень сорбции ^{85}Sr для обоих образцов составляет 15–17 %, что может быть связано с конкуренцией за места сорбции между ионами Na^+ и $^{85}\text{Sr}^{2+}$. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии солей на сорбцию ^{85}Sr . Образцы алюмосиликатных сорбентов обладают высокими сорбционными свойствами в отношении ^{85}Sr в растворах с pH более 6. Для очистки низкосолевых (до 10 $\text{г}/\text{дм}^3$) низко- (до 10^3 Бк/г) и среднеактивных (10^3 – 10^7 Бк/г) ЖРО от радионуклида ^{85}Sr (аналог ^{90}Sr) могут использоваться алюмосиликатные сорбенты.

Для подтверждения эффективности алюмосиликатных сорбентов в отношении сорбции радионуклида ^{137}Cs и других (^{85}Sr , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{241}Am , ^{99}Tc) проведены совместные исследования с российскими [5–А] и польскими [8–А, 9–А] учеными. Сорбционные характеристики по отношению к радионуклидам ^{137}Cs и ^{90}Sr изучали для образцов алюмосиликатных сорбентов АС-3о, АС-3м и иллитового сорбента АС-3и. Разработанные алюмосиликатные сорбенты прошли независимые радиохимические испытания в лаборатории хроматографии радиоактивных элементов Института физической химии и электрохимии им. А.Н.

Фрумкина Российской академии наук (акт испытаний от 17.12.2018). Установленные значения коэффициента распределения (K_d) ^{137}Cs из раствора 0,1М NaNO_3 для сорбентов АС-1о и АС-1и, превышают значения K_d ^{137}Cs для природного клиноптиллита в 3–6 раз и синтетического цеолита Na-A в 10–18 раз. В растворе 1М NaNO_3 значения K_d ^{137}Cs для указанных сорбентов превышают значения данного параметра для природного клиноптиллолита в 39 раз и синтетического цеолита Na-A в 250 раз. Для сорбента АС-1и получены высокие значения K_d ^{90}Sr из водопроводной воды по сравнению с природным клиноптиллолитом и бентонитовой глиной, уступающие при этом лишь синтетическому сорбенту – модифицированному диоксиду марганца. Сорбция ^{90}Sr из 0,01М раствора CaCl_2 для сорбентов АС-1о и АС-1и на порядок выше ($K_d = 10^2 \text{ см}^3/\text{г}$), по сравнению с природным клиноптиллолитом и бентонитовой глиной.

Полученные результаты исследований в рамках совместных исследований с польскими учеными [8–А, 9–А] показывают, что алюмосиликатные сорбенты можно рассматривать в качестве перспективного материала для очистки водных растворов, содержащих радиоактивные металлы. Установлено, что степень сорбции Cs(I), Sr(II), Eu(III) и Am(III) образцами сорбентов АС-1о и АС-1и не меняется существенно в широком диапазоне значений кислотности. Значения степени сорбции указанных радионуклидов увеличиваются с увеличением дозы сорбентов до 2 г/дм³, после чего дальнейшее увеличение дозы сорбента не приводит к росту степени сорбции радионуклидов. Исследования сорбции Cs(I), Sr(II), Eu(III) и Am(III) на модельных растворах, имитирующих реальные ЖРО показали, что при дозе сорбентов 2–5 г/дм³ происходит эффективная сорбция радионуклидов, а для полной их сорбции необходимо увеличение доз сорбентов до 20 г/дм³.

В **четвертой главе** представлены данные о влиянии алюмосиликатных сорбентов на фиксацию ^{137}Cs и ^{85}Sr при цементировании модельного раствора ЖРО и прочности цементного компаунда (ЦК) с сорбционной добавкой. Оценка эффективности использования алюмосиликатных сорбентов в качестве добавки в ЦК проведена в сравнении с бентонитовой глиной (БГ) месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Россия), которая используется в практике обращения с кондиционированными РАО. Поскольку одним из основных компонентов химического состава ЖРО АЭС является нитрат натрия (NaNO_3), в качестве модельного раствора, имитирующего ЖРО, использовали данный раствор концентрацией 150 г/дм³, выбор которого обусловлен тем, что предельная концентрация NaNO_3 , обеспечивающая нормативную прочность цементного компаунда, составляет 150–200 г/дм³, выше которой происходит ее резкое падение.

В исследованиях использовались следующие образцы: ЦК0 – без сорбционной добавки; ЦК1 и ЦК2 – соответственно 5 и 10 мас. % сорбента АС-3и (фракция < 2 мкм) от массы портландцемента; ЦК3 и ЦК4 – соответственно 5 и 10 мас. % бентонитовой глины. Анализ данных, представленных на рисунке 4 показал, что при использовании сорбента в ЦК1 и ЦК2 в количестве 5–10 мас. % соответственно на 28-е сут эксперимента скорость выщелачивания ^{137}Cs составляет $1,9 \cdot 10^{-4}$ и $1,3 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·сут), что ниже нормативного значения (10^{-3} г/(см²·сут)) согласно ГОСТ Р 51833-2002. Скорость выщелачивания ^{137}Cs из ЦК с добавкой алюмосиликатного сорбента в количестве 5–10 мас. % в 3 раза

ниже, чем для бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Россия).

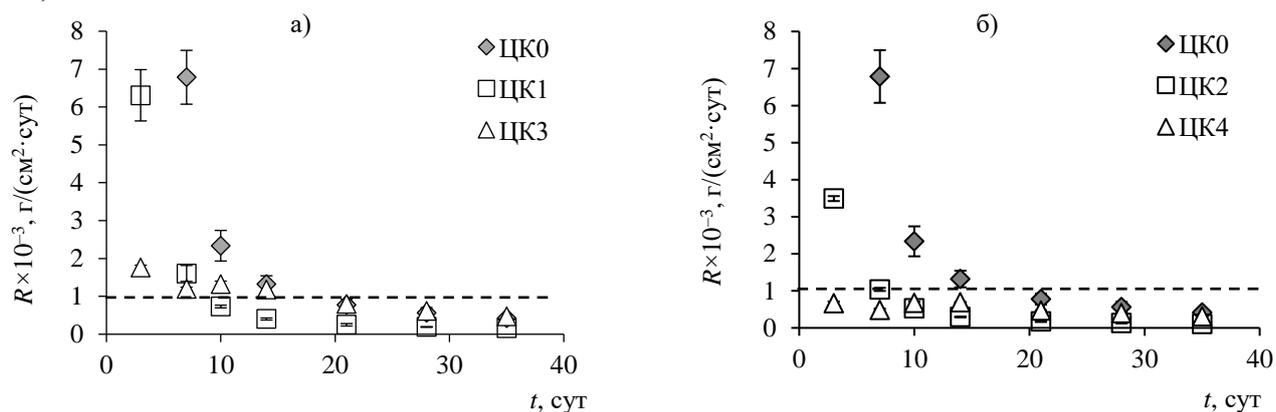


Рисунок 4 – Средняя скорость выщелачивания (R) ^{137}Cs из цементных компаундов с добавкой АС-3и (ЦК1 и ЦК 2) и БГ (ЦК3 и ЦК 4): а) – 5 мас. % АС-3и или БГ; б) 10 мас. % АС-3и или БГ

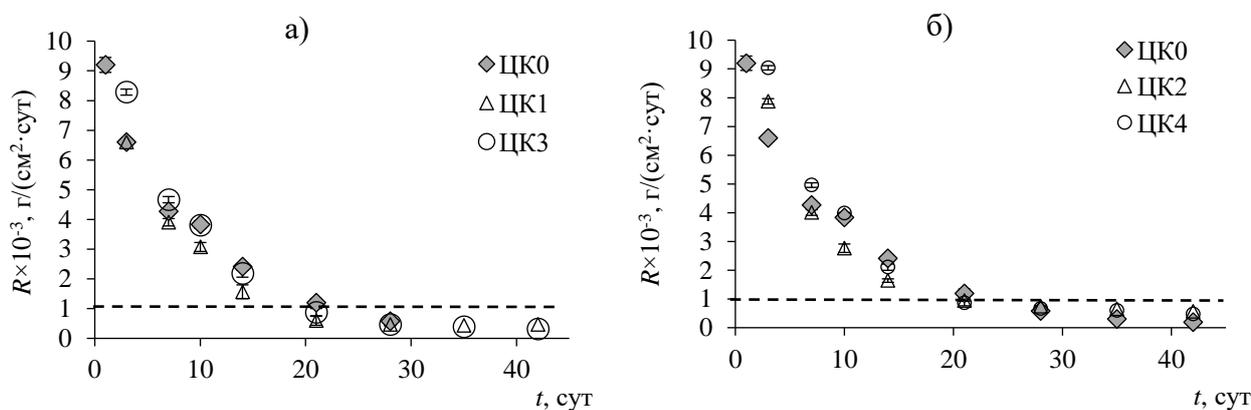


Рисунок 5 – Средняя скорость выщелачивания (R) ^{85}Sr из цементных компаундов с добавкой АС-3и (ЦК1 и ЦК 2) и БГ (ЦК3 и ЦК 4): а) – 5 мас. % АС-3и или БГ; б) 10 мас. % АС-3и или БГ

Результаты исследования выщелачивания ^{85}Sr из образцов ЦК с сорбционными добавками сорбента АС-3и и БГ, представленные на рисунке 5, показывают, что данные материалы практически не оказывают влияния на скорость выщелачивания ^{85}Sr из ЦК. Такое поведение ^{85}Sr связано с тем, что его фиксация происходит в основном за счет процесса замещения кальция на стронций в составе минералов цемента.

В результате оценки механической прочности на сжатие образцов ЦК с добавкой алюмосиликатных сорбентов в количестве 5–15 % от массы портландцемента на 28-е сут установлено, что наибольшей механической прочностью обладает образец ЦК без сорбционной добавки (таблица 5). Добавка сорбентов приводит к снижению данного показателя, однако полученные значения предела прочности на сжатие не ниже нормативного значения (4,9 МПа) согласно ГОСТ Р 51833-2002. Следовательно, алюмосиликатные сорбенты могут быть использованы при отверждении ЖРО, обеспечивая низкую скорость выщелачивания ^{137}Cs и соблюдение требований по механической прочности.

Таблица 5 – Прочностные характеристики цементных компаундов

Наименование показателя	Без добавки	АС-1о			АС-1м		
		5	10	15	5	10	15
Содержание добавки, мас. %	–	5	10	15	5	10	15
Предел прочности при сжатии, МПа	53,7	44,5	44,1	40,8	45,6	45,2	37,9

В пятой главе описаны существующие промышленные способы переработки ГСШ, возможные направления их использования для получения различной продукции, приведена схема получения алюмосиликатных сорбентов на основе ГСШ, которая может быть внедрена в рамках существующего технологического процесса на ОАО «Беларуськалий». В научном учреждении «ОИЭЯИ – Сосны» алюмосиликатные сорбенты испытаны и внедрены для очистки ЖРО и кондиционировании РАО в цементную матрицу (акты №2, № 3 от 17.05.2024).

Основными операциями для получения порошкообразного сорбента АС-о являются: водная обработка ГСШ, фильтрация, сушка и измельчение. Результаты расчета необходимого объема воды для обработки ГСШ, показал, что для промывки 1 т ГСШ необходимый объем воды составляет 25 м³. При этом финансовые затраты на водную обработку 1 т ГСШ технической водой данного объема составят 13,05 рублей, а питьевой – 43,11 рубля. Предварительный расчет затрат на изготовление алюмосиликатных сорбентов показал, что их стоимость ориентировочно составит 320,00–500,00 бел. руб. (100–150 долл. США) руб. за тонну. При этом согласно полученным данным стоимость алюмосиликатных сорбентов будет в несколько раз ниже стоимости клиноптиллолита, природной бентонитовой глины и синтетического цеолита NaA.

На 01.01.2023 объем накопленных в шламохранилищах ОАО «Беларуськалий» ГСШ составляет 133,9 млн т, а сумма экологического налога за их хранение составила порядка 139,3 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены новые данные о физико-химических свойствах глинисто-солевых шламов – промышленных отходах переработки сильвинитовой руды ОАО «Беларуськалий», свидетельствующие о перспективности их использования в качестве источника техногенного сырья для получения алюмосиликатных сорбентов, поскольку глинисто-солевые шламы содержат в своем составе мелкодисперсную фракцию частиц глинистого минерала иллита, обладающего пластинчатой структурой [1–А, 4–А].

2. Предложены способы обработки глинисто-солевых шламов для получения алюмосиликатных сорбентов, заключающиеся в их водной, кислотно-водной обработке и обогащении седиментационным методом. В результате водной обработки получены алюмосиликатные сорбенты (АС-о) с содержанием водорастворимых солей менее 1 г/дм³, кислотно-водной обработки – модифицированные алюмосиликатные сорбенты (АС-м) с повышенным содержанием глинистого минерала иллита в результате разрушения карбонатных минералов, а в результате обогащения – алюмосиликатные сорбенты с повышенным содержанием мелкодисперсной фракции глинистого минерала иллита (АС-3и) [1–А, 6–А, 11–А, 41–А]. Данные сорбенты могут быть применимы для очистки ЖРО от радионуклидов цезия и стронция [4–А, 5–А, 8–А, 9–А]. На алюмосиликатные сорбенты

разработаны технические условия ТУ ВУ 190341033.006-2024). На способ получения алюмосиликатного сорбента радионуклидов получен Евразийский патент № 031515 [41–А].

3. Установлено, что преобладающим глинистым минералом в составе алюмосиликатных сорбентов является иллит, содержание которого в зависимости от вида сорбента составляет от 42 до 89,2 % [4–А, 5–А]. Сорбция ^{137}Cs происходит на иллите, поскольку данный глинистый минерал имеет селективные сорбционные центры. Содержание фиксированных форм ^{137}Cs в образцах сорбентов изменяется от 74 до 82 % [4–А]. Значения потенциала связывания радиоцезия $\text{RIP}(\text{K})$ для образцов сорбентов составляют 3300–6600 ммоль/кг, увеличиваясь для сорбентов, полученных путем кислотного-водной обработки [7–А].

Применяемые способы водной, кислотного-водной обработки и обогащения влияют на качественный состав алюмосиликатных сорбентов, их физико-химические и сорбционные свойства в отношении радионуклида ^{137}Cs . Водная и кислотного-водная обработка глинисто-солевых шламов приводят к изменению химического и минерального состава алюмосиликатных сорбентов и, как следствие, к повышению коэффициента распределения ^{137}Cs в 5–82 раза (в зависимости от вида обработки) по сравнению с исходными образцами глинисто-солевых шламов [6–А, 7–А, 10–А, 11–А]. Для обогащенного алюмосиликатного сорбента АС-3и значения коэффициента распределения ^{137}Cs в растворе нитрата натрия концентрацией 0,1 и 1 моль/дм³ увеличиваются в 2 раза по сравнению с образцом сорбента АС-3о [5–А].

Сорбция ^{85}Sr (аналог ^{90}Sr) алюмосиликатным сорбентом из водного раствора наиболее эффективна при рН более 6 и достигает максимального значения K_d ^{85}Sr , равного $2,2 \cdot 10^3$ дм³/кг [8–А, 9–А]. В высокосолевом растворе (концентрация нитрата натрия 100–250 г/дм³) сорбция ^{85}Sr практически отсутствует. Для обогащенного алюмосиликатного сорбента АС-3и значение коэффициента распределения ^{90}Sr в водопроводной воде увеличивается в 20 раз по сравнению с образцом сорбента АС-3о. На сорбцию ^{90}Sr образцом сорбента оказывает влияние катион Ca^{2+} , являющийся его химическим аналогом, при концентрации которого в растворе 10 ммоль/дм³ коэффициент распределения ^{90}Sr снижается в 46 раз по сравнению с раствором ^{85}Sr с использованием водопроводной воды [5–А].

4. Обоснована возможность использования алюмосиликатных сорбентов для извлечения радионуклида ^{137}Cs из модельных растворов ЖРО. Присутствие в модельных растворах ЖРО солей NaNO_3 и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ концентрацией 0,1 моль/дм³, трилона Б концентрацией 0,01 моль/дм³, борной кислоты концентрацией 0,1 и 1 моль/дм³ не оказывает значимого влияния на сорбцию ^{137}Cs (коэффициент распределения K_d $^{137}\text{Cs} > 10^3$ дм³/кг). Повышение концентрации солей в модельных растворах ЖРО до 1 моль/л приводит к снижению значений K_d ^{137}Cs на порядок. Наибольшее влияние на сорбцию ^{137}Cs оказывает присутствие в растворе катиона K^+ , являющегося аналогом ^{137}Cs и создающим конкуренцию за места селективной сорбции [3–А, 4–А].

5. Экспериментально полученные показатели сорбции ^{137}Cs для образцов алюмосиликатных сорбентов подтверждают их высокую эффективность в системе «алюмосиликатный сорбент – радиоактивный раствор», при этом коэффициент

распределения ^{137}Cs для них в 5–20 раз выше по сравнению с известными образцами природных бентонитовых глин России, Азербайджана, Казахстана [3–А].

6. Установлено, что алюмосиликатные сорбенты могут использоваться в качестве сорбционной добавки в цементные компаунды при кондиционировании жидких радиоактивных отходов, поскольку скорость выщелачивания ^{137}Cs из цементных компаундов снижается в 3 раза по сравнению с образцами без внесения сорбентов при одновременном соблюдении нормативных требований к цементному компаунду по механической прочности [2–А, 40–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. В зависимости от способа обработки полученные алюмосиликатные сорбенты могут использоваться для очистки низкосолевых (водные растворы и растворы с концентрацией солей до 10 г/дм^3) низко- и среднеактивных ЖРО (соответственно удельная активность бета-излучающих радионуклидов менее 10^3 Бк/г и от 10^3 до 10^7 Бк/г) от радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr , в качестве сорбционной добавки в цементные компаунды при кондиционировании жидких радиоактивных отходов, а также в составе инженерных барьеров безопасности (буферная засыпка) пунктов захоронения радиоактивных отходов.

2. Создание на ОАО «Беларуськалий» опытно-промышленного производства алюмосиликатных сорбентов на основе глинисто-солевых шламов, используемых в качестве источника техногенного сырья, позволит создать в Республике Беларусь собственное производство алюмосиликатных сорбентов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, соответствующие п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. **Леонтьева, Т.Г.** Перспективы использования глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для очистки водных сред и экосистем от радиоцезия / Т.Г. Леонтьева, Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай // Труды БГТУ. – 2016. – № 3: Химия и технология неорган. в-в. – С. 74–80.

2. Анализ влияния алюмосиликатных сорбентов на иммобилизацию ^{137}Cs в цементном компаунде и его механическую прочность / **Т. Г. Леонтьева**, Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, Н.А. Маковская // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 76–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-76-88>

3. **Леонтьева, Т.Г.** Использование алюмосиликатных сорбентов для очистки модельных растворов, имитирующих жидкие радиоактивные отходы АЭС / Т. Г. Леонтьева, Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай // Энергетическая стратегия. – 2024. – № 3 (99). – С. 39–43.

Статьи в зарубежных научных изданиях, включенных в перечень ВАК России и индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science

4. Извлечение радионуклидов цезия из водных сред алюмосиликатным сорбентом, полученным из промышленных отходов ОАО «Беларуськалий» /

Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, **Т.Г. Леонтьева**, Н.А. Маковская // Радиохимия. – 2019. – Т. 61, № 4. – С. 334–338.

5. Алюмосиликатные сорбенты на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для сорбции радионуклидов цезия и стронция / Л.Н. Москальчук, В.В. Милютин, Н.А. Некрасова, **Т.Г. Леонтьева**, А.А. Баклай, П.Е. Белоусов, В.В. Крупская // Радиохимия. – 2020. – Т. 62, № 3. – С. 228–233.

6. Сорбция $^{137}\text{Cs}^+$ из водных сред иллитсодержащим сорбентом, полученным из глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» / А.А. Баклай, Л.Н. Москальчук, **Т.Г. Леонтьева**, Н.А. Маковская // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – № 4. – С. 366–371.

7. Maskalchuk, L. Chemical and mineralogical aspects of clay-salt slimes of "Belaruskali" using for the preparation of nanostructured sorbents of radionuclides / L. Maskalchuk, A. Baklay, **T. Leontieva** // Procedia Chemistry. – 2016. – Vol. 21. – P. 394–400.

8. Clay-salt slimes from the JSC "Belaruskali" as potential engineering barriers in the radioactive waste repositories: sorption of Cs(I), Sr(II), Eu(III) and Am(III) / L. Fuks, I. Herdzik-Koniecko, L. Maskalchuk, **T. Leontieva** // Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2018. – Vol. 15. Issue 10. – P. 2047–2058. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1597-3>.

9. Clay-salt slimes of the "Belaruskali" – novel sorbents for management of liquid radioactive wastes and decontamination of environmental water streams / L. Fuks, L. Maskalchuk, I. Herdzik-Koniecko, **T. Leontieva** // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2019. – Vol. 320. Issue 1. – P. 87–100.

Статьи в других зарубежных научных изданиях, не включенных в перечень ВАК

10. Сорбенты радионуклидов на основе промышленных отходов: физико-химические свойства и перспективы использования / О.Б. Котова, Л.Н. Москальчук, Д.А. Шушков, **Т.Г. Леонтьева**, А.А. Баклай // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2017. – № 4. – С. 29–36.

11. Состав, структура и селективная сорбция ионов цезия алюмосиликатным сорбентом, полученным из отходов калийного производства ОАО «Беларуськалий» / **Т.Г. Леонтьева**, Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, Н.А. Маковская // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2018. – № 5. – С. 726–735.

Материалы конференций

12. Физико-химические свойства глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» и перспективы их использования в качестве сорбентов радионуклидов / Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, **Т.Г. Леонтьева**, А.В. Кушнер // Сахаровские чтения 2013 года: экологические проблемы XXI века: материалы 13-ой международн. науч. конф., 16–17 мая 2013 г., г. Минск, Республика Беларусь / МГЭУ им. А.Д. Сахарова; под общ. ред. С.П. Кундаса, С.С. Позняка, Н.А. Лысухо. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2013. – С. 233–234.

13. Москальчук, Л.Н. Химико-минералогическое обоснование применения глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» в качестве сырья для производства сорбентов радионуклидов / Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, **Т.Г. Леонтьева** // Энергоэффективность и ресурсосбережение: материалы Белорусско-Германского

семинара, 3–5 июня 2013 г., г. Минск, Республика Беларусь / ГП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». – Минск: БНТУ, 2013. – С. 39–41.

14. Проблема накопления промышленных отходов на ОАО «Беларуськалий» и перспективы ее решения / Москальчук Л.Н., Баклай А.А., **Леонтьева Т.Г.**, Кушнер А.В. // Сахаровские чтения 2014 года: экологические проблемы XXI века: материалы 14-ой междунар. науч. конф., 29–30 мая 2014 г., г. Минск, Республика Беларусь. / МГЭУ им. А.Д. Сахарова; под общ. ред. С.П. Кундаса, С.С. Позняка, Н.А. Лысухо. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2014. – С. 246–247.

15. **Леонтьева, Т.Г.** Физико-химические свойства и селективная сорбционная способность глинисто-солевых шламов по отношению к ^{137}Cs / Т.Г. Леонтьева // ЛОМОНОСОВ-2015: материалы Междунар. молодеж. науч. форума, 13–17 апр. 2015 г., г. Москва, Россия / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. – М.: МАКС Пресс, 2015. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2015/data/section_32_7116.htm. – Дата доступа: 15.05.2015.

16. **Леонтьева, Т.Г.** Селективная сорбция ^{137}Cs модифицированными образцами глинисто-солевых шламов // Т.Г. Леонтьева, Л.Н. Москальчук // Сахаровские чтения 2015 года: экологические проблемы XXI-го века: материалы 15-ой Междунар. науч. конф. 21–22 мая 2015 г., г. Минск, Республика Беларусь // МГЭУ им. А.Д. Сахарова, Минск. – С. 215–216.

17. **Леонтьева, Т.Г.** Использование глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для очистки водных сред от радиоцезия // Т.Г. Леонтьева, Л.Н. Москальчук // Сахаровские чтения 2016 года: экологические проблемы XXI-го века: материалы 16-ой Междунар. науч. конф. 19–20 мая 2016 г., г. Минск, Республика Беларусь // МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск. – С. 225–226.

18. Москальчук, Л.Н. Наноструктурированные сорбенты радионуклидов на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для ядерной энергетики и сельского хозяйства / Л.Н. Москальчук, **Т.Г. Леонтьева** // «Сотрудничество-катализатор инновационного роста»: материалы 2-го Белорусско-Прибалтийского форума, 6–7 окт. 2016 г., г. Минск, Республика Беларусь // БНТУ «Политехник», Минск. – С. 31–32.

19. **Леонтьева, Т.Г.** Сорбция радиоцезия глинисто-солевыми шламами ОАО «Беларуськалий» / Т.Г. Леонтьева // Актуальные проблемы адсорбции: материалы III Всероссийск. конф. с междунар. участием, 17–21 окт. 2016 г., г. Москва, Россия // ИФХЭ РАН, г. Москва. – С. 189–190.

20. **Леонтьева, Т.Г.** Использование глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для получения сорбентов радионуклидов // Т.Г. Леонтьева, Л.Н. Москальчук // Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2017: environmental problems of the XXI century: материалы 17-й Междунар. науч. конф. 18–19 мая 2017 г., г. Минск, Республика Беларусь: в 2 ч. // Междунар. гос. экол. ин-т им. А.Д. Сахарова Бел. гос. ун-та; редкол.: С.С. Головатый [и др.]; под ред. д-ра ф.-м. н., проф. С.А. Маскевича, д-ра с.-х. н., проф. С.С. Позняка. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – Ч. 2. – С. 147–148.

21. **Leontieva, T.G.** Sorption of ^{137}Cs on aluminosilicate sorbents based on clay-salt slimes of JSC “Belaruskali” / T.G. Leontieva, L.N. Maskalchuk // Radionuclides

as Tracers of Environmental Processes (ENVIRA2017): Proceeding of the 4th International Conference on Environmental Radioactivity, May 29 – June 02, 2017, Vilnius, Lithuania // Centre for Physical Sciences and Technology; Editors: G. Lujaniene and P.P. Povinac. – P. 286.

22. Сорбция радиоцезия алюмосиликатными сорбентами на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» / Л.Н. Москальчук, **Т.Г. Леонтьева**, А.А. Баклай, Е.О. Прокопьев, В.В. Гацко // Актуальные проблемы радиохимии и радиоэкологии – 2017: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., 15–17 нояб. 2017 г.; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – С. 37–39.

Тезисы докладов

23. Москальчук, Л.Н. Разработка технологии получения композиционных материалов многоцелевого назначения на основе глинисто-солевых шламов (отходов калийного производства) и их использование в ядерной энергетике и сельском хозяйстве / Л. Н. Москальчук, А.А. Баклай, **Т.Г. Леонтьева** // Россия – Беларусь – Сколково: единое инновационное пространство: тез. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 19 сент. 2012 г. / Нац. акад. наук Беларуси; НКО Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий (Фонд «Сколково»); редкол.: С.Я. Килин [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2012. – С. 410–411.

24. Сорбционное концентрирование радиоцезия сорбентом, полученным из отходов калийного производства / Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, **Т.Г. Леонтьева**, М.И. Лемутова // Радиохимия-2012: тез. докл. VII Российской конференции по радиохимии, Димитровград, Россия, 15–19 окт. 2012 г. – Димитровград: ООО «ВДВ «ПАК», 2012. – С. 258.

25. Москальчук, Л.Н. Химико-минералогическое обоснование применения глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» в качестве сырья для производства сорбентов радионуклидов / Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, **Т.Г. Леонтьева** // Технологические тенденции повышения промышленной экологической безопасности, охраны окружающей среды, рациональной и эффективной жизнедеятельности человека: тез. докл. Междунар. науч.-практич. конф. с участием государств-участников СНГ, 15–16 мая 2013 г., г. Минск, Республика Беларусь / КМЦ ГКНТ; под ред. Кратенка В. Е. [и др.]. – Минск: ГУ «БелИСА», 2013. – С. 415–419.

26. Perspective of clay-salt slimes using as a sorbent of radionuclide and for safety disposal of radioactive waste / L.N. Maskalchuk, A.A. Baklay, **T.G. Leontieva**, D.K. Stralenka // Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement: abstracts 6th International conference, Brussels, Belgium, March 23–26 2015 [Электронный ресурс]. – 2015. – P. 742–743. – Режим доступа: http://www.clay-conferencebrussels2015.com/gallery/documents/Book_of_Abstracts_ClayConferenceBrussels2015.pdf. – Дата доступа: 25.02.2015.

27. Maskalchuk, L. Use of clay-salt slimes of JSC “Belaruskali” as sorbents of radionuclides and for safe disposal of radioactive waste / L. Maskalchuk, A. Baklay, **T. Leontieva** // ATALANTE 2016 – Nuclear Chemistry for Sustainable Fuel Cycles: book of abstract, 5–10 June 2016, Montpellier, France. – 2016. – P. 237.

28. Леонтьева, Т.Г. Сорбенты радиоцезия на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» / **Т.Г. Леонтьева** // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления: тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф., 19–21 окт. 2016 г. г. Минск //БГТУ, г. Минск. – С. 178–181.

29. Леонтьева, Т.Г. Получение сорбентов радионуклидов на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» / **Т.Г. Леонтьева**, Л.Н. Москальчук // Техногенные системы и экологический риск: тез. докл. I Междунар. (XIV Регионал.) научной конф., 20–21 апр. 2017 г. // ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия. – С. 9–11.

30. Leontieva, T. Raw materials of Belarus for safe storage and disposal of radioactive waste / **T. Leontieva**, D. Korob, E. Prokopiev, V. Gatsko // Scientific Research Abstracts XVI International Clay Conference – ICC 2017, Granada, Spain 17–21 July 2017; Spanish Clay Society (SEA). – Vol 7. – P. 470.

31. Modification of clay-salt slimes of JSC “Belaruskali” for preparation of aluminosilicates sorbents of radionuclides / L. Maskalchuk, **T. Leontieva**, E. Prokopiev, V. Gatsko // abstracts Book 5th International Nuclear Chemistry Congress, Aug. 27 – Sep. 1 2017, Gothenburg, Sweden; Chalmers University of Technology. – P. 38.

32. Maskalchuk, L. N. Application of natural raw materials and industrial wastes of Belarus for radioactive waste disposal / L. N. Maskalchuk, **T. G. Leontieva**, A. A. Baklay, D. K. Korob // Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement (Clay Conference 2017): book of abstracts 7th International Conference, Sept. 24–27, 2017, Davos, Switzerland. – P. 232–233.

33. Леонтьева, Т. Г. Оценка эффективности глинисто-солевых шламов в качестве сорбентов радионуклидов / **Т.Г. Леонтьева**, Л.Н. Москальчук // тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, научных сотр. и аспирантов (с междунар. участием), 1–14 февр. 2018 г., г. Минск, Республика Беларусь // БГТУ, Минск. – С. 148–149.

34. Maskalchuk, L. Nanostructured aluminosilicate sorbents of radionuclides based on clay-salt slimes of JSC “Belaruskali”: physicochemical properties and application / L. Maskalchuk, **T. Leontieva**, A. Baklay // RadChem 2018: book of abstracts, May. 13–18, 2018, Marianske Lazne, Czech Republic. – P. 143–144.

35. **Леонтьева, Т.Г.** Алюмосиликатные сорбенты из отходов калийного производства / Т.Г. Леонтьева // Техногенные системы и экологический риск: тез. докл. II Междунар. (XV Региональной) науч. конф., 19–20 апр. 2018 г., г. Обнинск, Россия / Под общ. ред. А.А. Удаловой. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 55–56.

36. Москальчук, Л.Н. Наноструктурированные алюмосиликатные сорбенты радионуклидов на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» / Л.Н. Москальчук, **Т.Г. Леонтьева**, А.А. Баклай // Радиохимия 2018: тез. докл. IX Российской конф. с междунар. участием, 17–21 сент. 2018 г., г. Санкт-Петербург, Россия. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 426.

37. Москальчук, Л.Н. Наноструктурированные алюмосиликатные сорбенты на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий»: структурные особенности, ионообменные и селективные свойства / Л.Н. Москальчук, **Т.Г. Леонтьева**, А.А. Баклай // Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI

века: тез. докл. VII Междунар. конф., 23–26 окт. 2018 г. Минск, Республика Беларусь // Научное учреждение «ОИЭЯИ – Сосны», Минск. – С. 24.

38. Наноструктурированные алюмосиликатные сорбенты радионуклидов на основе глинисто-солевых шламов для ядерной энергетики / Л.Н. Москальчук, **Т.Г. Леонтьева**, А.А. Баклай, Н.А. Маковская // Современное состояние и направления развития технологий, машинного и аппаратного обеспечения, эколого-безопасного природопользования и переработки промышленных отходов горнопромышленных комплексов на территории Евразийского экономического пространства: материалы докл. науч.-практ. конф., 5–6 сент. 2019 г., Минск – Солигорск, Республика Беларусь // БГТУ, Минск. – С. 80–84.

39. Исследование сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr иллитом, выделенным из глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» / А.А. Баклай, Л.Н. Москальчук, **Т.Г. Леонтьева**, Н.А. Маковская // Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: тез. докл. VIII Междунар. конф., 23–26 июня 2020 г., г. Минск / Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2020. – С. 24–25.

40–А. Исследование влияния алюмосиликатного иллитсодержащего сорбента на связывание ^{137}Cs и ^{85}Sr в составе цементной матрицы / **Т.Г. Леонтьева**, Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, Н.А. Маковская // «ГЛИНЫ-2023»: тез. докл. VI Рос. совещания по глинам и глинистым минералам, 13–16 июн. 2023 г., г. Санкт-Петербург / ИГГД РАН. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 203–205.

Патент

41. Способ получения алюмосиликатного сорбента радионуклидов: Евразийский пат. 031515, МПК (2006) В01J 20/30, В01J 20/12, В01J 20/16 / Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, **Т.Г. Леонтьева**. – № 201700296; заявл. 06.06.2017; опубл. 31.01.2019 / Евразийская патентная организация. – 2019. – 5 с.

42. Сорбент алюмосиликатный: ТУ ВУ 190341033.006-2024: введ. 09.07.2024. – Минск: Белорус. Гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2024. – 10 с.

РЭЗІЮМЭ

Лявонцьева Таццяна Генадзьеўна

Алюмасілікатныя сарбенты, атрыманыя на аснове глініста-солевых шламаў ААТ «Беларуськалі» для бяспечнага абыходжання з вадкімі радыеактыўнымі адходамі

Ключавыя словы: глініста-солевыя шламы, алюмасілікатныя сарбенты, іліт, радыенукліды, сорбцыя, вадкія радыеактыўныя адходы, цэментныя кампаўнды.

Мэта работы – навуковае абгрунтаванне магчымасці выкарыстання алюмасілікатных сарбентаў, атрыманых на аснове глініста-солевых шламаў, для ачысткі і кандыцыянавання нізка-і сярэднеактыўных вадкіх радыеактыўных адходаў.

Метады даследавання – хімічны аналіз, рэнтгенафазавы аналіз, сканавальная электронная мікраскапія, термогравіметрычны аналіз, метады лазернай дыфракцыі, метады БЭТ, сарбцыйны метады.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

Распрацаваны спосабы атрымання алюмасілікатных сарбентаў радыенуклідаў на аснове глініста-солевых шламаў – прамысловых адходаў, якія ўтвараюцца ў выніку перапрацоўкі сільвінітавай руды на ТАА "Беларуськалі", якія заключаюцца ў воднай, кіслотна-воднай апрацоўцы і ўзбагачэнні глініста-солевых шламаў. Усталяваны фазавы, хімічны і грануламетрычны склад, марфалагічныя асаблівасці, удзельная паверхня глініста-солевых шламаў і алюмасілікатных сарбентаў. Праведзена комплексная ацэнка іх селектыўных і сарбцыйных уласцівасцей адносна радыенуклідаў ^{137}Cs і ^{85}Sr . Праведзена ацэнка эфектыўнасці сорбцыі ^{137}Cs алюмасілікатнымі сарбентамі з мадэльных раствораў, якія імітуюць вадкія радыеактыўныя адходы, і выкананы параўнальны аналіз сарбцыйных уласцівасцяў ў дачыненні да ^{137}Cs алюмасілікатных сарбентаў і аналагічных матэрыялаў прыроднага паходжання. Устаноўлена перспектыўнасць выкарыстання глініста-солевых шламаў у якасці другаснага мінеральнага рэсурсу для атрымання алюмасілікатных сарбентаў, прызначаных для ачысткі вадкіх радыеактыўных адходаў ад ^{137}Cs і ^{85}Sr , выкарыстання ў якасці сарбцыйнай дабаўкі ў матрычныя матэрыялы.

Навізна атрыманых вынікаў заключаецца ва ўстанаўленні заканамернасцей сорбцыі ^{137}Cs і ^{85}Sr узорами глініста-солевых шламаў ТАА «Беларуськалі» і алюмасілікатных сарбентаў на іх аснове, умоў аптымальнай ачысткі мадэльных радыеактыўных раствораў узорами сарбентаў, распрацоўцы спосабу атрымання нізка- і сярэднеактыўнымі вадкімі радыеактыўнымі адходамі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: выкарыстанне глініста-салявых шламаў ААТ «Беларуськалі» у якасці крыніцы тэхнагеннай сыравіны для атрымання алюмасілікатных сарбентаў; стварэнне вопытна-прамысловай вытворчасці сарбентаў радыенуклідаў на аснове глініста-салявых шламаў.

Галіна выкарыстання – ачыстка вадкіх радыеактыўных адходаў і іх кандыцыянаванне ў арганізацыях па абыходжанні з радыеактыўнымі адходамі.

РЕЗЮМЕ

Леонтьева Татьяна Геннадьевна

Алюмосиликатные сорбенты, полученные на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для безопасного обращения с жидкими радиоактивными отходами

Ключевые слова: глинисто-солевые шламы, алюмосиликатные сорбенты, иллит, радионуклиды, сорбция, жидкие радиоактивные отходы, цементные компаунды.

Цель работы – научное обоснование возможности использования алюмосиликатных сорбентов, полученных на основе глинисто-солевых шламов, для очистки и кондиционирования низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов.

Методы исследования – химический анализ, рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, термогравиметрический анализ, метод лазерной дифракции, метод БЭТ, сорбционный метод.

Полученные результаты и их новизна:

Разработаны способы получения алюмосиликатных сорбентов радионуклидов на основе глинисто-солевых шламов – промышленных отходов, образующихся в результате переработки сильвинитовой руды на ОАО «Беларуськалий», заключающиеся в водной, кислотно-водной обработке и обогащении глинисто-солевых шламов. Установлен фазовый, химический и гранулометрический состав, морфологические особенности, удельная поверхность глинисто-солевых шламов и алюмосиликатных сорбентов. Проведена комплексная оценка их селективных и сорбционных свойств в отношении радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr . Проведена оценка эффективности сорбции ^{137}Cs алюмосиликатными сорбентами из модельных растворов, имитирующих жидкие радиоактивные отходы, и выполнен сравнительный анализ сорбционных свойств в отношении ^{137}Cs алюмосиликатных сорбентов и аналогичных материалов природного происхождения. Установлена перспективность использования глинисто-солевых шламов в качестве вторичного минерального ресурса для получения алюмосиликатных сорбентов, предназначенных для очистки жидких радиоактивных отходов от ^{137}Cs и ^{85}Sr , использования в качестве сорбционной добавки в матричные материалы.

Новизна полученных результатов заключается в установлении закономерностей сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr образцами глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» и алюмосиликатных сорбентов на их основе, условий оптимальной очистки модельных радиоактивных растворов образцами сорбентов, разработке способа получения алюмосиликатных сорбентов для безопасного обращения с низко- и среднеактивными жидкими радиоактивными отходами.

Рекомендации по использованию: использование глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» в качестве источника техногенного сырья для получения алюмосиликатных сорбентов; создание опытно-промышленного производства сорбентов радионуклидов на основе глинисто-солевых шламов.

Область применения – очистка жидких радиоактивных отходов и их кондиционирование в организациях по обращению с радиоактивными отходами.

SUMMARY

Leont'eva Tat'yana Gennad'evna

Aluminosilicate sorbents obtained from clay-salt slimes from JSC Belaruskali for the safe management of liquid radioactive waste

Keywords: clay-salt slimes, aluminosilicate sorbents, illite, radionuclides, sorption, liquid radioactive waste, cement compounds.

The aim of the study – scientific substantiation of the possibility of using aluminosilicate sorbents obtained on the basis of clay-salt slimes for the purification and conditioning of low- and intermediate-level liquid radioactive waste.

Research methods – chemical analysis, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, thermogravimetric analysis, laser diffraction method, BET method, sorption method.

The results obtained and their novelty:

Methods have been developed for producing aluminosilicate sorbents of radionuclides based on clay-salt slimes – industrial waste generated as a result of processing of sylvinitic ore at JSC Belaruskali, which consists of water, acid-water processing and enrichment of clay-salt slimes. The phase, chemical and granulometric composition, morphological features, specific surface area of clay-salt slimes and aluminosilicate sorbents have been established. A comprehensive assessment of their selective and sorption properties with respect to ^{137}Cs and ^{85}Sr radionuclides was carried out. The efficiency of sorption of ^{137}Cs by aluminosilicate sorbents from model solutions simulating liquid radioactive waste was assessed, and a comparative analysis of the sorption properties of ^{137}Cs aluminosilicate sorbents and similar materials of natural origin was performed. The prospects of using clay-salt slimes as a secondary mineral resource for the production of aluminosilicate sorbents intended for purification of liquid radioactive waste from ^{137}Cs and ^{85}Sr , and use as a sorption additive in matrix materials have been established.

The novelty of the results obtained lies in the establishment of patterns of sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr by samples of clay-salt slimes of JSC "Belaruskali" and aluminosilicate sorbents based on them, the conditions for optimal purification of model radioactive solutions with samples of sorbents, the development of a method for producing aluminosilicate sorbents for the safe handling of low - and intermediate level liquid radioactive waste.

Industrial application: use of clay-salt slimes of JSC "Belaruskali" as a source of technogenic raw materials for the production of aluminosilicate sorbents; creation of pilot industrial production of radionuclide sorbents based on clay-salt slimes.

The sphere of application – purification of liquid radioactive waste and its conditioning in radioactive waste management organizations.