

# АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ СОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ» ДЛЯ СОРБЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ ЦЕЗИЯ И СТРОНЦИЯ

© 2020 г. Л. Н. Москальчук<sup>a\*</sup>, В. В. Милютин<sup>b</sup>, Н. А. Некрасова<sup>b</sup>, Т. Г. Леонтьева<sup>c</sup>,  
А. А. Баклай<sup>c</sup>, П. Е. Белоусов<sup>d</sup>, В. В. Крупская<sup>d,e</sup>

<sup>a</sup> Белорусский государственный технологический университет, 220006, Минск, ул. Свердлова, д. 13а

<sup>b</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,  
119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4

<sup>c</sup> Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси, 220109, Минск, а/я 119

<sup>d</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35

<sup>e</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,  
119234, Москва, Ленинские горы, д. 1

\*e-mail: leonmosk@tut.by

Получена 05.03.2019, после доработки 13.04.2019, принята к публикации 23.04.2019

Изучены минеральный состав, физико-химические свойства и сорбционные характеристики глинисто-солевых шламов (ГСШ) отходов от переработки сильвинитовой руды ОАО «Беларуськалий» (Солигорск, Беларусь), а также алюмосиликатных и иллитовых сорбентов, полученных на их основе. Показано, что в процессе обогащения образцов ГСШ происходит изменение их химического и минералогического составов. Установлено, что отмыка ГСШ водой с последующей обработкой соляной кислотой и Трилоном Б приводит к увеличению содержания основного компонента ГСШ – иллита – в 1.2–1.3 раза за счет растворения карбонатов (доломита и кальцита) и гипса. Установлено, что присутствие иллита играет определяющую роль в сорбционной активности сорбентов по отношению к радионуклидам  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . При использовании обогащенных образов иллитовых сорбентов (ИС-Зо и ИС-Зм) значения коэффициента распределения  $^{137}\text{Cs}$  увеличиваются в 2 раза, а  $^{90}\text{Sr}$  – в 20 раз по сравнению с необогащенными образцами алюмосиликатных сорбентов (АС-Зо и АС-Зм). Показана перспективность получения алюмосиликатных и иллитовых сорбентов из ГСШ и их использования для очистки жидких радиоактивных отходов от радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и создания барьера для обеспечения безопасного хранения и захоронения низко- и среднеактивных радиоактивных отходов.

**Ключевые слова:** глинисто-солевые шламы, алюмосиликатные сорбенты, иллитовые сорбенты, модифицирование, сорбция, радионуклиды цезия, стронция

**DOI:** 10.31857/S0033831120030065

## ВВЕДЕНИЕ

Природные глины и цеолиты активно используются при создании геохимических, инженерных барьеров при строительстве хранилищ радиоактивных отходов (РАО), объем которых постоянно растет с развитием атомной энергетики [1]. Для сооружения барьеров требуется большое количество материала, в связи с чем наиболее перспективно использование дешевых материалов – глин

или пород с повышенным содержанием глинистой составляющей, которые обладают хорошими сорбционными и противомиграционными свойствами и доступны в различных регионах. Сорбенты на основе природных глин, например бентонитовых, наиболее эффективны при извлечении целого ряда радионуклидов, в том числе радионуклидов цезия, благодаря процессам их селективной сорбции и фиксации [2]. Сорбция цезия на глинистых

минералах происходит за счет механизма ионного обмена. Этот показатель выше у тех глинистых минералов, у которых выше способность к ионному обмену, т.е. у минералов группы смектита (например монтмориллонита) и группы слюдистых минералов (например иллита) [3–5]. На долю глинистых минералов приходится до 65–80% объема всех осадочных пород [6].

Природные глины существенно различаются по сорбционным характеристикам, механизмам поглощения и удержания радионуклидов, фильтрационным свойствам, что необходимо учитывать при создании инженерных барьеров безопасности для изоляции РАО в местах хранения/захоронения [7]. Для повышения сорбционной способности материалы на основе глин могут подвергаться модификации химическими и термическими методами [8, 9]. Таким образом, научно обоснованный и экономически целесообразный выбор глинистых материалов, способных сорбировать радионуклиды, связан с поиском доступных и дешевых природных материалов, которые могут обеспечить безопасное хранение/захоронение РАО на конкретном объекте, а также с изучением возможности их модификации для улучшения сорбционных свойств и характеристик.

Одним из перспективных сорбционных материалов для иммобилизации радионуклидов являются крупнотонажные отходы от переработки сильвинитовой руды предприятия ОАО «Беларуськалий» (Солигорск, Беларусь) – глинисто-солевые шламы (ГСШ). Данный вид промышленных отходов представляет собой суспензию глины в насыщенном растворе солей NaCl и KCl. В настоящее время ГСШ не используются и складируются в шламохранилищах, в которых накоплено более 110 млн т. Шламохранилища вследствие ветровой эрозии и высокой концентрации солей калия и натрия являются источником загрязнения не только прилегающих почв и территорий, но и поверхностных и подземных вод.

Целью данной работы является получение алюмосиликатных сорбентов на основе глинисто-солевых шламов, изучение их состава, физико-химических и сорбционных свойств по отношению к радионуклидам  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали следующие образцы:

РАДИОХИМИЯ том 62 № 3 2020

– ГСШ-1, ГСШ-2 и ГСШ-3 – исходные образцы глинисто-солевых шламов, отобранные из шламохранилищ 1-го, 2-го и 3-го рудоуправления ОАО «Беларуськалий» соответственно;

– АС-1о, АС-2о и АС-3о – образцы алюмосиликатных сорбентов, полученные путем промывки исходных образцов глинисто-солевых шламов (ГСШ-1, ГСШ-2 и ГСШ-3) дистиллированной водой с последующей сушкой до постоянной массы при 100°C в течение 6 ч;

– АС-1м, АС-2м и АС-3м – образцы алюмосиликатных сорбентов, полученные путем обработки раствором 0.1 моль/дм<sup>3</sup> HCl исходных образцов глинисто-солевых шламов (ГСШ-1, ГСШ-2 и ГСШ-3) с последующей промывкой дистиллированной водой и сушкой до постоянной массы при 100°C в течение 6 ч;

– ИС-3о – образец иллитового сорбента, полученный путем промывки образца ГСШ-3 дистиллированной водой с последующей обработкой нерастворимого осадка Трилоном Б, выделением фракции глинистых частиц с размером менее 2 мкм седиментационным методом с последующей сушкой до постоянной массы при 100°C в течение 6 ч;

– ИС-3м – образец иллитового сорбента, полученный путем промывки образца ГСШ-3 дистиллированной водой с последующей последовательной обработкой нерастворимого осадка раствором 0.1 моль/дм<sup>3</sup> HCl, Трилоном Б, выделением фракции глинистых частиц с размером менее 2 мкм седиментационным методом с последующей сушкой до постоянной массы при 100°C в течение 6 ч.

Количественный анализ содержания породообразующих оксидов в образцах сорбентов проводили рентгеноспектральным флуоресцентным методом на спектрометре последовательного действия модели Axios mAX, PANalytical. Удельную поверхность образцов определяли с использованием метода низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ) на установке Quadrasorb SI/Kr.

Минеральный анализ исходных и модифицированных образцов проводили методом рентгеновской дифракции при помощи рентгеновского дифрактометра Ultima-IV, Rigaku. Анализ результатов проводили согласно рекомендациям, описанным в работах [10, 11]. Количественный минеральный анализ проводили методом Ритвельда [12]

**Таблица 1.** Минералогический состав исходных образцов ГСШ

Минерал	Содержание в образцах, мас%		
	ГСШ-1	ГСШ-2	ГСШ-3
Кварц	6.7	5.2	7.4
КПШ (микроклин)	16.4	15.0	14.0
Доломит	24.8	20.5	19.6
Кальцит	2.6	2.2	2.9
Гипс	5.1	7.5	2.4
Каолинит	<0.1	1.5	0.5
Иллит	42.2	46.5	51.1
Хлорит	1.9	1.6	2.1

в программном пакете PROFEX GUI для BGMIN [13]. Соотношение глинистых минералов в тонких фракциях (<2 мкм) рассчитывали методом математического моделирования рентгеновских дифракционных картин от ориентированных препаратов в воздушно-сухом и насыщенном этиленгликолем состояниях в программном пакете Sybilla (Sevron).

Морфологические характеристики глинистой фракции размером менее 2 мкм изучали на просвечивающем электронном микроскопе TITAN 80-300 TEM/STEM.

Сорбционные характеристики образцов определяли на примере сорбции микроколичеств радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Перед использованием высушенные образцы растирали в ступке и просеивали через сито с размером ячеек 0.16 мм. Эксперименты проводили в статических условиях путем непрерывного перемешивания навески воздушно-сухого сорбента массой около 0.1 г, взвешенной с точностью 0.0001 г с 20 см<sup>3</sup> раствора в течение 48 ч. Затем смесь фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» и определяли в фильтрате удельную активность радионуклидов. По результатам анализов рассчитывали значения коэффициента распределения ( $K_d$ ) соответствующего радионуклида по формуле

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \cdot \frac{V_p}{m_c}, \quad (1)$$

где  $A_0$ ,  $A_p$  – соответственно удельная активность радионуклида в исходном растворе и в фильтрате после сорбции соответствующего радионуклида, Бк/дм<sup>3</sup>;  $V_p$  – объем жидкой фазы, см<sup>3</sup>;  $m_c$  – масса сорбента, г.

Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растворах определяли прямым радиометрическим методом с использованием спектрометрического комплекса СКС-50М (Грин стар технолоджиз, Москва), включающего гамма- и бета-спектрометрические тракты соответственно. Пробы, содержащие  $^{90}\text{Sr}$ , перед измерением выдерживали в течение не менее 14 сут для установления радиоактивного равновесия пары  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенному минеральному анализу (табл. 1), исходные образцы глинисто-солевых шламов ГСШ-1, ГСШ-2 и ГСШ-3 характеризуются в целом довольно близким составом с преобладанием иллита, доломита и калиевых полевых шпатов (КПШ).

Химический состав алюмосиликатных сорбентов АС-3о и АС-3м и иллитовых сорбентов ИС-3о и ИС-3м приведен в табл. 2.

Высокое содержание CaO в алюмосиликатных сорбентах отражает присутствие кальцита и гипса, MgO – доломита. Снижение этих показателей в образце модифицированного алюмосиликатного сорбента АС-3м свидетельствует о растворении карбонатов и гипса в результате обработки образца ГСШ-3 соляной кислотой. В ходе обработки образцов алюмосиликатных сорбентов ГСШ-3о и ГСШ-3м Трилоном Б при получении образцов иллитовых сорбентов ИС-3о и ИС-3м происходит

**Таблица 2.** Химический состав образцов сорбентов

Название образца	ППП, <sup>a</sup> %	Содержание, %									
		Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
АС-3о	18.17	0.22	8.02	10.43	37.37	5.95	10.72	0.59	0.06	4.08	0.18
АС-3м	7.85	0.14	2.96	15.12	58.45	8.77	0.46	0.94	0.02	4.97	0.06
ИС-3о	16.75	1.48	6.86	17.09	42.70	6.18	0.20	0.93	0.03	7.70	0.05
ИС-3м	12.40	1.54	4.19	15.39	50.47	6.92	0.09	1.23	0.03	7.65	0.05

<sup>a</sup> ППП – потери при прокаливании.

**Таблица 3.** Минеральный состав образцов сорбентов

Наименование минерала	AC-3о	ИС-3о	AC-3м	ИС-3м
Кварц	4.9	0.8	6.2	1.2
КПШ (микроклин)	21.8	7.2	27.8	14.2
Доломит-анкерит	17.0	<0.1	<0.1	<0.1
Кальцит	1.4	<0.1	<0.1	<0.1
Гипс	3.1	<0.1	<0.1	<0.1
Каолинит	2.0	1.0	0.8	1.0
Иллит	48.2	89.2	65.2	83.6
Хлорит	1.7	1.8	<0.1	<0.1

растворение гипса и карбонатов, в результате чего в тонкой фракции (<2 мкм) содержание CaO снижается еще больше.

В табл. 3 приведены результаты анализа минерального состава образцов алюмосиликатных сорбентов ГСШ-3о, ГСШ-3м и иллитовых сорбентов ИС-3о и ИС-3м.

Из табл. 3 видно, что в образцах иллитовых сорбентов ИС-3о и ИС-3м, которые получены в результате обработки образцов алюмосиликатных сорбентов ГСШ-3о и ГСШ-3м трилоном Б, значительно снижается содержание доломита-анкерита и гипса, которые растворяются в результате соответствующей химической обработки. Соответственно, в данных образцах заметно увеличивается содержание иллита, что приводит к увеличению удельной поверхности образцов иллитовых сорбентов (табл. 4).

Результаты исследования минералогического состава образцов (табл. 3) показывают, что выделение фракции глинистых частиц с размером менее 2 мкм из исходного образца ГСШ-3 по технологическим показателям наиболее целесообразно проводить путем его промывки водой с последующей обработкой нерастворимого осадка Трилоном Б (образец иллитового сорбента ИС-3о). При исследовании ориентированных препаратов были получены следующие соотношения глинистых минералов (рис. 1), мас%: иллит 97, каолинит 1.1, хлорит 1.9.

Частицы иллита в сорбенте ИС-3о обладают преимущественно гексагональным габитусом с поперечными размерами в пределах 10–100 нм (рис. 2, 3). Блочное строение с характерной ли-

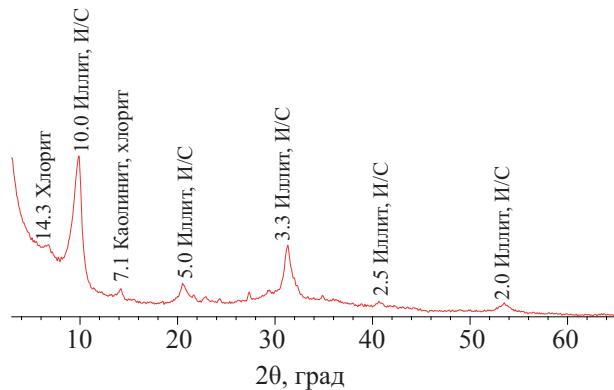
**Таблица 4.** Удельная поверхность образцов сорбентов

Шифр образца	Удельная поверхность ( $S_{BET}$ ), м <sup>2</sup> /г
ГСШ-3	28 ± 1
AC-3о	32 ± 1
AC-3м	66 ± 2
ИС-3о	60 ± 2
ИС-3м	71 ± 3

стовой морфологией частиц иллита способствует формированию довольно высокой удельной поверхности (60 ± 2 м<sup>2</sup>/г), которая определяет высокую степень сорбции радионуклидов из водных растворов [14].

Сорбционные характеристики по отношению к радионуклидам  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  изучали для образцов алюмосиликатных сорбентов ГСШ-3о, ГСШ-3м и иллитового сорбента ИС-3о. Значения коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  на различных образцах сорбентов при сорбции из раствора  $\text{NaNO}_3$  с концентрацией 0.1 и 1.0 моль/дм<sup>3</sup> приведены в табл. 5. Перед началом экспериментов в растворы вносили индикаторные количества  $^{137}\text{Cs}$  в количестве около  $10^5$  Бк/дм<sup>3</sup> и выдерживали в течение не менее 3 сут для установления равновесия между радиоактивными и неактивными компонентами раствора. Здесь и далее приведены средние значения  $K_d$  двух параллельных экспериментов.

Представленные в табл. 5 результаты показывают, что наибольшие значения  $K_d$   $^{137}\text{Cs}$  наблюдаются для образца иллитового сорбента ИС-3о с максимальным содержанием иллитовой фазы.



**Рис. 1.** Рентгеновская дифрактограмма образца иллитового сорбента ИС-3о (межплоскостные расстояния в Å).

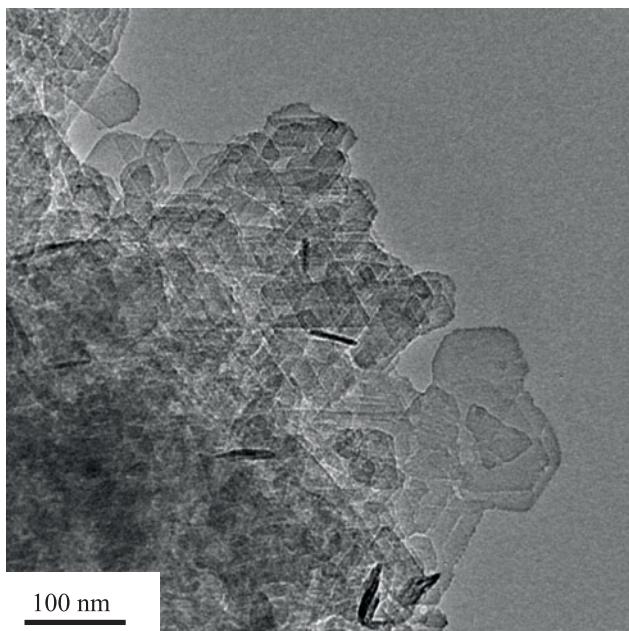


Рис. 2. Микрофотография глинистых частиц образца иллитового сорбента ИС-3о (метод ПЭМ).

Обработка исходного образца ГСШ-3 раствором 0.1 моль/дм<sup>3</sup> HCl несколько ухудшает сорбцию цезия полученным образом модифицированного алюмосиликатного сорбента АС-3м, что связано, по-видимому, с разрушением алюмосиликатного каркаса в кислотной среде.

На рис. 4 приведена зависимость  $K_d^{137}\text{Cs}$  от концентрации нитрата натрия в растворе на образцах алюмосиликатных сорбентов АС-3о, АС-3м и иллитового сорбента ИС-3о.

Представленные на рис. 4 результаты показывают, что значения  $K_d^{137}\text{Cs}$  на всех образцах закономо-

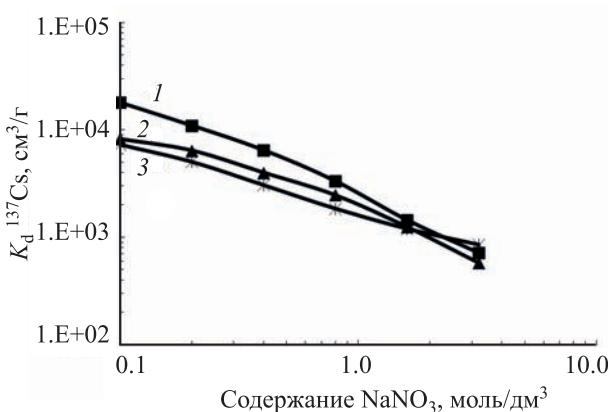


Рис. 4. Зависимость коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  от концентрации  $\text{NaNO}_3$  в растворе на образцах сорбентов: 1 – ИС-3о, 2 – АС-3о, 3 – АС-3м.

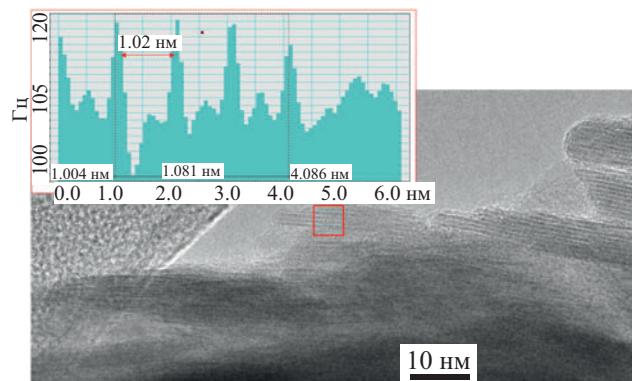


Рис. 3. Светлопольные ПЭМ-изображения с высоким разрешением (ВР ПЭМ) частиц иллита и профили интенсивности от выделенной области (образец ИС-3о).

мерно снижаются при увеличении концентрации  $\text{NaNO}_3$  в растворе. При этом полученные зависимости в билогарифмических координатах представляют собой прямые линии, что свидетельствует об ионообменном характере сорбции цезия.

При изучении сорбции  $^{90}\text{Sr}$  в качестве жидкой фазы использовали:

- водопроводную воду г. Москвы следующего состава, мг/дм<sup>3</sup>:  $\text{Na}^+$  6–8,  $\text{K}^+$  4–5,  $\text{Mg}^{2+}$  15–17,  $\text{Ca}^{2+}$  52–56,  $\text{Cl}^-$  6–8,  $\text{SO}_4^{2-}$  36–38,  $\text{HCO}_3^-$  200–205, общее солесодержание 310–330; общая жесткость 3.6–3.8 мг-экв/дм<sup>3</sup>, pH 7.3–7.8;

- раствор 0.01 моль/дм<sup>3</sup>  $\text{CaCl}_2$ , pH 6.0.

Перед началом экспериментов в растворы вносили индикаторные количества  $^{90}\text{Sr}$  в количестве около  $10^5$  Бк/дм<sup>3</sup> и выдерживали в течение 3 сут. Полученные значения коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{90}\text{Sr}$  на изученных образцах сорбентов в растворах различного состава приведены в табл. 6.

Представленные в табл. 6 результаты показывают, что сорбционно-селективные характеристики по отношению к  $^{90}\text{Sr}$  образцов сорбентов с высоким содержанием иллитовой фазы (ИС-3о, ИС-3м) значительно выше по сравнению с необогащенными образами АС-3о и АС-3м, что свидетельствует о превалирующем вкладе иллита в сорбционной активности к стронцию.

**Таблица 5.** Значения коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  на различных образцах сорбентов при сорбции из растворов 0.1 и 1.0 моль/дм<sup>3</sup> NaNO<sub>3</sub>

Наименование образца	$K_d$ $^{137}\text{Cs}$ , см <sup>3</sup> /г, при сорбции из раствора	
	0.1 моль/дм <sup>3</sup> NaNO <sub>3</sub>	1.0 моль/дм <sup>3</sup> NaNO <sub>3</sub>
AC-3о	7300 ± 100	2100 ± 50
AC-3м	6800 ± 100	1650 ± 50
ИС-3о	12000 ± 200	4800 ± 50

При сорбции из раствора 0.01 моль/дм<sup>3</sup> CaCl<sub>2</sub> сорбционные характеристики всех изученных сорбентов в значительной мере нивелируются, что связано с сильным конкурирующим влиянием ионов кальция на сорбцию стронция.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что в процессе модификации исходных образцов глинисто-солевых шламов (ГСШ) ОАО «Беларуськалий» происходит изменение их химического и минералогического состава. Установлено, что отмыка ГСШ водой с последующей обработкой соляной кислотой и Трилоном Б приводит к увеличению содержания основного компонента ГСШ – иллита – в 1.2–1.3 раза за счет растворения карбонатов (доломита-анкерита) и гипса. Показано, что присутствие иллита играет определяющую роль в сорбционной активности сорбентов по отношению к радионуклидам  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . При использовании обогащенных по иллиту образов сорбентов (ИС-3о и ИС-3м) значения коэффициентов распределения  $^{137}\text{Cs}$  увеличиваются в 2 раза, а  $^{90}\text{Sr}$  – в 20 раз по сравнению с необогащенными образцами алюмосиликатных сорбентов (AC-3о и AC-3м). Полученные результаты исследований свидетельствуют о перспективности получения на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» (Солигорск, Беларусь) алюмосиликатных сорбентов радионуклидов различного назначения. Алюмосиликатные сорбенты могут быть использованы для эффективной очистки жидких радиоактивных отходов от радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и создания дополнительных инженерных барьеров безопасности при строительстве пунктов захоронения радиоактивных отходов.

**Таблица 6.** Значения коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{90}\text{Sr}$  на образцах сорбентов в растворах различного состава

Наименование образца	$K_d$ $^{90}\text{Sr}$ , см <sup>3</sup> /г, при сорбции из раствора	
	водопроводная вода	0.01 моль/дм <sup>3</sup> CaCl <sub>2</sub>
AC-3о	335 ± 5	105 ± 5
AC-3м	320 ± 5	56 ± 3
ИС-3о	6250 ± 50	136 ± 5
ИС-3м	6300 ± 50	27 ± 3

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Савченко В.А. // Атом. техника за рубежом. 2004. № 7. С. 3.
- Коноплева И.В. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 4. С. 446.
- Semenkova A.S., Esviunina M.V., Verma P.K., Mohapatra P.K., Petrov V.G., Seregina I.F., Bolshov M.A., Krupskaya V.V., Romanchuk A.Yu., Kalmykov S.N. // Appl. Clay Sci. 2018. Vol. 166. P. 88.
- Крупская В.В., Закусин С.В., Тюпина Е.А., Чернов М.С. // Горный журн. 2016. Т. 2. С. 81.
- Poinsot C., Baeyens B., Bradbury M.H. Geochim. Cosmochim. Acta. 1999. Vol. 63, № 19/20. P. 3217.
- Разворотнева Л.И., Богуславский А.Е., Маркович Т.И. // Радиохимия. 2016. Т. 58, № 3. С. 274.
- Krupskaya V.V., Biryukov D.V., Belousov P.E., Lezhov V.A., Romanchuk A.Yu., Kalmykov S.N. // Radioactive Waste. 2018. N 2(3). P. 24.
- Maes A., Vanderheyden D., Cremers A. // Clays Clay Miner. 1985. Vol. 33. P. 215.
- Милютин В.В., Гелис В.М., Некрасова Н.А., Кононенко О.А., Везенцев А.И., Воловичева Н.А., Королькова С.В. // Радиохимия. 2012. Т. 54, № 1. С. 71.
- Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные минералы. М.: Наука, 1990. 214 с.
- Moore D.M., Reynolds R.C., Jr. // X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford: Oxford Univ. Press, 1997. 2nd ed. P. 378.
- Post J.E., Bish D.L. // Rev. Mineral. Geochem. 1989. Vol. 20. P. 277.
- Doebelin N., Kleeberg R. // J. Appl. Crystallogr. 2015. Vol. 48. P. 1573.
- Воронина А.В., Блинова М.О., Куляева И.О., Санин П.Ю., Семенищев В.С., Афонин Ю.Д. // Радиохимия 2015. Т. 57, № 5. С. 446.