

*На правах рукописи*



**БЛИНОВА Марина Олеговна**

**ФЕРРОЦИАНИДНЫЕ СОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ  
АЛЮМОСИЛИКАТОВ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ РАДИОАКТИВНО-  
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата химических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре радиохимии и прикладной экологии ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: кандидат химических наук, доцент  
**Воронина Анна Владимировна**

Официальные оппоненты: **Милютин Виталий Витальевич,**  
доктор химических наук, старший научный сотрудник,  
ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им.  
А.Н. Фрумкина РАН (г. Москва), заведующий  
лабораторией хроматографии радиоактивных элементов;

**Железнов Вениамин Викторович,**  
доктор технических наук, ФГБУН Институт химии  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(г. Владивосток), ведущий научный сотрудник  
лаборатории сорбционных процессов

Ведущая организация: ФГБУН Институт химии твердого тела Уральского  
отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Защита состоится «14» ноября 2017 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.09 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=271534>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Семенищев Владимир Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одним из важных достижений прошлого века стало открытие радиоактивности, изучение этого явления и практического применения в области ядерной энергетики. Перед руководителями атомных проектов во всем мире стояли непростые задачи: в короткие сроки разработать новое направление в промышленности и в науке. Во время испытаний ядерного оружия, в процессе работы ядерных реакторов, при хранении отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов не удалось избежать загрязнения радионуклидами окружающей среды. Вклад в загрязнение внесли крупнейшие аварии на предприятиях ядерного топливного цикла: на Чернобыльской АЭС, на АЭС «Фукусима Даичи», на предприятии ПО «Маяк».

Так возникла необходимость в проведении реабилитационных мероприятий, включающих очистку водных объектов (озер, рек, водохранилищ, питьевых источников), ремедиацию почв, переработку радиоактивных отходов. Среди техногенных радионуклидов наиболее опасными, вносящими вклад в загрязнение окружающей среды в долгосрочной перспективе, являются  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Последние два радионуклида имеют большие периоды полураспада – около 30 лет, химические аналоги в природных водах и почвах, что позволяет им легко мигрировать и накапливаться в объектах окружающей среды.

После аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в апреле 1986 года площадь, загрязненная  $^{137}\text{Cs}$  составила почти 200 тыс. км<sup>2</sup> [1]. Вследствие аварии на предприятии ПО «Маяк» в 1957 году образовался Восточно-Уральский радиоактивный след и оказалась загрязненной территория в 23 тыс. км<sup>2</sup> [1]. После землетрясения в Японии и аварии на АЭС «Фукусима Даичи» (ФДАЭС) в марте 2011 года произошло загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  территории в 1,3 тыс. км<sup>2</sup> [2].

Для реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий могут быть использованы недорогие и доступные сорбционные материалы. Среди природных материалов большое количество разработанных месторождений во многих странах имеют алюмосиликаты. Улучшить их сорбционные свойства по отношению к радионуклидам цезия можно методом поверхностного модифицирования. Интерес в качестве модифицирующих фаз представляют ферроцианиды переходных металлов, обладающие высокой радиационной устойчивостью, высокими коэффициентами распределения цезия. Получение модифицированных ферроцианидных сорбентов, обладающих высокой специфичностью, селективностью и необратимостью сорбции радионуклидов цезия,

высокой эффективностью удержания для предотвращения миграции радиоцезия в окружающей среде является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (грант № 14.А18.21.0313), базовой части государственных заданий Минобрнауки РФ высшим учебным заведениям в сфере научной деятельности (тема № Н 976.425.009/12), гранта РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-00018 мол\_а.

### **Степень разработанности темы исследования**

В настоящее время проблеме реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий уделяется большое внимание. События на АЭС «Фукусима Даичи» в Японии ещё раз показали, что даже находящаяся на высоком уровне технологического развития страна не имеет собственных научных разработок в этой области.

Вследствие чрезвычайной сложности решаемых задач нет простых и эффективных методов реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий. Интерес представляет сорбционный метод реабилитации, однако для работы в условиях природных систем необходимы дешёвые, эффективные и экологически безопасные сорбенты.

Существует большое количество природных сорбционных материалов, а также разработаны искусственные сорбционные материалы, но все они малоприменимы для решения задач реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий. Природные сорбенты дешевы, но недостаточно эффективны. Искусственные сорбенты обладают более высокими сорбционными характеристиками, чем природные, но высокой стоимостью, экологической небезопасностью. Поэтому искусственные сорбенты не применяют для реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что разработка новых сорбционных материалов на основе природных алюмосиликатов перспективна для реабилитации территорий, загрязнённых радионуклидами цезия, исследование их физико-химических свойств и выбор условий применения для очистки водных сред и ремедиации почв представляет научный и практический интерес.

**Цель работы.** Разработка сорбционных материалов на основе природных алюмосиликатов для реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Получить поверхностно-модифицированные ферроцианидные сорбенты на основе природных алюмосиликатов (глауконит, клиноптилолит), исследовать их состав и структуру;
2. Исследовать сорбционные характеристики по отношению к цезию природных и модифицированных алюмосиликатов в условиях статики и кинетики, описать механизмы сорбции;
3. Исследовать химическую устойчивость насыщенных цезием образцов природных и модифицированных алюмосиликатов, а также оценить экологическую безопасность использования разработанных сорбентов;
4. Предложить метод реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий с целью их введения в сельскохозяйственное использование.

#### **Научная новизна работы:**

– Разработаны поверхностно-модифицированные ферроцианидные сорбенты на основе природных алюмосиликатов: клиноптилолита и глауконита. Показано влияние модифицирования на пористость, текстуру поверхности и термическую устойчивость алюмосиликатов.

– Впервые получены и описаны изотермы сорбции цезия модифицированными ферроцианидами образцами глауконита и клиноптилолита в широком диапазоне концентраций, определены коэффициенты распределения, статические обменные ёмкости. Показано, что модифицированные сорбенты являются полифункциональными и обладают 2-3 типами сорбционных центров. Специфичность к цезию модифицированных сорбентов в 100-1000 раз превышает специфичность природных глауконита и клиноптилолита.

– Описаны механизмы сорбции цезия природными и модифицированными алюмосиликатами, определены константы скорости сорбции и коэффициенты диффузии. Установлено, что сорбцию цезия ферроцианидными сорбентами на основе природных алюмосиликатов лимитирует диффузия цезия в порах сорбента различного размера с вкладом химической реакции.

– Впервые определены степени и скорости выщелачивания  $^{137}\text{Cs}$  из насыщенных до удельной активности  $6 \cdot 10^2$  и  $5 \cdot 10^{10}$  Бк/г образцов природных и модифицированных алюмосиликатов природными водами с различной минерализацией. Показано, что смешанные ферроцианиды никеля-калия на основе клиноптилолита (НКФ-Кл) и глауконита (НКФ-Гл) являются эффективными матрицами для иммобилизации радионуклидов цезия. Выщелачивание  $^{137}\text{Cs}$  из сорбентов НКФ-Кл и НКФ-Гл в условиях

ремедиации почв пресной и слабоминерализованной водой составляет соответственно, %: 1,6 и 2,0; 14,6 и 1,5. Скорости выщелачивания цезия не превышают величин, указанных в ГОСТ Р 51883-2002 для отверждённых среднеактивных отходов и ГОСТ Р 50926-96 для отверждённых высокоактивных отходов.

– Впервые установлено влияние концентрации катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  в растворе в диапазоне от  $10^{-4}$  до 2 моль/л на коэффициенты распределения цезия природными и модифицированными глауконитом и клиноптилолитом. Показано, что природные алюмосиликаты уступают по специфичности к цезию в присутствии элементов-аналогов всем модифицированным сорбентам. Самой высокой специфичностью в присутствии аналогов обладает сорбент НКФ-Кл.

– Впервые исследовано влияние ферроцианидных сорбентов на основе глауконита и клиноптилолита на переход  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в сельскохозяйственные растения. Снижение перехода цезия в растения для исследуемых типов почв при внесении 3 мас.% сорбента НКФ-Гл составило  $19,1 \pm 0,8$  раз, что позволяет сорбент использовать для реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий с целью их введения в сельскохозяйственное использование.

#### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Получены образцы поверхностно-модифицированных ферроцианидных сорбентов на основе природных алюмосиликатов (глауконит, клиноптилолит), обладающие высокой специфичностью и ёмкостью к цезию, высокой химической устойчивостью, перспективные для очистки загрязнённых радионуклидами природных вод и почв, переработки жидких радиоактивных отходов.

2. Впервые показано, что сорбенты НКФ-Кл и НКФ-Гл являются надёжными матрицами, обеспечивающими низкие скорости выщелачивания и пригодными для иммобилизации радионуклидов цезия.

3. С использованием смешанного ферроцианида никеля-калия на основе глауконита предложен метод снижения перехода радионуклидов цезия из почвы в сельскохозяйственные растения.

#### **Методология и методы исследования**

Влияние модифицирования на структуру сорбентов изучали с помощью ИК – спектров, полученных на ИК-КР спектрометре Vertex-70 с приставкой RAM-II фирмы Bruker, Германия. Изменение текстуры поверхности алюмосиликатов в процессе модифицирования ферроцианидами исследовали с применением сканирующего

электронного микроскопа SIGMA VP. Удельную поверхность образцов сорбентов определяли по методу абсорбции азота на высокоскоростном анализаторе площади поверхности и размеров пор Nova 1200e. Исследование термического поведения природных и модифицированных образцов сорбентов проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC823e/400 (METTLER TOLEDO, Швейцария). Для оценки экологической безопасности сорбентов определение ионов никеля и гексацианоферратов в водных растворах осуществляли колориметрическим методом. Химическую стойкость насыщенных образцов сорбента определяли методом длительного выщелачивания по методике ГОСТ Р 52126-2003. Сорбционные свойства сорбентов исследовали с применением метода радиоактивных индикаторов. Измерения проводили на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ 1315 «Атомтех» и радиометре для измерения малых активностей УМФ-2000 производства «Доза». Для характеристики образцов почв определение емкости катионного обмена проводили в соответствии с ГОСТ 17.4.4.01-84 по методу Бобко-Аскинази-Алешина в модификации ЦИНАО, определение органического вещества в соответствии с ГОСТ 26213-91 по методу Тюрина в модификации ЦИНАО. Исследование химического состава почв осуществляли рентгено-флуоресцентным методом на рентгено-флуоресцентном спектрометре Innov-X X-5000 Series Olympus. Содержание калия и натрия в растворах после водного выщелачивания из образцов почв определяли методом пламенной эмиссионной спектрометрии в пламени ацетилен-воздух, содержание магния, железа и кальция - методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии в пламени ацетилен воздух на атомно-абсорбционном спектрометре Analyst 800 фирмы Perkin Elmer.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования состава, структуры, термической устойчивости модифицированных ферроцианидами глауконита и клиноптилолита.
2. Экспериментальные данные исследования статики и кинетики сорбции цезия природными и модифицированными образцами алюмосиликатов.
3. Результаты исследования специфичности сорбции цезия природными и модифицированными ферроцианидами образцами алюмосиликатов в присутствии катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ .
4. Результаты исследования химической устойчивости и экологической безопасности природных и модифицированных образцов алюмосиликатов в условиях реабилитации радиоактивно-загрязненных территорий.

5. Результаты исследования возможности использования ферроцианидных сорбентов на основе клиноптилолита и глауконита для снижения перехода радионуклидов цезия из почвы в сельскохозяйственные растения.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Для исследования применяли комплекс физико-химических методов, исследования проводили на современном оборудовании. Химический анализ образцов сорбентов и водных вытяжек проводили в аккредитованном Аналитическом испытательном центре – Российской арбитражной лаборатории испытаний материалов ядерной энергетики г. Екатеринбург. Для всех экспериментальных результатов показана хорошая воспроизводимость. Полученные для природных алюмосиликатов (клиноптилолита и глауконита) экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами, опубликованными в научной литературе. Все экспериментальные данные прошли статистическую обработку.

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих научных конференциях: Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2013», «Ломоносов-2015», «Ломоносов-2016», «Ломоносов-2017» (Москва); XII Международном научно-практическом симпозиуме «Чистая вода России» (Екатеринбург, 2013); Международном конкурсе научно-исследовательских проектов молодых ученых и студентов "Eurasia Green" (Екатеринбург, 2013); Международной молодежной научной конференции: Физика. Технологии. Инновации. ФТИ (Екатеринбург, 2014, 2016, 2017); Международной конференции 17th Radiochemical Conference (Прага, Чехия, 2014); Международной конференции International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (Барселона, Испания, 2014); II Международной научно-технической конференции Актуальные проблемы радиохимии и радиоэкологии (Екатеринбург, 2014); VIII Российской конференции по радиохимии (Железногорск, 2015); симпозиуме «Чернобыль: 30 лет спустя» (Москва, 2016); VII Международной научно-практической конференции «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития» (Курчатов, Республики Казахстан, 2016).

**Личный вклад автора.** Соискателем проведён анализ литературных источников по теме исследования, получены лично, обработаны и систематизированы экспериментальные данные. Постановка цели и задач исследования, выбор методов и разработка методик проведения исследований, обсуждение и интерпретация полученных



экспериментальных данных выполнены совместно с научным руководителем к.х.н., доцентом А.В. Ворониной.

**Публикации.** За время работы над диссертацией было опубликовано 28 научных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в рецензируемых изданиях Web of Science и Scopus, 1 глава в коллективной монографии.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, 5 глав, выводы, список цитируемой литературы, состоящий из 147 наименований, и 5 приложений. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, включая 36 рисунков, 30 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, обозначены цель и задачи исследования, изложены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор литературных данных о способах очистки водных сред и агротехнических приемах, снижающих подвижность радионуклидов и их накопление в сельскохозяйственных растениях, о природных алюмосиликатах (составе, структуре и сорбционных свойствах) и методах их модифицирования. Описываются требования к сорбентам, применяемым для реабилитации радиоактивно-загрязненных территорий.

Во **второй главе** выбраны условия трехстадийного поверхностного модифицирования ферроцианидами природных алюмосиликатов - клиноптилолита Шивертуйского месторождения Читинская область (Кл) и глауконита Каринского месторождения Челябинской области (Гл).

Метод модифицирования состоял из стадий:

1. Предварительная активация алюмосиликатов раствором HCl или NaOH.
2. Обработка активированных образцов растворами NiSO<sub>4</sub> или Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.
3. Обработка образцов раствором K<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>.

Путем варьирования условий проведения всех трех стадий (концентрации растворов, времени контакта фаз) были получены образцы смешанных ферроцианидов никеля-калия (НКФ-Кл) и железа-калия (ЖКФ-Кл) на основе клиноптилолита, и смешанный ферроцианид никеля-калия на основе глауконита (НКФ-Кл), обладающие повышенной специфичностью к цезию. Для образцов, имеющих наибольший  $K_d$  цезия,

определяли содержание Ni и Fe в модифицированном слое. В таблице 1 приведено содержание металлов в образцах.

Таблица 1 – Содержание Fe(III) и Ni(II) в образцах ферроцианидных сорбентов на основе алюмосиликатов

№ п/п	Сорбент	Содержание металла, мг/г сорбента	
		Fe	Ni
1	НКФ-Кл	-	14,1±0,1
2	ЖКФ-Кл	20,1±0,1	-
3	НКФ-Гл	-	10,0 ±0,1

С использованием физико-химических методов были исследованы структура, текстура поверхности, удельная поверхность и термическая устойчивость природных и модифицированных ферроцианидами алюмосиликатов.

На рисунке 1 представлены ИК-спектры образцов глауконита Каринского месторождения (Россия) и модифицированных образцов на его основе.

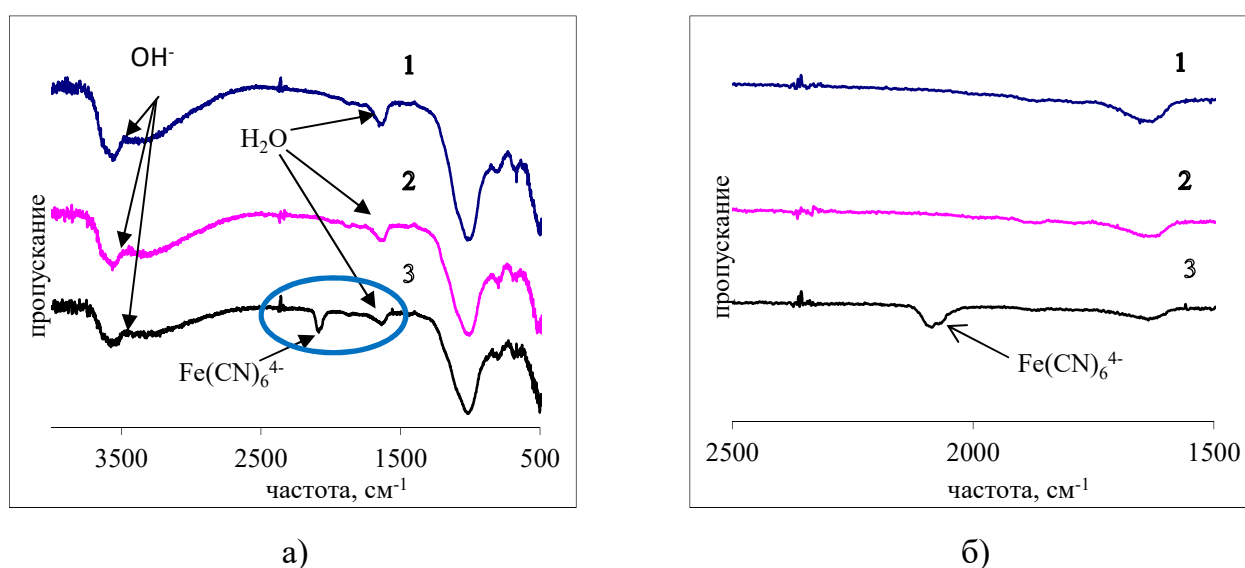


Рисунок 1 - ИК-спектры глауконита и модифицированных образцов на его основе на различных стадиях синтеза(а), в области частот 2500 - 1500 см<sup>-1</sup>(б):

1 - Гл, 2 - глауконит, насыщенный никелем, 3 – НКФ-Гл

О присутствии в модифицированных алюмосиликатах ферроцианидных соединений говорят сложные полосы поглощения в области 2000 - 2150 см<sup>-1</sup>. Пик поглощения при 2060 см<sup>-1</sup>, вероятнее всего, соответствует молекулярно-адсорбированному ферроцианиду калия, а пик поглощения при частоте 2092 см<sup>-1</sup> - смешанному ферроцианиду никеля-калия.

Средний размер частиц на поверхности модифицированных образцов, определенный по микрофотографиям, составил 10-30 нм. Показано, что при модифицировании увеличивается удельная поверхность образцов. Самой развитой удельной поверхностью обладает ЖКФ-Кл, величина удельной поверхности составляет  $60,8 \pm 0,1 \text{ м}^2/\text{г}$ . Модифицирование позволило увеличить площадь удельной поверхности образца НКФ-Кл почти в три раза, площадь поверхности составила  $56,7 \pm 0,1 \text{ м}^2/\text{г}$  по сравнению с природным клиноптилолитом –  $19,1 \pm 0,1 \text{ м}^2/\text{г}$ .

На рисунке 2 представлены кривые ДСК природных и модифицированных образцов алюмосиликатов. У модифицированных ферроцианидами образцов несколько изменяется положение пиков, связанных с эндотермическим эффектом и появляется серия пиков, обусловленных экзотермическими эффектами. Эндотермический эффект связан с удалением молекул воды, максимум эффекта для модифицированных клиноптилолита и глауконита наблюдается при  $131^\circ\text{C}$  и  $112^\circ\text{C}$ . Экзотермические эффекты связаны с разложением ферроцианидных фаз. Начало разложения ферроцианидной фазы сорбентов НКФ-Гл и НКФ-Кл наблюдается при  $200^\circ\text{C}$ . Присутствие на кривых ДСК НКФ-Кл двух пиков разложения ферроцианидной фазы свидетельствует о наличии в составе сорбента двух ферроцианидных соединений с разной термической устойчивостью.

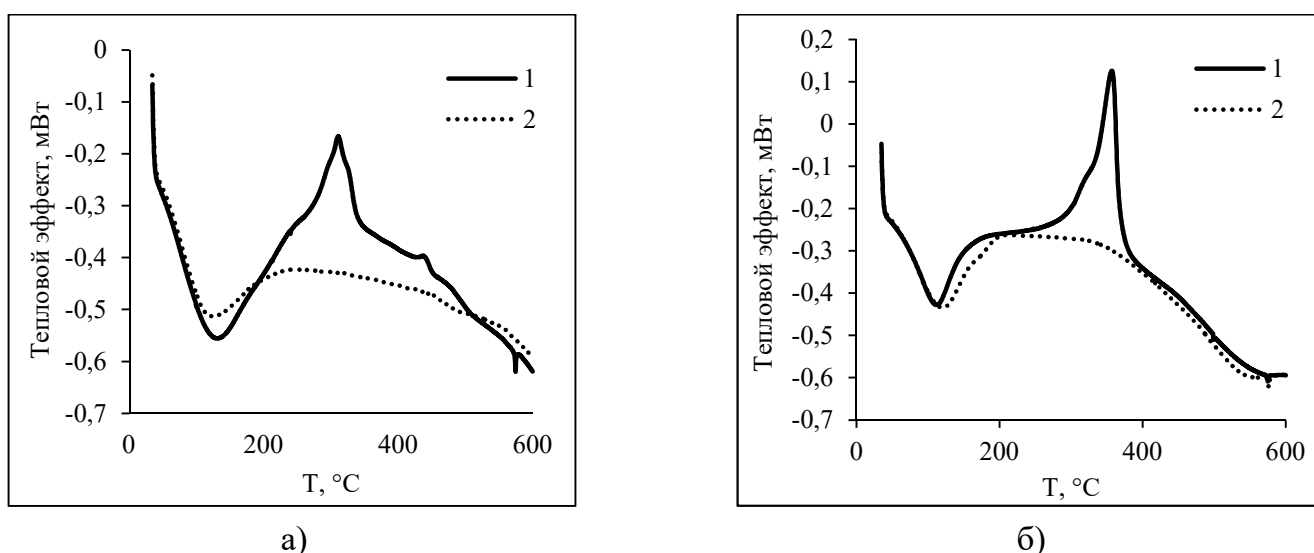


Рисунок 2 - Кривые ДСК природных (2) и модифицированных (1) образцов клиноптилолита (а) и глауконита (б)

В **третьей** главе приведено сравнительное исследование сорбционных свойств природных и модифицированных алюмосиликатов.

Исследована статика сорбции цезия природными и модифицированными алюмосиликатами. На рисунке 3 приведены изотермы сорбции цезия модифицированными алюмосиликатами из водопроводной воды в широком диапазоне концентраций. В таблице 2 приведены результаты математической обработки изотерм сорбции цезия полученными образцами.

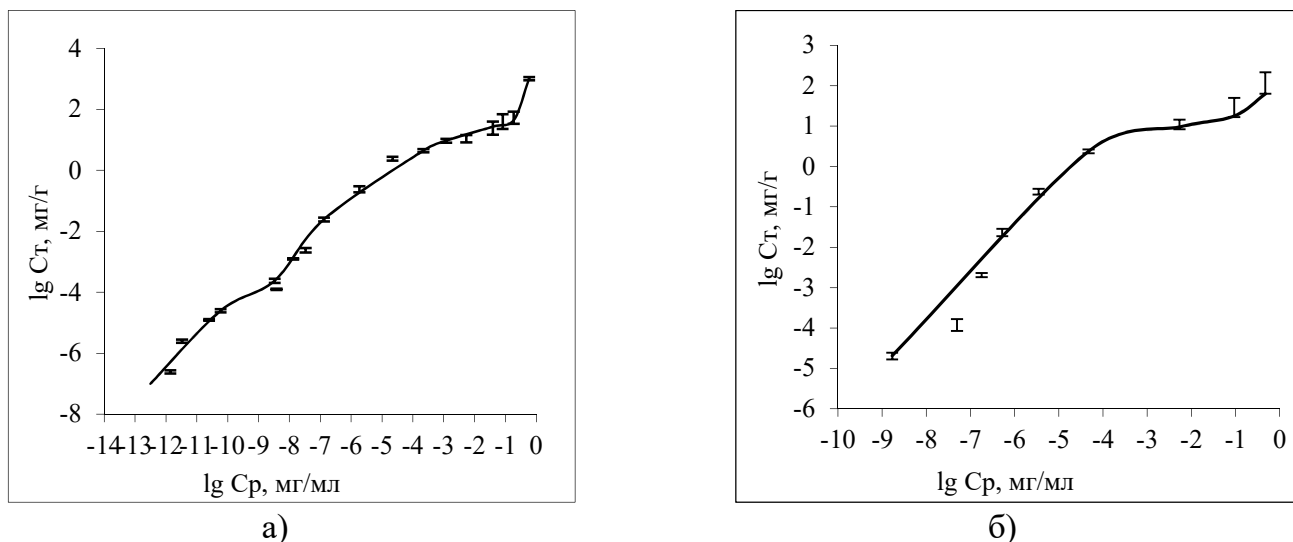


Рисунок 3 - Изотермы сорбции цезия НКФ-Кл (а) и НКФ-Гл (б) из водопроводной воды

Показано, что изотермы сорбции имеют сложный профиль, что говорит о присутствии у НКФ-Кл трех типов сорбционных центров, а у ЖКФ-Кл и НКФ-Гл - двух. Коэффициент распределения цезия для наиболее специфичного центра НКФ-Кл, реализующего свою ёмкость в области концентраций цезия от  $1 \cdot 10^{-7}$  до  $1 \cdot 10^{-5}$  мг/л, составляет  $10^{(7,1 \pm 1,3)}$  мл/г. Рассматриваемая область концентраций цезия соответствует концентрации цезия в природных водах, что является важным для определения сферы применения данного сорбента. По своей специфичности ЖКФ-Кл в области низких концентраций цезия до  $1 \cdot 10^{-5}$  мг/л уступает сорбенту НКФ-Кл. Коэффициент распределения для самого специфичного к цезию центра НКФ-Гл равен  $10^{(5,8 \pm 0,7)}$  мл/г. На области концентраций от  $1 \cdot 10^{-4}$  до 1 мг/л коэффициенты распределения цезия для образцов НКФ-Кл и НКФ-Гл сопоставимы в пределах погрешности.

Значения статической обменной емкости (СОЕ) для природных образцов значительно уступают величинам СОЕ модифицированных образцов.

Таблица 2 – Результаты математической обработки изотерм сорбции цезия природными и модифицированными алюмосиликатами

Сорбент	Сорбционные центры	$\lg K_d$ , мл/г	СОЕ, мг/г
Кл	I	$4,4 \pm 0,4$	21
НКФ-Кл	I	$7,1 \pm 1,3$	560
	II	$5,7 \pm 0,4$	
	III	$3,2 \pm 0,7$	
ЖКФ-Кл	I	$4,9 \pm 0,3$	525
	II	$3,6 \pm 0,7$	
Гл	I	$3,0 \pm 0,5$	15
НКФ-Гл	I	$5,8 \pm 0,7$	62
	II	$1,8 \pm 0,6$	

Исследована специфичность сорбентов к цезию в присутствии элементов аналогов. Установлены интервалы специфичности в растворах NaCl, KCl и NH<sub>4</sub>Cl для всех исследуемых сорбентов. Экспериментальные данные показали, что природные алюмосиликаты уступают по специфичности к цезию в присутствии Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> всем модифицированным сорбентам. Снижение коэффициента распределения цезия модифицированными сорбентами в области низких концентраций катионов Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> до 10<sup>-1</sup> моль/л связано с присутствием в слабосолевых растворах несорбируемых псевдордиокolloидов цезия.

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициентов распределения цезия клиноптилолитом и модифицированными сорбентами на его основе от активности ионов натрия в растворе.

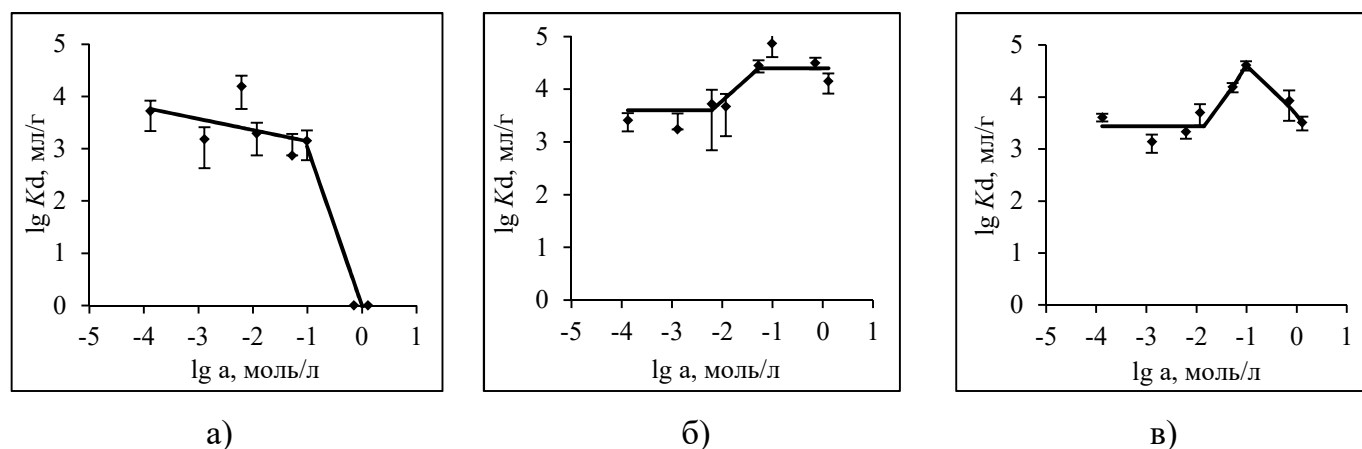


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента распределения цезия от активности натрия в растворе: Кл (а), НКФ-Кл (б), ЖКФ-Кл (в)

Для природных алюмосиликатов характерно уменьшение коэффициента распределения  $^{137}\text{Cs}$  с увеличением концентрации катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ . Для модифицированных алюмосиликатов можно выделить области концентраций, на которых влияние отсутствует и сохраняются высокие коэффициенты распределения. Так, для сорбента НКФ-Кл коэффициент распределения  $^{137}\text{Cs}$  при концентрации натрия более 0,1 моль/л достигает значения  $\lg K_d = (4,3 \pm 0,4)$  мл/г и остается постоянным. При концентрации натрия  $1 \cdot 10^{-4}$  до 0,1 моль/л  $\lg K_d$  составляет  $(5,1 \pm 0,1)$  мл/г, при значениях больше 2,1 моль/л -  $\lg K_d = (3,5 \pm 0,3)$  мл/г. Специфичность модифицированных сорбентов в присутствии  $\text{NH}_4^+$  в растворе сопоставима, более низкий коэффициент распределения характерен для НКФ-Гл в области концентраций  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  моль/л и изменяется от  $\lg K_d = (3,4 \pm 0,1)$  мг/л до  $\lg K_d = (4,8 \pm 0,3)$  мг/л. Снижение коэффициента распределения в области низких концентраций катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  до  $10^{-1}$  моль/л связано с присутствием в слабосолевых растворах несорбируемых псевдоколлоидов цезия.

Были исследованы механизмы сорбции цезия природными и модифицированными образцами. Изучено влияние на скорость сорбции цезия скорости перемешивания, размера гранул, состава раствора, концентрации цезия в растворе, температуры. Определены константы скорости сорбции, коэффициенты диффузии цезия, энергия активации процесса сорбции.

На рисунках 5 и 6 приведены типичные кинетические кривые сорбции цезия сорбентами на основе природных алюмосиликатов из водопроводной воды.

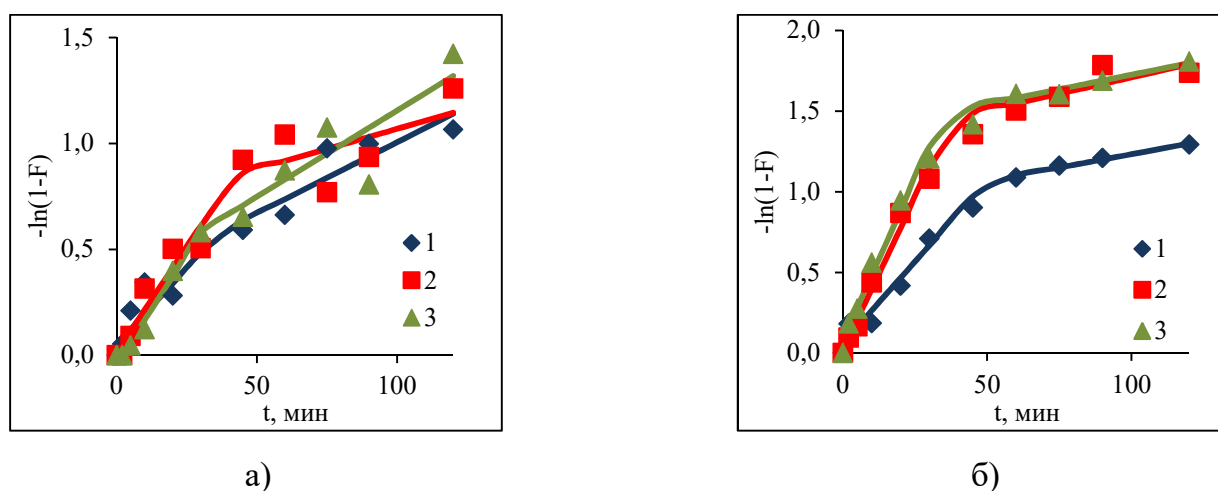
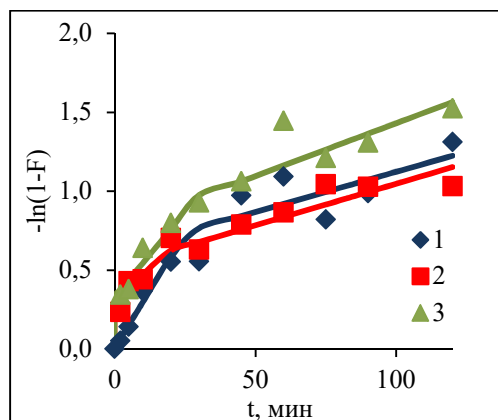
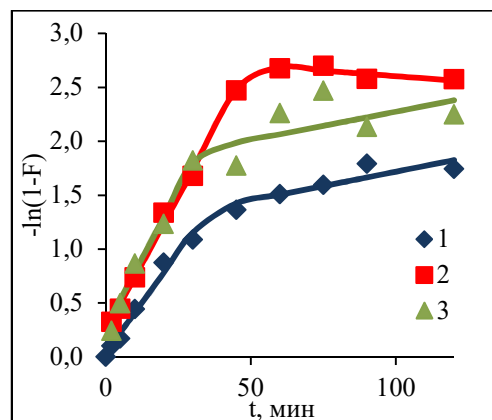


Рисунок 5 - Кинетические зависимости сорбции цезия Кл (а) и НКФ (б) при разных скоростях перемешивания (1 - 180 об/мин, 2 - 480 об/мин, 3- 900 об/мин)



а)



б)

Рисунок 6 - Кинетические зависимости сорбции цезия природным клиноптилолитом (а) и НКФ-Кл (б) при разных температурах (1 - 20°C, 2 - 40°C, 3 - 50°C) в условиях скорости перемешивания 480 об/мин

Показано, что скорость перемешивания раствора влияет на скорость сорбции цезия природными и модифицированными алюмосиликатами только на первой стадии сорбции и только до скорости 480 об/мин, а изменение концентрации цезия в растворе не оказывает влияния, слабое влияние на скорость сорбции оказывает размер гранул сорбента НКФ-Кл. Значения энергии активации процесса сорбции цезия Кл и НКФ-Кл на первой стадии сорбции составило соответственно 48,1 и 35,2 кДж/моль, на второй – 41,1 и 63,2 кДж/моль.

Для определения коэффициентов диффузии использовали модель диффузии из хорошо перемешиваемого раствора в бесконечный цилиндр, которая определяется уравнением (1):

$$F = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\alpha(1+\alpha)}{4+4\alpha+\alpha^2 q_n^2} e^{-q_n^2 F_0} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{V}{KW} \quad (2)$$

где  $q_n$  – корни некоторого характеристического уравнения,  $V$  – объем раствора,  $W$  – объем сорбента,  $K$  – коэффициент Генри.

По номограмме, полученной решением уравнения (1), определяли значение критерия  $F_0$  для различного времени  $t$  и степени достижения сорбционного равновесия  $F$ . Строили зависимость в координатах « $F_0-t$ » и определяли коэффициенты диффузии из результатов математической обработки кривых. Коэффициент диффузии связан с  $F_0$  уравнением (3):

$$F_0 = \frac{Dt}{R^2}, \quad (3)$$

где  $F_0$  - критерий гомохромности Фурье,  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с,  $R$  – радиус частицы сорбента, м.

В таблице 3 приведены величины коэффициентов диффузии. Рассчитанные значения коэффициентов диффузии для всех образцов составили  $10^{-12}$ - $10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с.

Таблица 3 – Коэффициенты диффузии цезия для природных и модифицированных образцов алюмосиликатов

Сорбент	Скорость перемешивания, об/мин	Расчет через время полуобмена			Модель диффузии из ограниченного объема в цилиндр	
		D, м <sup>2</sup> /с	Стадия	t <sub>0.5</sub> , мин	(D I ± ΔD I), м <sup>2</sup> /с	(D II ± ΔD II), м <sup>2</sup> /с
Гл	180	4,7·10 <sup>-13</sup>	II	48	(2,5±0,4)·10 <sup>-12</sup>	(3,5±2,2)·10 <sup>-13</sup>
	480	2,6·10 <sup>-12</sup>	I	9	(4,9±0,6)·10 <sup>-12</sup>	(0,6±5,6)·10 <sup>-13</sup>
	900	3,2·10 <sup>-12</sup>	I	7	(3,4±0,5)·10 <sup>-12</sup>	(7,3±5,6)·10 <sup>-13</sup>
НКФ-Гл	180	3,6·10 <sup>-13</sup>	I	62	(1,4±0,2)·10 <sup>-12</sup>	(3,6±0,9)·10 <sup>-13</sup>
	480	2,0·10 <sup>-12</sup>	I	11	(3,2±0,9)·10 <sup>-12</sup>	(2,6±1,2)·10 <sup>-13</sup>
	900	2,4·10 <sup>-12</sup>	I	9	(1,5±0,8)·10 <sup>-12</sup>	(6,1±3,1)·10 <sup>-14</sup>
Кл	180	4,1·10 <sup>-13</sup>	I	55	(5,0±0,5)·10 <sup>-12</sup>	(4,5±1,0)·10 <sup>-13</sup>
	480	6,4·10 <sup>-13</sup>	I	35	(1,7±0,2)·10 <sup>-12</sup>	(2,7±2,2)·10 <sup>-13</sup>
	900	4,9·10 <sup>-13</sup>	I	45	(6,6±0,2)·10 <sup>-12</sup>	(2,2±0,9)·10 <sup>-13</sup>
НКФ-Кл	180	6,1·10 <sup>-13</sup>	I	37	(2,9±0,2)·10 <sup>-12</sup>	(3,2±1,6)·10 <sup>-13</sup>
	480	9,7·10 <sup>-13</sup>	I	23	(4,6±0,5)·10 <sup>-12</sup>	(4,3±0,9)·10 <sup>-13</sup>
	900	1,1·10 <sup>-12</sup>	I	20	(5,6±0,1)·10 <sup>-12</sup>	(3,3±0,6)·10 <sup>-13</sup>

Для оценки вклада химической стадии, полученные экспериментальные данные были обработаны с использованием моделей псевдо-первого порядка (4) и модели Еловича (5).

$$a_t = a_e(1 - e^{-k_1 t}), \quad (4)$$

$$a_t = \frac{1}{\beta} \cdot \ln(1 + \alpha \cdot \beta \cdot t), \quad (5)$$

где  $a_e$  и  $a_t$  – количество сорбированного металла на единицу массы сорбента в состоянии равновесия и в момент времени  $t$ , соответственно (ммоль/г),  $k_1$  – константа скорости сорбции модели псевдо-первого порядка (мин<sup>-1</sup>),  $\alpha$  – начальная скорость сорбционного процесса (г·(ммоль·мин)<sup>-1</sup>),  $\beta$  – константа уравнения Еловича (г·ммоль<sup>-1</sup>).

Полученные данные позволили установить, что кинетика сорбции цезия Кл и НКФ-Кл одинаково удовлетворительно описывается как моделью диффузионной кинетики, так и уравнением Еловича.

Сделан вывод, что для сорбентов Гл и НКФ-Гл сорбцию цезия лимитирует диффузия цезия в поровом пространстве сорбентов, для Кл и НКФ-Кл лимитирующий вклад на 1 и 2 стадиях кроме внутренней диффузии вносит химическая реакция.



В четвертой главе представлены результаты исследования химической устойчивости природных и модифицированных алюмосиликатов.

Химическую стойкость насыщенных образцов сорбентов к выщелачиванию  $^{137}\text{Cs}$ , определяли методом длительного выщелачивания по методике ГОСТ Р 52126-2003, используя в качестве выщелачивателя разные типы вод: минеральную воду (минерализация 1,5 г/л) и пресную воду. Содержание цезия в образцах после насыщения соответствовало удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в образце –  $6 \cdot 10^2$  и  $5 \cdot 10^{10}$  Бк/г. Величины удельной активности задавали для решения двух задач: изучение химической стойкости образцов в условиях реабилитации радиоактивно-загрязненных почв (уровень удельной активности соответствовал загрязнению почв Японии после аварии на АЭС Фукусима [3], после проведения испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне, Республики Казахстан [4]), и уровень высокоактивных отходов. Суммарные степени выщелачивания цезия из насыщенных образцов сорбентов при разной удельной активности представлены в таблице 4.

Показано, что наибольшее вымывание цезия 41,6 и 63,4 % наблюдается из природного глауконита независимо от состава выщелачиваемого раствора. Самая низкая степень выщелачивания  $^{137}\text{Cs}$  наблюдается для НКФ-Кл и составляет для пресной и минеральной воды 1,6 и 2,0 %.

Таблица 4 – Суммарные степени выщелачивания цезия из насыщенных образцов сорбента, %

Сорбент	Удельная активность Cs в образце, Бк/г			
	$6 \cdot 10^2$		$5 \cdot 10^{10}$	
	Пресная вода	Минерал. вода	Пресная вода	Минерал. вода
Кл	6,5	24,7	23,6	69,4
НКФ-Кл	1,6	2,0	25,5	56,8
ЖКФ-Кл	1,8	17,8	21,0	64,4
Гл	41,6	63,4	-	-
НКФ- Гл	14,6	1,5	-	-

Исследовано выщелачивание никеля и ферроцианидов из модифицированных образцов сорбентов. Показано, что суммарное вымывание никеля из модифицированных образцов НКФ-Кл и НКФ-Гл в почву за весь период использования не превысит ПДК для почв 4,0 мг/кг, установленное гигиеническими нормативами ГН 2.1.7.2041-06. Вымывание ферроцианидов при поливе или осадках интенсивности 1 л/кг почвы не превысит ПДК

1,25 мг/л в водах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения, в соответствие с гигиеническими нормативами ГН 2.1.5.1315-03. Сделан вывод, что сорбенты НКФ-Кл и НКФ-Гл являются эффективными матрицами для иммобилизации цезия.

В пятой главе исследована возможность применения природных и модифицированных алюмосиликатов для реабилитации радиоактивно-загрязненных территорий с целью их введения в сельскохозяйственное использование.

Для проведения исследований были выбраны 2 типа почв, имеющих характерные особенности почв, загрязненных в результате аварии на АЭС Фукусима (Япония) и при проведении испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне (Республика Казахстан).

Были исследованы физико-химические свойства образцов почвы и химический состав растворов выщелачивания из почв, выбранных для моделирования радиоактивного загрязнения и разработки способа реабилитации почв. Результаты анализа почв представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Физико-химические свойства образцов почв

	Образец №1	Образец №2
Емкость катионного обмена (ЕКО), мг-экв/100 г почвы	54,50±0,23	14,00±0,71
Массовая доля органического вещества	5,5	0,4
Химический состав, мкг/кг		
К	10940±164	11451±128
Ca	26181±239	17011±135
Mn	781±11	289±5
Fe	40490±226	8788±65
Pb	18,3±2	14,6±1,9
Zn	75±3	12,9±1,6

Установлено, что образец почвы №1 относится к дерново-подзолисту типу почв, обладает высокой катионно-обменной емкостью и высокой долей органического вещества. Образец №2 – песчаная почва с низкими ЕКО и долей органического вещества.

Проведена оценка эффективности извлечения цезия из почвенных растворов (растворов выщелачивания из почв) разработанными сорбентами и природными

алюмосиликатами. Показано, что применение модифицированных образцов сорбентов более экономически оправдано, потому что для достижения одинаковой степени очистки почвенных растворов требуется, например, 500 мг/л ферроцианидного сорбента и 25000 мг/л глауконита.

Исследовано влияние сорбентов на переход  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в сельскохозяйственные растения. Величина удельной активности почвы составила 305 Бк/г. Способ внесения сорбента варьировали: внутрь почвы (вн) или сверху (св). В первом случае, сорбент равномерно распределяли в почве, после чего высаживали семена культуры *Avena sativa*. Во втором случае, сначала осуществляли посадку семян и сверху помещали сорбент. Для сравнения использовали контрольный образец, выращенный в тех же температурных и климатических условиях, но без добавления сорбента.

Коэффициенты накопления  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в биомассу овса и снижения перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы (образец №1) в овес приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Коэффициенты накопления и снижения перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в овес

Образец	Массовое содержание сорбента, %	Способ внесения	A удельное в растении, Бк/Г	K накопления	K снижения перехода
Контрольный образец			86,8±1,2	0,267±0,008	-
НКФ-Гл	0.1	вн	43,8±0,9	0,135±0,004	1,98±0,08
НКФ-Гл	0.1	св	71,0±1,2	0,218±0,007	1,22±0,05
Гл	0.1	вн	99,2±1,4	0,305±0,009	0,88±0,04
Гл	0.1	св	101,1±1,3	0,311±0,009	0,86±0,04
Контрольный образец			84,5±1,2	0,30±0,01	-
НКФ-Кл	0.1	вн	51,3±1,0	0,179±0,006	1,65±0,07
НКФ-Кл	0.1	св	83,9±1,2	0,29±0,01	1,01±0,04
Кл	0.1	вн	80,7±1,2	0,282±0,009	1,05±0,05
Кл	0.1	св	121,4±1,5	0,42±0,01	0,70±0,03
Контрольный образец			20,8±0,9	0,064±0,002	-
НКФ-Гл	1	вн	43,4±1,1	0,133±0,004	7,3±0,6
НКФ-Гл	1	св	0,0	-	-
Гл	1	вн	30,8±0,9	0,094±0,003	0,68±0,03
Гл	1	св	17,6±0,7	0,054±0,002	1,18±0,05
Контрольный образец			26,3±0,8	0,076±0,002	-
НКФ-Кл	1	вн	32,9±0,8	0,095±0,003	0,80±0,04
НКФ-Кл	1	св	0,0	-	-
Кл	1	вн	99,0±1,4	0,287±0,008	0,27±0,01
Кл	1	св	81,3±1,5	0,236±0,007	0,32±0,01
Контрольный образец			129,4±1,2	0,53±0,02	-
НКФ-Гл	3	вн	6,77±0,05	0,028±0,001	19,1±0,8
Гл	3	вн	54,1±0,7	0,223±0,006	2,4±0,1

Показано, что снижение перехода цезия в растения для исследуемых типов почв при внесении 3 мас.% смешанного ферроцианида никеля-калия на основе глауконита составило  $19,1 \pm 0,8$  раз. Количество вносимого сорбента и эффективность его применения будет зависеть от типа почв на загрязнённых территориях

В качестве метода снижения перехода радионуклидов цезия из почвы в сельскохозяйственные растения предложено внесение в почву 3% масс. сорбента НКФ-Гл с равномерным распределением его внутри почвы на глубину до 15-20 см.

Проведены испытания сорбента НКФ-Гл в Японии на радиоактивно-загрязнённых в результате аварии на АЭС «Фукусима Даичи» почвах. Показана высокая эффективность сорбента НКФ-Гл по сравнению с другими исследуемыми сорбентами.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Получены поверхностно-модифицированные ферроцианидные сорбенты на основе природных алюмосиликатов глауконита и клиноптилолита. Показано, что в составе сорбентов присутствует не менее двух ферроцианидных соединений, средний размер частиц, формирующих поверхность, составляет 10-30 нм. Модифицирование ферроцианидами увеличивает удельную поверхность образцов (площадь удельной поверхности образца НКФ-Кл почти в три раза больше, чем у природного клиноптилолита и составляет  $56,7 \pm 0,1$  м<sup>2</sup>/г). Модифицированные ферроцианидами сорбенты имеют температурную устойчивость 200 °С.

2. Исследована статика сорбции цезия природными и модифицированными алюмосиликатами. Показано, что изотермы сорбции цезия имеют сложный профиль, что говорит о присутствии у сорбента НКФ-Кл трех типов сорбционных центров, ЖКФ-Кл и НКФ-Гл - двух. Модифицированные сорбенты превышают по специфичности и сорбционной ёмкости природные алюмосиликаты. Для сорбентов НКФ-Кл и НКФ-Гл коэффициенты распределения цезия для наиболее специфичных центров составили соответственно  $10^{(7,1 \pm 1,3)}$  и  $10^{(5,8 \pm 0,7)}$  мл/г, полная статическая обменная ёмкость 560 и 62 мг/г.

3. В широком концентрационном диапазоне ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  в растворе исследована специфичность природных и модифицированных алюмосиликатов к цезию. Показано, что в присутствии элементов аналогов природные алюмосиликаты по специфичности к цезию существенно уступают всем модифицированным сорбентам.

4. Исследованы механизмы сорбции цезия природными и модифицированными алюмосиликатами, влияние на скорость сорбции цезия скорости перемешивания раствора,

размера гранул сорбента, состава раствора, концентрации цезия в растворе, температуры. Проведено моделирование кинетики сорбции с использованием моделей диффузионной и химической кинетики (модели диффузии из хорошо перемешиваемого объёма в цилиндр, моделей псевдо-первого порядка и Еловича). Рассчитанные значения коэффициентов диффузии для всех образцов составили  $10^{-12}$ - $10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с. Значения энергии активации процесса сорбции цезия Кл и НКФ-Кл на первой стадии сорбции составили соответственно 48,1 и 35,2 кДж/моль, на второй – 41,1 и 66,2 кДж/моль. Сделан вывод, что сорбцию цезия сорбентами Гл и НКФ-Гл лимитирует диффузия цезия в поровом пространстве сорбента, Кл и НКФ-Кл - лимитирующий вклад кроме внутренней диффузии вносит химическая реакция.

5. Методом длительного выщелачивания исследована химическая стойкость насыщенных цезием образцов природных и модифицированных алюмосиликатов. Показано, что выщелачивание цезия зависит от накопленной удельной активности. Для условий реабилитации почв выщелачивание цезия из НКФ-Кл и НКФ-Гл составляет соответственно, %: пресной водой 1,6 и 14,6; слабоминерализованной водой 2,0 и 1,5. Модифицированные сорбенты могут быть использованы как матрицы для иммобилизации радионуклидов цезия с возможностью их длительного хранения.

6. Исследовано выщелачивание никеля и ферроцианидов из модифицированных образцов НКФ-Кл и НКФ-Гл. Показано, что суммарное вымывание никеля за весь период использования сорбентов не превысит ПДК никеля в почве, вымывание ферроцианидов в почвенный раствор при поливе и осадках интенсивностью 1 л/кг почвы не превысит ПДК в водах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения.

7. Исследовано влияние природных и модифицированных алюмосиликатов на переход <sup>137</sup>Cs из почв в сельскохозяйственные растения. Снижение перехода цезия в растения для исследуемых типов почв при внесении 3 мас.% НКФ-Гл составило  $19,1 \pm 0,8$  раз. Предложен метод реабилитации радиоактивно-загрязнённых территорий с целью их введения в сельскохозяйственное использование. Проведена апробация сорбента для очистки от цезия почв, загрязнённых в результате аварии на АЭС «Фукусима Даичи» в Японии. В дальнейшем планируется исследование возможности использования разработанных сорбентов для извлечения радионуклидов стронция и урана.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

***Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:***

1. Блинова, М.О. Сорбция радионуклидов цезия из водных растворов на природных и модифицированных алюмосиликатах / А.В. Воронина, М.О. Блинова, И.О. Куляева, П.Ю. Санин, В.С. Семенищев, Ю.Д. Афонин // Радиохимия. - 2015, т. 57, № 5. - С. 446–452 (0,35 п.л./ 0,15 п.л.).

2. Савченко (Блинова), М.О. Оценка эффективности использования клиноптилолита и ферроцианидных сорбентов на его основе для очистки водных сред и иммобилизации радионуклидов / А.В. Воронина, М.О. Савченко (Блинова), В.С. Семенищев, А.Ф. Никифоров // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013, № 6. - С. 88 – 94 (0,35 п.л./ 0,15 п.л.).

3. Savchenko (Blinova), M.O. Approaches to rehabilitation of radioactive contaminated territories / A.V. Voronina, V.S. Semenishchev, A.A. Bykov, M.O. Savchenko (Blinova), A.S. Kutergin, T.A. Nedobuh // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 2013, V. 88, Is. 9. – P. 1606-1611 (0,3 п.л./ 0,1 п.л.).

4. Blinova, M.O. Returning land contaminated as a result of radiation accidents to farming use / A.V. Voronina, M.O. Blinova, V.S. Semenishchev, D.K. Gupta // Journal of environmental radioactivity. - 2015, Vol.144. - P.103-112 (0,5 п.л./ 0,2 п.л.).

***Глава в коллективной монографии:***

5. Blinova, M.O. Methods for Decrease of Radionuclides Transfer from Soil to Agricultural Vegetation / A.V. Voronina, V.S. Semenishchev, M.O. Blinova, P.Ju. Sanin // Radionuclides in the Environment. Influence of chemical speciation and plant uptake on radionuclide migration. Springer International Publishing. Switzerland. - 2015. - P. 185-207. (1,15 п.л./ 0,4 п.л.).

***Публикации в прочих научных изданиях:***

6. Блинова, М.О. Разработка и исследование свойств ферроцианидных сорбентов на основе клиноптилолита, перспективных для реабилитации радиоактивно-загрязненных территорий // Сборник тезисов докладов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». М.: МГУ, 2013. - С. 78 (0,05 п.л./ 0,05 п.л.).

7. Blinova, M.O. The assessment of efficiency of using of natural aluminosilicates and modified sorbents based on them for returning of radioactively contaminated lands to farming industry / A.V. Voronina, M.O. Blinova, V.S. Semenishchev // Das internationale Symposium

Euro-eco. German, Hannover: Europäische Wissenschaftliche Gesellschaft, 2013. - P.150-151 (0,1 п.л./ 0,05 п.л.).

8. Блинова, М.О. Сорбенты для радиохимического анализа и дезактивации водных сред / М.О. Блинова, А.В. Воронина, В.С. Семенищев // Eurasia Green: материалы Международного конкурса научно-исследовательских проектов молодых ученых и студентов - Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного Экономического Университета, 2013. - С.73-74 (0,1 п.л./ 0,05 п.л.).

9. Blinova, M.O. Decreasing of transfer of caesium and strontium radionuclides from soil to vegetation / A.V. Voronina, M.O. Blinova, V.S. Semenishchev // 17th Radiochemical Conference - Booklet of Abstracts. Praha, 2014. - P.42 (0,1 п.л./ 0,05 п.л.).

10. Блинова, М.О. Разработка метода реабилитации радиоактивно-загрязненных почв / М.О. Блинова, А.В. Воронина, В.С. Семенищев // Актуальные Проблемы Радиохимии и Радиоэкологии: материалы II Международная научно-техническая конференция. - Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. - С.194-199 (0,25 п.л./ 0,15 п.л.).

11. Blinova, M.O. Decreasing of transfer of caesium and strontium radionuclides from soil to vegetation / A.V. Voronina, M.O. Blinova, V.S. Semenishchev, A.S. Kutergin // International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity. Barcelona. Spain, 2014. - P.17 (0,1 п.л./ 0,05 п.л.).

12. Блинова, М.О. Ферроцианидные сорбенты на основе природных алюмосиликатов для очистки природных вод и почв от радионуклидов цезия / М.О. Блинова, А.В. Воронина, В.С. Семенищев // VIII Всероссийская конференция по радиохимии «Радиохимия-2015»: Тезисы докладов. Железногорск, 2015. - С.352 (0,1 п.л./ 0,05 п.л.).

13. Блинова, М.О. Исследование кинетики сорбции цезия сорбентами на основе алюмосиликатов / Тезисы докладов симпозиума «Чернобыль: 30 лет спустя» и международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов -2016». – М.: МГУ, 2016. - С. 30 (0,05 п.л./ 0,05 п.л.).

14. Блинова, М.О. Исследование кинетики сорбции цезия природными и модифицированными алюмосиликатами из слабоминерализованных вод и почвенных растворов / П.Ю. Санин, М.О. Блинова, А.В. Воронина // Тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции. – Павлодар: Дом печати, 2016. - С. 27-28 (0,1 п.л./ 0,05 п.л.).

15. Блинова, М.О. Кинетические особенности сорбции цезия из водных растворов сорбентами на основе алюмосиликатов / М.О. Блинова, А.В. Воронина //Тезисы докладов IV Международной молодежной научной конференции: Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2017 – Екатеринбург: УрФУ, 2017. - С. 83-84 (0,1 п.л./ 0,05 п.л.).

#### **Список использованных источников:**

1. Алексахин, Р. М. Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации // Почвоведение. – 2009. - №12. – с. 1487 – 1498.

2. Алексахин, Р. М. Радиоэкологические аспекты реабилитации сельского хозяйства после аварии на АЭС «Фукусима Даичи» / Р. М. Алексахин, В. Г. Сычев // Плодородие. – 2013. - №4 (73). – с. 2 – 6.

3. Коноплев, В.А. Вертикальное распределение радиоцезия в почвах зоны аварии на АЭС Фукусима-1 / А.В. Коноплев, В.Н. Голосов, В.И. Йощенко, К. Нанба, Ю. Онда, Ц. Такасе, Й.Вакияма // Почвоведение. – 2016. - №5. – С. 620-632.

4. Назарбаев, Н.А. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние / Н.А. Назарбаев, В.С. Школьник, Э.Г. Батырбеков, С.А. Березин, С.Н. Лукашенко, М.К. Скаков // Курчатов, РГП «Национальный ядерный центр РК» Министерства энергетики РК. – 2016, Т.2. – 448 с.