

УДК 544.726.2; 621.039.735

DOI: 10.15372/ChUR2020240

Сорбция $^{137}\text{Cs}^+$ из водных сред иллитсодержащим сорбентом, полученным из глинисто-солевых шламов ОАО “Беларуськалий”

А. А. БАКЛАЙ¹, Л. Н. МОСКАЛЬЧУК^{1,2}, Т. Г. ЛЕОНТЬЕВА¹, Н. А. МАКОВСКАЯ¹¹Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси, Минск (Республика Беларусь)

E-mail: a.baklay@tut.by

²Белорусский государственный технологический университет, Минск (Республика Беларусь)

(Поступила 02.10.19; после доработки 13.02.20)

Аннотация

Представлены результаты комплексного исследования иллитсодержащего сорбента (ИС), полученного в результате кислотно-водной обработки образца глинисто-солевого шлама – промышленного отхода ОАО “Беларуськалий” (Республика Беларусь). Установлен вещественный состав ИС; основным глинистым минералом является иллит (65.2 мас. %). Определена удельная поверхность ИС – $(66 \pm 4) \text{ м}^2/\text{г}$. По минералогическому составу ИС относится к гидрослюдистой группе. Исследована сорбционная способность данного образца ИС по извлечению $^{137}\text{Cs}^+$ из природных вод различного химического состава. Показано, что основные ионы Ca^{2+} и Na^+ природных вод, а также pH водного раствора в интервале 5–9 не оказывают существенного влияния на сорбцию $^{137}\text{Cs}^+$ ИС. Определено, что ИС проявляет высокую селективность по отношению к $^{137}\text{Cs}^+$ при сорбции из водных сред, а ион K^+ – основной конкурент $^{137}\text{Cs}^+$. При концентрации K^+ в водной среде более 0.5 моль/л сорбция $^{137}\text{Cs}^+$ на ИС полностью прекращается. Установлено, что ИС извлекает $^{137}\text{Cs}^+$ из природных вод в 2–4 раза эффективнее, чем клиноптилолит Шивертуинского месторождения (Читинская обл., Россия), который в настоящее время используется в качестве сорбента $^{137}\text{Cs}^+$. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективах использования накопившихся в Республике Беларусь запасов глинисто-солевых шламов для получения ИС и дальнейшего его применения для очистки водных сред от $^{137}\text{Cs}^+$, а также решения ряда экологических проблем, включая реабилитацию радиоактивно загрязненных почв и территорий.

Ключевые слова: глинисто-солевые шламы, иллитсодержащий сорбент, природная вода, $^{137}\text{Cs}^+$, сорбция

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач рационального природопользования – решение проблемы утилизации крупнотоннажных промышленных отходов. В процессе переработки калийных руд, крупные месторождения которых находятся в Канаде, России, Республике Беларусь, Германии, США и Испании, независимо от способа, образуются крупнотоннажные отходы произ-

водства: твердые галитовые отходы и глинисто-солевые шламы (ГСШ). Последние представляют собой взвешенный осадок глины в насыщенном растворе солей KCl и NaCl . Удельный выход ГСШ на ОАО “Беларуськалий” (Республика Беларусь) составляет 0.6–0.7 м³ на 1 т готовой продукции. Глинисто-солевые шламы складированы в шламохранилищах, которые занимают площадь более 1100 га земной поверхности и выступают источником загрязне-

ния окружающей среды, следствием чего является ухудшение условий жизни человека [1]. По состоянию на 01.01.2019 объем накопленных ГСШ в шламохранилищах ОАО “Беларуськалий” составляет более 119 млн т, что позволяет рассматривать их как вторичные техногенные сырьевые ресурсы.

С другой стороны, поиск, разработка новых и усовершенствование существующих сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из водных сред – актуальное направление научных исследований в связи с обострением радиэкологических проблем, вызванных накоплением и распространением радиоактивного загрязнения в окружающей среде, особенно после крупных аварий на Чернобыльской АЭС (Украина, 1986 г.) и АЭС “Фукусима-1” (Япония, 2011 г.). Распространение радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в природных водных средах связано с их высокой миграционной способностью [2, 3].

Выбор сорбента определяется не только показателями сорбции радионуклида, но и его экономической целесообразностью применения, когда речь идет о дезактивации больших объемов радиоактивно загрязненных вод [4]. В современных технологиях очистки водных сред от $^{137}\text{Cs}^+$, основанных на процессах сорбции, используются природные глины, содержащие в своем составе глинистые минералы структурного типа 2 : 1. В отличие от синтетических сорбентов применение в сорбционном процессе природных глин обосновано их широкодоступностью, низкой себестоимостью при наличии крупных освоенных месторождений и эффективностью по отношению к $^{137}\text{Cs}^+$ [5–7].

Известно [7–9], что иллит с плотносжатыми слоями и расширенными зонами на их концах характеризуется наибольшими сорбционными свойствами по отношению к $^{137}\text{Cs}^+$ среди глинистых минералов структурного типа 2 : 1. В работе [10] установлено, что основными минералами ГСШ являются иллит, калиевый полевой шпат и доломит.

В связи с вышеизложенным одним из перспективных направлений утилизации ГСШ является получение из них иллитсодержащего сорбента (ИС) для извлечения $^{137}\text{Cs}^+$ из водных сред, что определяет актуальность и необходимость проведения данных исследований.

Цель настоящей работы – оценка эффективности извлечения $^{137}\text{Cs}^+$ из водных сред ИС, полученным из ГСШ ОАО “Беларуськалий”.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования использован образец ГСШ, отобранный из шламохранилища Третьего рудоуправления ОАО “Беларуськалий” (г. Солигорск, Республика Беларусь). Основными минеральными фазами в составе нерастворимого в воде осадка ГСШ является иллит, доломит и калиевый полевой шпат, а содержание водорастворимых солей KCl и NaCl составляет (5.4 ± 0.3) мас. % [10]. В данной работе показано, что ГСШ имеют низкую сорбционную способность при извлечении $^{137}\text{Cs}^+$ из водопроводной воды (г. Минск, Республика Беларусь). Увеличить сорбционную способность образца ГСШ по отношению к $^{137}\text{Cs}^+$ предполагается как за счет его обогащения иллитом путем удаления пустой породы (карбонатных минералов – доломита и кальцита), так и за счет снижения содержания водорастворимых солей (KCl и NaCl) и гипса.

Образец ИС получали из образца ГСШ путем его кислотнo-водной обработки согласно методике, приведенной в [11]. В данной работе представлен также минералогический и химический состав образцов ГСШ и ИС.

Сорбционные характеристики образцов ГСШ и ИС определяли на примере сорбции микроколичеств $^{137}\text{Cs}^+$. Удельная активность растворов, приготовленных с добавлением радиоактивной метки $^{137}\text{Cs}^+$, составляла $(5.2 \pm 0.3) \cdot 10^6$ Бк/дм³. Кинетику сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ образцом ИС изучали в условиях ограниченного объема при температуре (20 ± 2) °С, используя для приготовления радиоактивного раствора $^{137}\text{Cs}^+$ водопроводную воду г. Минска. Навески образца ИС массой 0.100 г помещали в центрифужные пробирки и добавляли в них по 10 см³ радиоактивного раствора $^{137}\text{Cs}^+$. Полученные суспензии периодически перемешивали. Через заданные промежутки времени (0.25, 0.5, 1, 3, 5, 10 ч) отделяли жидкую фазу от твердой путем фильтрования через бумажный фильтр “синяя лента” с предварительным центрифугированием (15 мин, 6000 об/мин). Дальнейшие эксперименты по сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ проводили при тех же условиях с учетом времени, необходимого для достижения равновесия в системе “сорбент – раствор”. В полученном фильтрате определяли удельную активность $^{137}\text{Cs}^+$ прямым спектрометрическим методом по линии с энергией кванта $E_{\gamma} = 662$ кэВ с использованием универсального

спектрометрического комплекса РУС-91М (ООО НПП “Доза”, Россия).

При изучении сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ в качестве жидкой фазы использовали модельные и природные образцы водных сред с разным солевым составом, водопроводную воду г. Минска следующего состава: рН 7,8, общая минерализация 294 мг/дм^3 , общая щелочность 3.1 мг-экв/дм^3 , концентрация катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ составляет 54 , 17 , 8 и 4 мг/дм^3 соответственно. Определяли оптимальные условия сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ (рН водной среды, доза образца сорбента). Для получения необходимого значения рН применяли 0.1 М растворы HCl и NaOH . Перед началом экспериментов в растворы вносили индикаторные количества $^{137}\text{Cs}^+$ и выдерживали не менее 1 сут для установления радиохимического равновесия.

Модельные растворы готовили растворением навески соответствующих нитратов $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, NaNO_3 и KNO_3 квалификации “х. ч.” в водопроводной воде. Эксперименты по сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ из модельных растворов с рН 6,9 проводили в статических условиях путем перемешивания навески измельченного образца ИС массой 0.100 г с 20 см^3 раствора в течение 4 ч.

Степень сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ (S , %), коэффициент распределения $^{137}\text{Cs}^+$ (K_d , $\text{дм}^3/\text{кг}$) и коэффициент очистки ($K_{\text{оч}}$) рассчитывали по формулам:

$$S = \frac{A_0 - A_p}{A_0} 100 \% \quad (1)$$

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \frac{V}{m} \quad (2)$$

$$K_{\text{оч}} = \frac{A_0}{A_p} \quad (3)$$

где A_0 , A_p – исходная и равновесная удельная активность $^{137}\text{Cs}^+$ соответственно, Бк/дм^3 ; V – объем жидкой фазы, дм^3 ; m – масса образца, кг .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Глинистые минералы, используемые для очистки природных вод от $^{137}\text{Cs}^+$, различаются своими текстурными и сорбционными характеристиками. В работах [7, 12, 13] показано, что сорбционные свойства глин напрямую зависят от содержания в них глинистых минералов и структурных особенностей последних. В работе [11] установлено, что содержание иллита (65.2 мас. \%) и удельная поверхность ($66 \pm 4 \text{ м}^2/\text{г}$) образца ИС выше в 1.4 и 2.4 раза соответственно, чем для образца ГСШ.

Для оценки технологических свойств сорбционного материала необходимым критерием

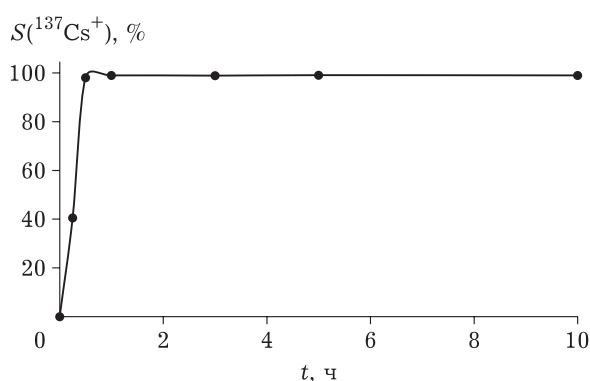


Рис. 1. Зависимость степени сорбции (S) $^{137}\text{Cs}^+$ образцом ИС от времени (t) из водопроводной воды (г. Минск, рН 7,8).

кроме селективности служит скорость сорбционного процесса. Данный параметр позволяет определить эффективное время сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ для обеспечения достаточной степени его извлечения сорбентом из водных сред. На рис. 1 приведена зависимость степени сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ (S) из водопроводной воды (г. Минск) образцом ИС от продолжительности контакта твердой и жидкой фаз.

Видно, что наиболее быстро сорбция $^{137}\text{Cs}^+$ протекает в начальный период времени. Форма кинетической кривой показывает, что степень сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ за первые 30 мин процесса возрастает, о чем свидетельствует резкий подъем кривой. Затем темп быстро снижается, и кривая выходит на плато, соответствующее уровню максимальной сорбции $^{137}\text{Cs}^+$. Установлено (см. рис. 1), что эффективное время достижения максимальной степени сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ не превышает 1 ч, после чего наступает равновесие, и содержание $^{137}\text{Cs}^+$ в водопроводной воде не изменяется.

Исследование сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ из водопроводной воды г. Минска образцами ГСШ и ИС (объем раствора 10 см^3 , масса образца ГСШ или ИС 0.100 г , время сорбции 4 ч) показало, что величины коэффициентов распределения (K_d) $^{137}\text{Cs}^+$ для данных образцов составляют (503 ± 48) и $(9700 \pm 520) \text{ дм}^3/\text{кг}$ соответственно. При сравнительном анализе величин K_d $^{137}\text{Cs}^+$ для образцов ГСШ и ИС установлено, что в результате кислотно-водной обработки исходного образца ГСШ сорбция $^{137}\text{Cs}^+$ из водопроводной воды возросла в 19.3 раза.

Значение рН водного раствора – один из важных параметров, влияющих на величину K_d радионуклидов в системе “сорбент – водный раствор” [14]. Природные воды (поверхностные и подземные) различаются не только по составу

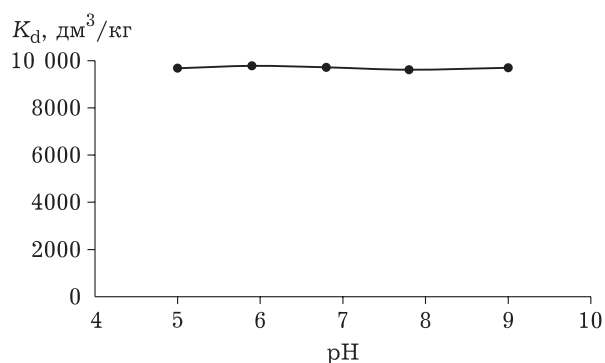


Рис. 2. Зависимость коэффициента распределения (K_d) $^{137}\text{Cs}^+$ для образца ИС от pH водного раствора (объем раствора 10 см³, масса образца ИС 0.100 г, время сорбции 4 ч).

ву, но и по кислотности. В работах [15, 16] показано, что pH поверхностных вод колеблется в пределах 6.5–8.5, а подземных вод – в интервале $0 < \text{pH} < 12$, но в большинстве случаев составляет 6.0–8.5.

Исследование влияния pH водного раствора на величину K_d $^{137}\text{Cs}^+$ проведено в диапазоне значений pH 5–9. Полученная зависимость K_d $^{137}\text{Cs}^+$ для ИС от pH водного раствора, приготовленного с использованием водопроводной воды, приведена на рис. 2. Видно, что K_d $^{137}\text{Cs}^+$ незначительно изменяется в исследуемом диапазоне pH и составляет в среднем 9700 дм³/кг.

Доза сорбента, как и значение pH водного раствора, является важным параметром, который необходимо учитывать при выборе оптимальных условий сорбции $^{137}\text{Cs}^+$, так как это влияет на стоимость процесса очистки водных сред. В этой связи для оценки эффективности извлечения $^{137}\text{Cs}^+$ из водных растворов образцом ИС исследована сорбция $^{137}\text{Cs}^+$ из водопроводной воды при варьировании дозы сорбента в диапазоне от 0.5 до 10 г/дм³ и продолжительности сорбции 4 ч, достаточной для установления равновесия в системе “сорбент – раствор” (рис. 3). Из представленных данных следует, что максимальный коэффициент очистки ($K_{\text{оч}}$) водопроводной воды от $^{137}\text{Cs}^+$ достигается при дозе образца ИС не менее 4 г/дм³ и составляет 98. В дальнейших экспериментах по сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ из водных сред использовали дозу ИС, равную 5 г/дм³.

Согласно данным работ [7, 17], в природных водных средах даже с относительно высоким уровнем радиоактивности концентрация $^{137}\text{Cs}^+$ значительно ниже концентраций ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , характерных для природных вод. Основными ионами природных вод среди одно- и двухвалентных ионов являются Na^+ и Ca^{2+} соответственно. Калий, как геохимический аналог

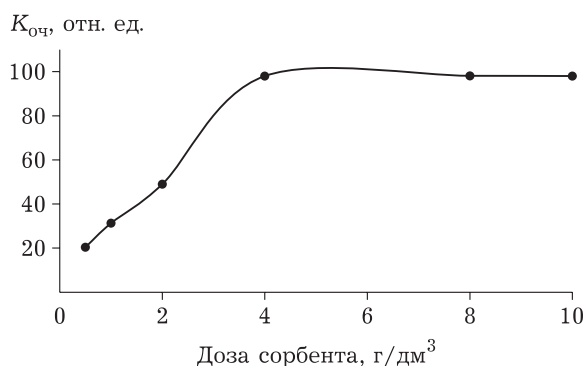


Рис. 3. Зависимость коэффициента очистки ($K_{\text{оч}}$) от дозы ИС (объем раствора 10 см³, масса образца ИС 0.100 г, время сорбции 4 ч).

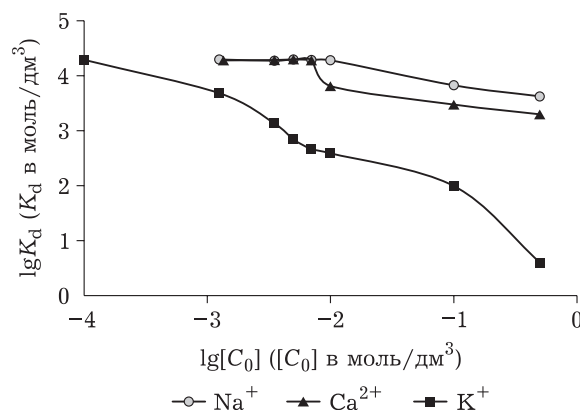


Рис. 4. Зависимость коэффициента распределения (K_d) $^{137}\text{Cs}^+$ для образца ИС от концентрации [C_0] ионов Ca^{2+} , Na^+ и K^+ в модельном растворе в логарифмических координатах.

цезия, существенно влияет на сорбцию $^{137}\text{Cs}^+$ глинистыми минералами структурного типа 2 : 1 [7, 17]. В этой связи для оценки селективности образца ИС по отношению к $^{137}\text{Cs}^+$ исследовано влияние концентраций присутствующих в водных средах конкурирующих ионов Ca^{2+} , Na^+ и K^+ на сорбционное извлечение $^{137}\text{Cs}^+$ из водных растворов.

В процессе сорбции $^{137}\text{Cs}^+$ из модельных растворов значение pH не изменялось. Удельная активность $^{137}\text{Cs}^+$ в исходном растворе составляла $(5.2 \pm 0.3) \cdot 10^6$ Бк/дм³, что эквивалентно концентрации $^{137}\text{Cs}^+$ в растворе $(1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-8}$ моль/дм³. На рис. 4 приведена зависимость K_d $^{137}\text{Cs}^+$ для образца ИС от концентрации ([C_0], моль/дм³) ионов Ca^{2+} , Na^+ и K^+ в модельном растворе в логарифмических координатах.

Видно, что на селективность извлечения $^{137}\text{Cs}^+$ образцом ИС наиболее существенное влияние среди изученных ионов оказывает присутствие в растворе K^+ , особенно при его высоких концентрациях. Образец ИС селективно сорбирует

ТАБЛИЦА 1

Химический состав образцов природных вод

Показатель	Образец		
	1	2	3
рН	7.8	7.4	7.1
Общая минерализация, мг/дм ³	294	1950	6652
Общая щелочность, мг-экв/дм ³	3.1	4.3	70.1
Содержание ионов, мг/дм ³ :			
Ca ²⁺	54	475	121
Mg ²⁺	17	53	87
Na ⁺	8	18	1754
K ⁺	4	5	32

¹³⁷Cs⁺ из модельного раствора при [C₀](K⁺) в нем менее 1 ммоль/дм³, а при [C₀](K⁺) = 0.5 моль/дм³ сорбция ¹³⁷Cs⁺ на ИС практически полностью прекращается. Влияние конкурирующих ионов Ca²⁺, Na⁺ и K⁺ на перераспределение ¹³⁷Cs⁺ в системе “ИС – природная вода” изучено на образцах водопроводной и подземных вод с различным химическим составом (табл. 1). Образец 1 (водопроводная вода, г. Минск, Республика Беларусь) характеризуется низкой минерализацией, в образце 2 (вода из подземной скважины, Витебская обл., Республика Беларусь) преобладают ионы Ca²⁺, а образец 3 (вода из подземной скважины, г. Боржоми, Грузия) характеризуется наибольшей минерализацией среди отобранных образцов и высокой концентрацией ионов Na⁺ по сравнению с ионами Ca²⁺ (см. табл. 1).

В табл. 2 приведены значения коэффициента распределения K_d ¹³⁷Cs⁺ для образца ИС при сорбции ¹³⁷Cs⁺ из природных вод. Для сравнения значений K_d в аналогичных условиях проводили сорбцию ¹³⁷Cs⁺ на природном клиноптилолите Шивертуинского месторождения (Читинская обл., Россия), используемом в настоящее время в качестве сорбента ¹³⁷Cs⁺ [6, 18].

Согласно полученным результатам, сорбция ¹³⁷Cs⁺ из природных вод на ИС протекает в 2–4 раза эффективнее по сравнению с природным клиноптилолитом. Сравнительный анализ данных (см. рис. 3 и табл. 1, 2) показывает, что они не противоречат друг другу и подтверждают тот факт, что ионы Ca²⁺ и Na⁺ не оказывают существенного влияния на сорбцию ¹³⁷Cs⁺ из природных вод образцом ИС.

Таким образом, ИС, полученный из ГСШ ОАО “Беларуськалий”, является эффективным сорбентом для извлечения ¹³⁷Cs⁺ из природных вод. Кроме того, возможным направлением его использования может стать реабилитация загрязненных

ТАБЛИЦА 2

Значения коэффициента распределения K_d ¹³⁷Cs⁺ для иллитсодержащего сорбента и природного клиноптилолита

Сорбент	K _d (¹³⁷ Cs ⁺) · 10 ³ образца, дм ³ /кг		
	1	2	3
Иллитсодержащий сорбент	19.2 ± 0.6	18.8 ± 0.7	8.5 ± 0.4
Природный клиноптилолит	8.8 ± 0.4	6.9 ± 0.3	2.1 ± 0.1

¹³⁷Cs территорий для снижения перехода ¹³⁷Cs⁺ из почвы в сельскохозяйственные растения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что ГСШ являются перспективным материалом для получения из них ИС, который может быть использован для эффективной очистки природных вод от ¹³⁷Cs⁺. Установлено, что при сорбции ¹³⁷Cs⁺ из водопроводной воды (г. Минск) образцом ИС время достижения равновесия в системе “сорбент – раствор” составляет не более 1 ч. Определено, что ИС проявляет высокую селективность по отношению к ¹³⁷Cs⁺ при сорбции из природных вод, а ион K⁺ является его основным конкурентом. При концентрации K⁺ в водной среде более 0.5 моль/дм³ сорбция ¹³⁷Cs⁺ на ИС практически полностью прекращается. Разработан простой способ модификации ГСШ, включающий его обогащение иллитом и снижение содержания водорастворимого калия. Это позволило увеличить сорбционную способность материала по отношению к ¹³⁷Cs⁺ в 19.3 раза и получить ИС, эффективность которого при извлечении ¹³⁷Cs⁺ из природных вод в 2–4 раза выше, чем клиноптилолита Шивертуинского месторождения (Читинская обл., Россия), используемого в настоящее время для извлечения ¹³⁷Cs⁺. Установлено, что оптимальными условиями сорбции ¹³⁷Cs⁺ из природных вод являются: рН 5–9 и доза ИС не менее 4 г/дм³ при времени сорбции 4 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Богатов Б. А., Смычник А. Д., Шемет С. Ф. Геоэкология калийного производства. Минск: ЗАО “Юнипак”, 2005. 200 с.

- 2 Попова Н. Н., Тананаев И. Г., Ровный С. И., Мясоедов Б. Ф. Технеций: поведение в процессах переработки облученного ядерного топлива и в объектах окружающей среды // *Успехи химии*. 2003. Т. 72, № 2. С. 115–137.
- 3 Новиков А. П., Калмыков С. Н., Ткачев В. В. Формы существования и миграции актиноидов в окружающей среде // *Рос. хим. журн.* 2005. Т. XLIX, № 2. С. 119–126.
- 4 Ambashta R. D., Sillanpaa M. Water purification using magnetic assistance: A review // *J. Hazard. Mater.* 2010. Vol. 180, No. 1–3. P. 38–49.
- 5 Рябчиков Б. Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. М.: ДеЛи принт, 2008. 512 с.
- 6 Милютин В. В., Гелис В. М., Некрасова Н. А., Кононенко О. А., Везенцев А. И., Воловичева Н. А., Королькова С. В. Сорбция радионуклидов Cs, Sr, U и Pu на природных и модифицированных глинах // *Радиохимия*. 2012. Т. 54, № 1. С. 71–74.
- 7 Коноплева И. В. Селективная сорбция радиоцезия сорбентами на основе природных глин // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2016. Т. 16, № 4. С. 446–456.
- 8 Benedicto A., Missana T., Fernandes A. M. Interlayer collapse affects on cesium adsorption onto illite // *Environ. Sci. Technol.* 2014. Vol. 48, No. 9. P. 4909–4915.
- 9 Okumura M., Kerisit S., Bourg I. C., Lammers L. N., Ikeda T., Sassi M., Rosso K. M., Machida M. Radiocesium interaction with clay minerals: Theory and simulation advances post-Fukushima // *J. Environ. Radioact.* 2018. Vol. 189. P. 135–145.
- 10 Леонтьева Т. Г., Баклай А. А., Москальчук Л. Н. Перспективы использования глинисто-солевых шламов ОАО “Беларуськалий” для очистки водных сред и экосистем от радиоцезия // *Труды БГТУ*. 2016. № 3. С. 74–80.
- 11 Леонтьева Т. Г., Москальчук Л. Н., Баклай А. А., Маковская Н. А. Состав, структура и селективная сорбция ионов цезия алюмосиликатным сорбентом, полученным из отходов калийного производства ОАО “Беларуськалий” // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2018. Т. 18, № 5. С. 726–735.
- 12 Прядко А. В., Жаркова В. О., Ершова Я. Ю., Тюпина Е. А., Крупская В. В. Сорбция Cs из водной среды на природных бентонитах различных месторождений // *Успехи в химии и хим. технологии*. 2017. Т. XXXI, № 10. С. 19–21.
- 13 Москальчук Л. Н., Баклай А. А., Леонтьева Т. Г., Стреленко Д. К. Сорбционные материалы на основе бентонитовой глины месторождения “Острожанское” для обеспечения безопасного обращения с радиоактивными отходами // *Труды БГТУ*. 2015. № 3. С. 70–77.
- 14 Велешко А. Н., Кулюхин С. А., Велешко И. Е., Домантовский А. Г., Розанов К. В., Кислова И. А. Сорбция радионуклидов композитными материалами на основе природного биополимера Микотон из растворов // *Радиохимия*. 2008. Т. 50, № 5. С. 439–445.
- 15 Макаров В. Н., Кременецкая И. П., Васильева Т. Н., Корытная О. П. Физико-химическое обоснование технологии снижения уровня закисления природной воды кальцитсодержащими реагентами // *Химия уст. развития*. 2006. Т. 14, № 1. С. 33–38.
- 16 Аншиц А. Г., Ревенко Ю. А., Верещагина Т. А., Воробьев А. В., Бульонков Л. А. Физикохимические критерии долговременного захоронения радиоактивных отходов в оксидной форме (обзор) // *Химия уст. развития*. 1998. Т. 6, № 3. С. 293–302.
- 17 Jeong C. H., Kim C. S., Kim S. J., Park S. W. Affinity of radioactive cesium and strontium for illite and smectite clay in the presence of groundwater ions // *J. Environ. Sci. Health*. 1996. Vol. 31, No. 9. P. 2173–2192.
- 18 Королькова С. В. Коллоидно-химические свойства монтмориллонит-иллитовых глин, активированных солевыми растворами: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2012.