

УДК 622.7, 553.556 : 622.353.4.004

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКИХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ
ИЗ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ АДСОРБЕНТАМИ
НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД**

К. К. Размахнин^{1,2}, Л. В. Шумилова¹, И. Б. Размахнина¹

¹Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН

E-mail: igdranchita@mail.ru, ул. Александрo-Заводская, 30, 672032, г. Чита, Россия

²ФГАУ Научно-исследовательский институт "Центр экологической и промышленной политики",
пер. Стремянный, 38, 115054, г. Москва, Россия

Предложена технология обогащения и модификации цеолитсодержащих пород Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений с целью получения высококачественных сорбционных материалов, используемых при извлечении редких щелочных металлов из гидроминерального сырья. Представлен минеральный состав цеолитсодержащих пород и приведены результаты их электромагнитной и электростатической сепараций. На примере модельного раствора, содержащего катионы редких щелочных металлов, проанализирована сорбционная способность исходных, обогащенных и модифицированных цеолитсодержащих пород Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений. Исследована зависимость степени сорбции редких щелочных металлов от соотношения раствор/сорбент. Изучено влияние катионов, входящих в состав модельного раствора, на емкость цеолитов. Полученные показатели очистки вод характеризуются как достаточно высокие и позволяют обеспечить необходимый уровень качества стоков.

Цеолитсодержащие породы, извлечение, редкие щелочные металлы, гидроминеральное сырье, растворы сложного состава, сорбция, обогащение, модифицирование, наилучшие доступные технологии

DOI: 10.15372/FTPRPI20250315

EDN: PKJRMZ

При возрастающем спросе на редкоземельные элементы (РЗМ) актуализируются вопросы их добычи и развития горнопромышленной отрасли в целом. Кроме того, проблема выработки крупных запасов России определяет значимость изучения возможности вовлечения в переработку более бедных по содержанию месторождений и освоения новых технологий синтеза и искусственного получения ценных элементов. В частности, источником редких щелочных металлов, таких как рубидий, цезий и литий, наряду с рудным сырьем, могут являться природные минерализованные воды (гидроминеральное сырье) и растворы сложного состава (отходы атомной промышленности). Это актуализирует вопрос разработки эффективного и экономически целесообразного способа извлечения редких щелочных металлов из жидкой среды. Гидроминеральное сырье, помимо редких щелочных металлов, содержит следующие компоненты: NH_4 , Na, K, Mg, Ca, Sr, Fe, Al, Mn, B, Cl, Br, I, SO_4 , HCO_3 , CO_3 , NO_2 , NO_3 , SiO_2 (H_4SiO_4), в некоторых случаях (углекислые воды) F, As, Sb, которые также могут быть рассмотрены в качестве потенциальных для извлечения [1, 2].

Один из наиболее эффективных способов извлечения ионов металлов из гидроминерального сырья и растворов сложного состава — сорбция, осуществляемая на сорбентах различного происхождения (синтетические, природные). Природные сорбенты отличаются от синтетических (фосфат циркония, ферроцианиды переходных металлов, формальдегидные полимеры, сорбенты фенольного типа и др.) доступностью (широко распространены на территории России) и относительной дешевизной. К сорбентам, имеющим природное происхождение, относятся цеолитсодержащие породы, основной сорбционный элемент которых представлен цеолитами (клиноптилолит, морденит, шабазит и т. п.), уникальными минералами, обладающими высокими сорбционными свойствами ко многим химическим элементам (медь, уран, стронций и т. д.) [1, 3, 4].

Цель настоящего исследования — оценка возможности сорбционного (методом ионного обмена) извлечения природными цеолитами редких щелочных металлов из модельных растворов сложного состава, имитирующих гидроминеральное сырье. К основным задачам относятся: разработка схемы обогащения и модификации цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений; исследование зависимости степени сорбции редких щелочных металлов от соотношения раствор/сорбент; оценка влияния катионов, входящих в состав модельного раствора, на емкость цеолитов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения исследований использованы следующие методы и методология: патентный поиск; информационный анализ; оценка существующих научных разработок в области сорбционного извлечения редких щелочных металлов; лабораторные методы обогащения цеолитсодержащих пород; определение физико-химических свойств природных цеолитов; изучение сорбционных характеристик цеолитов по отношению к редким щелочным металлам, сорбционной емкости цеолитов; контроль химического состава и количественного определения редких щелочных металлов в модельном растворе сложного состава (имитирующем гидроминеральное сырье).

По результатам патентного поиска и информационного анализа развития техники и технологии извлечения редких щелочных металлов из гидроминерального сырья сорбционными методами установлено, что практика данного метода не является развитой и широко применяемой, а использование природных цеолитов для сорбции редких щелочных металлов изучена в недостаточной степени [4–6]. При этом остается неисследованной возможность сорбционного извлечения и концентрирования редких щелочных металлов (цезия и рубидия) из гидроминерального сырья (с низким содержанием в растворе), их отделения друг от друга и от иных компонентов раствора [7–9].

Для процесса применения цеолитовых сорбентов в качестве ионообменников большое значение имеет ряд определяющих факторов: высокая сорбционная селективность цеолитов к извлекаемым элементам (катионам), достаточная обменная емкость, механическая устойчивость при многократных циклах сорбция – десорбция, а также необходимая разница в коэффициентах разделения редких щелочных металлов между собой и иными компонентами раствора [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе исследований изучена избирательность цеолитов Шивыртуйского (основной цеолитовый минерал — клиноптилолит) и Талан-Гозагорского (шабазит) месторождений к цезию. При выборе сорбентов учитывался масштаб залежей (запасы Шивыртуйского месторождения — 4.5 млрд т, Талан-Гозагорского — 150 млн т), географический аспект — оба место-

рождения расположены в Забайкальском крае (Краснокаменский район) и характеризуются следующими особенностями: доступностью Транссибирской железнодорожной магистрали, наличием необходимой инфраструктуры, достаточно высоким содержанием цеолитовых минералов в породе (36–65 %). Минеральный состав цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Минеральный состав цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений, % [1, 3]

Минерал	Содержание минеральных фаз			
	Шивыртуйское месторождение			Талан-Гозагорское месторождение
	$\alpha_{\text{цеолит}}$	$\alpha_{\text{монтмор-цеолит}}$	$\alpha_{\text{монтмор}}$	$\alpha_{\text{шабазит}}$
Клиноптилолит	45–65	30–40	22–30	—
Морденит	—	—	—	—
Шабазит	—	—	—	8–36
Монтмориллонит	15–20	25–60	65–78	8–10
Гидрослюды	3–5	3–5	3–5	2–3
Кварц	3–10	3–10	3–10	5–10
Кальцит	2–5	2–5	2–5	~2
Микроклин	3–5	3–5	3–5	—
Плагиоклазы	—	—	—	—
Кристобалит	2–3	2–3	2–3	—
Пироксены	—	—	—	~21
Рентгеноаморфная фаза	<5	<5	<5	—
Распределение железа по фазам, % / отн. вес.:				
гематит	32.3 / 0.40	32.3 / 0.40	32.3 / 0.40	59.3 / 4.9
монтмориллонит	56.4 / 0.71	56.4 / 0.71	56.4 / 0.71	9.4 / 0.77
гидрослюда, тонкодисперсные гидроксиды железа	11.3 / 0.14	11.3 / 0.14	11.3 / 0.14	21.2 / 1.7
Оливин	—	—	—	10.1 / 0.8

Оценка избирательности природных цеолитов к цезию осуществлялась в статических условиях с применением метода Плакетта – Бермана, основанного на выборе наиболее важных факторов исследования и направленного на эффективную постановку экспериментов с целью достижения максимальной точности измерений при минимальном количестве опытов [10–12]. Выбраны три основных фактора: содержание цеолита в концентрате; соотношение раствор/цеолит; влияние катионов на емкость цеолитов по цезию. Данный метод позволил провести оценку влияния содержащихся в растворе компонентов (катионов) на эффективность сорбции Cs^+ цеолитами Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений. Определены также значения емкости цеолитовых минералов (клиноптилолита для Шивыртуйского месторождения и шабазита для Талан-Гозагорского).

Установлены соотношение раствор/цеолит — 100, концентрация цезия — 270 мг/л, концентрация катионов водорода, лития, натрия, калия, рубидия, магния, кальция, стронция, бария и аммония (NH_4^+) в модельном растворе варьировалось от 0 до 0.1 г-экв/л. Раствор пропускали

через адсорбционную колонку с цеолитами до наступления равновесия, затем сорбенты подвергались промывке и анализировались на содержание Cs. Принцип действия установки для адсорбции, состоящей из усреднительной емкости, насоса, фильтра, трех колонн сорбции и емкости для очищенной воды, предполагает введение цеолита и последовательную работу первых двух сорбционных колонн, третья колонна предназначена для регенерации цеолитов.

Исследования по изучению возможности извлечения цезия природными цеолитами из модельного раствора, имитирующего гидроминеральное сырье, проводились по двум вариантам наполнения сорбционной колонны: исходными цеолитсодержащими породами; обогащенными и модифицированными породами (содержание минералов цеолитов 95 %).

Обогащение и модифицирование цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений осуществлялось для повышения эффективности процесса сорбции Cs из модельного раствора и включало следующие операции (рисунок): дробление; акустическое (ультразвуковое) воздействие с целью интенсификации процесса отделения цеолитовых минералов от загрязняющих примесей и очистки входных окон цеолитов за счет возникновения разупрочняющего эффекта, создаваемого избыточным давлением в их полостях; обесшламливание; электромагнитную (сепаратор СИМ-1; напряженность магнитного поля 900–1450 кА/м) и электростатическую сепарацию для извлечения из пород магнитных и немагнитных примесей (оливин, гидрослюда, гематит, кварц); сушку и дальнейшую активацию (модифицирование) путем обработки катализатором на основе соединений ванадия по методике, предложенной в [13].



Схема обогащения и модифицирования цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений

Для получения более устойчивых к механическим воздействиям и многократным циклам сорбция – десорбция материалов модифицированные цеолиты класса крупности – 0.1 мм подвергались капсулированию (таблетированию) с соблюдением необходимых формы и размеров. Толщина капсулы составляла 2 – 8 мм при содержании полиэтилена 2.9 масс. %. Цеолиты классов крупности – 2 + 1, – 1.0 + 0.5, – 0.5 + 0.3, – 0.3 + 0.1 мм могут применяться в адсорбционных процессах без капсулирования или гранулирования.

Регенерация (десорбция Cs и Rb) цеолитов осуществлялась в динамических условиях путем промывки элюентом, в качестве которого использовался раствор серной кислоты различной концентрации 0.005 – 1 М. Схема регенерации природных цеолитов Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений включала пропускание в качестве элюента 0.30 М раствора серной кислоты со скоростью 1.3 м/ч.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что извлечение магнитных примесей из цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений класса крупности – 2 + 0.1 мм составило 97.2 и 99.1 % соответственно, содержание минералов цеолита в концентрате — 96 %.

Результаты электромагнитной и электростатической сепараций цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений представлены в табл. 2 и 3.

ТАБЛИЦА 2. Результаты электромагнитной сепарации цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений крупностью – 2 + 0.1 мм в изодинамическом поле

Месторождение / Основной цеолитовый минерал	Напряженность магнитного поля, Н, кА/м	Удельная магнитная сила, Н/с ²	Сила тока, А	Класс крупности пород, мм	Извлечение Fe-примесей, в магнитный продукт, %	Массовая доля Fe-примесей в магнитном продукте
Шивыртуйское месторождение / Клиноптилолит	950	0.0103	1.0	– 2 + 1	87.4	60.2
				– 1 + 0.5	91.1	63.7
				– 0.5 + 0.3	93.7	72.7
				– 0.3 + 0.1	96.2	84.3
	1450	0.0153	1.57	– 2 + 1	87.7	60.7
				– 1 + 0.5	93.8	65.4
				– 0.5 + 0.3	94.1	73.1
				– 0.3 + 0.1	97.2	84.6
Талан-Гозагорское месторождение / Шабазит	950	0.0103	1.0	– 2 + 1	91.8	90.7
				– 1 + 0.5	92.4	91.4
				– 0.5 + 0.3	96.2	95.0
				– 0.3 + 0.1	98.7	96.2
	1450	0.0153	1.57	– 2 + 1	92.1	91.5
				– 1 + 0.5	93.8	94.3
				– 0.5 + 0.3	96.9	95.1
				– 0.3 + 0.1	99.1	96.4

Полученный по представленной технологии обогащения цеолитовый продукт высокого качества используется для адсорбционных процессов, в том числе для извлечения редких щелочных металлов из гидроминерального сырья — цезия и рубидия. Данная технология характеризуется комплексным использованием цеолитсодержащих пород и продуктов их переработки, возможностью применения железосодержащего и полиминерального продуктов для получения железосодержащего концентрата и строительных материалов соответственно.

ТАБЛИЦА 3. Результаты электростатической сепарации цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений крупностью $-2 + 0.1$ мм

Месторождение / Основной цеолитовый минерал	Класс крупности, мм	Выход, %		
		Концентрат (цеолитовая фракция)	Хвосты (непроводящая фракция)	Содержание минералов цеолита в концентрате
Шивыртуйское месторождение / Клиноптилолит	$-1 + 0.5$	90.22	9.78	98.90
	$-0.5 + 0.3$	91.70	8.30	99.01
	$-0.3 + 0.1$	93.20	6.80	99.80
Талан-Гозагорское месторождение / Шабазит	$-1 + 0.5$	80.20	16.06	99.01
	$-0.5 + 0.3$	92.70	8.21	99.25
	$-0.3 + 0.1$	95.60	4.40	99.87

Для достижения наибольшей эффективности извлечения цезия из модельного раствора обогащенные цеолиты обрабатывались (модифицировались) катализатором, основу которого составляют соединения ванадия (поверхностные) — VOCl_3 . В отличие от методики, предложенной в [13], предусматривающей обработку только тонкодисперсных цеолитсодержащих пород без предварительного обогащения, в настоящей работе предпринята попытка добиться активации подвергшихся переработке пород крупностью $-2 + 0.1$ мм. Это в значительной степени расширяет возможности применения природных цеолитов в адсорбционных процессах без необходимости их гранулирования и капсулирования.

Получаемая в процессе дробления фракция -0.1 мм может быть подвергнута структурообразованию в форме гранул и капсул для последующего применения в процессах сорбции. Однако по сравнению с цельными зернами цеолитов данный тонкодисперсный продукт менее устойчив к механическим воздействиям и многократным циклам сорбция–десорбция. Вместе с тем обогащение и извлечение из фракции крупностью менее 0.1 мм железосодержащих и иных примесей, существенно влияющих на эффективность сорбции, в настоящее время достаточно затруднительная задача по техническим и технологическим причинам.

Результаты исследования зависимости степени сорбции редких щелочных металлов от соотношения раствор/сорбент представлены в табл. 4. Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения обогащенных и модифицированных цеолитов Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений. Установлено, что высокие показатели сорбции цезия (99.8 %) и рубидия (99.1 %) достигаются при использовании обогащенных и модифицированных катализаторами на основе ванадия шабазитами Талан-Гозагорского месторождения при значении показателя $\text{Ж} : \text{Т} = 10$.

Экспериментальными исследованиями на бинарных растворах определено, что сорбционная емкость цеолитов Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений по Cs снижается с увеличением радиуса иона компонента, входящего в состав раствора. Коэффициент распределения в цеолитах, подтверждающий данный результат, представляет собой отношение концентрации поглощенных из раствора компонентов к их концентрации в растворе и используется для характеристики адсорбционных процессов.

ТАБЛИЦА 4. Степени сорбции редких щелочных металлов при разных соотношениях раствор/сорбент

Ж: Т, мл/г	Степень сорбции W , %		Емкость сорбента (цеолита) E , мг·экв/г		Коэффициент распределения D , мл/г	
	Cs	Rb	Cs	Rb	Cs	Rb
Шивыртуйское месторождение (клиноптилолит)						
Исходные породы						
10	99.4	94.9	0.022	0.0052	1978	207
100	68.7	56.5	0.149	0.0298	218	124
400	25.6	21.3	0.230	0.0511	135	103
Обогащенные породы						
10	99.5	97.2	0.034	0.0097	1962	195
100	69.1	62.9	0.183	0.0422	189	106
400	27.2	26.3	0.392	0.1001	117	87
Обогащенные и модифицированные породы						
10	99.7	98.9	0.042	0.0145	1955	192
100	74.8	66.4	0.215	0.0592	177	102
400	30.1	27.8	0.501	0.1212	112	84
Талан-Гозагорское месторождение (шабазит)						
Исходные породы						
10	99.3	93.8	0.019	0.0043	1971	202
100	67.9	55.1	0.141	0.0266	209	118
400	24.8	20.4	0.205	0.0498	127	97
Обогащенные породы						
10	99.5	96.9	0.037	0.0083	1968	179
100	78.2	73.1	0.244	0.0378	188	101
400	27.9	33.1	0.390	0.0755	97	89
Обогащенные и модифицированные породы						
10	99.8	99.1	0.042	0.0102	1967	165
100	82.3	81.5	0.269	0.0577	179	92
400	30.2	37.2	0.589	0.1244	88	85

Следует отметить, что природные цеолиты Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений имеют близкие показатели сорбционной емкости к Cs и Rb, что объясняется приблизительно одинаковыми (с небольшим превосходством шабазита) поровыми характеристиками минералов цеолитов: клиноптилолита — в породах Шивыртуйского месторождения и шабазита — в породах Талан-Гозагорского месторождения.

В процессе исследований установлена более высокая эффективность сорбции редких щелочных металлов обогащенными и модифицированными цеолитами, поэтому дальнейшее расширенное изучение влияния ионов различных компонентов, содержащихся в модельных растворах, на сорбционную емкость природных сорбентов проводилось только с применением данных материалов (табл. 5). При этом полученные данные по определению *коэффициента распределения* в обогащенных и модифицированных цеолитах, представляющего собой отношение коэффициентов распределения адсорбатов и характеризующего селективность сорбентов к сорбируемым компонентам, находящимся в растворе, подтверждают данный результат.

Степень сорбции цеолитов по цезию и рубидию существенно снижается в присутствии калия. В незначительной степени на показатель емкости оказывает влияние наличие в растворе лития и магния. Данный аспект следует учитывать при разработке технологий извлечения Cs и Rb из гидроминерального сырья.

ТАБЛИЦА 5. Эффективность сорбции редких щелочных металлов и их коэффициентов распределения обогащенными и модифицированными цеолитами

Катион (компонент модельного раствора)	Радиус катиона, Å	Емкость сорбента (цеолита) E , мг·экв/г	Коэффициент разделения α_M^{Cs}
Шивыртуйское месторождение (клиноптилолит)			
Литий (Li)	0.68	1.158	385.0
Натрий (Na)	0.98	0.675	88.7
Калий (K)	1.33	0.151	10.2
Аммоний (NH ₄)	1.42	0.134	10.1
Магний (Mg)	0.74	1.288	739.0
Кальций (Ca)	1.04	0.901	153.0
Стронций (Sr)	1.20	0.812	115.0
Барий (Ba)	1.38	0.504	55.4
Железо (Fe)	0.80	1.246	587.0
Алюминий (Al)	0.57	1.180	492.0
Талан-Гозагорское месторождение (шабазит)			
Литий (Li)	0.71	1.201	396.0
Натрий (Na)	0.10	0.688	90.4
Калий (K)	1.52	0.172	12.1
Аммоний (NH ₄)	1.49	0.147	12.1
Магний (Mg)	0.82	1.315	757.0
Кальций (Ca)	1.12	0.102	168.0
Стронций (Sr)	1.60	0.901	121.2
Барий (Ba)	1.55	0.536	58.8
Железо (Fe)	0.89	1.301	597.0
Алюминий (Al)	0.62	1.189	503.0

При использовании природных цеолитов для сорбции содержащихся в гидроминеральном сырье щелочных металлов и других ценных компонентов большое значение имеет возможность регенерации, позволяющей обеспечить многократное применение сорбентов. В этой связи изучена способность цеолитов Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений к десорбции Cs и Rb. Полученные данные позволили установить достаточную эффективность использования для регенерации (десорбции) цеолитов раствора серной кислоты. Выявлено, что ионы Cs и Rb десорбируются из природных цеолитов Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений серной кислотой с концентрацией 0.30 М.

Проведение пяти циклов сорбция – десорбция не снижает сорбционной способности регенерированных цеолитов. Это свидетельствует о возможности их многократного использования при переработке гидроминерального сырья. Исследование десорбции в динамическом режиме позволило определить влияние скорости пропускания сернокислотного раствора на эффектив-

ность излучения Cs и Rb. При скорости пропускания 4.0 мл/мин установлено наиболее полное излучение редких щелочных металлов, что соответствует линейной скорости процесса, составляющей 1.3 м/ч.

В целом проведенные исследования показали, что обогащенные (до 95 %) и модифицированные клиноптилолит (Шивиртуйское месторождение) и шабазит (Талан-Гозагорское месторождение) представляют собой достаточно высокоселективные сорбенты по отношению к цезию и рубидию. Предложенная технология и цеолитовые сорбенты вполне сопоставимы по эффективности с существующими в настоящее время более затратными методами извлечения редких щелочных металлов из гидроминерального сырья [12, 14, 15].

ВЫВОДЫ

Для сорбционного извлечения редких щелочных металлов, в том числе цезия и рубидия, возможно применение цеолитов Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений. Разработанная технология обогащения и модификации природных цеолитов позволяет получать материалы с высокой сорбционной способностью к редким щелочным металлам и другим компонентам, содержащимся в гидроминеральном сырье. Результаты исследований могут быть полезны при возобновлении масштабной добычи и переработки гидроминерального сырья с целью извлечения редких щелочных металлов, а разработанные на основе полученных данных методы включены в информационные справочники наилучших доступных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milyutin V. V., Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., and Nekrasova N. A. Natural zeolites of Eastern Transbaikalia in technologies for mining enterprises wastewater treatment, *J. Env. Research, Eng. Management*, 2020, Vol. 76, No. 3. — P. 62–70.
2. El-Shazly E. A. A., Dakroury G. A., and Someda H. H. Sorption of ^{134}Cs radionuclide onto insoluble ferrocyanide loaded silica-gel, *J. Radioanalytical and Nuclear Chem.* 2021, Vol. 329. — P. 437–449.
3. Размахнин К. К., Шумилова Л. В., Размахнина И. Б. Очистка сточных и оборотных вод горно-промышленных предприятий адсорбентами на основе цеолитсодержащих пород Холинского месторождения // ФТПРПИ. — 2024. — № 4. — С. 180–188.
4. Tian Y., Ma L., Gao N., Zhang W., Kenneth Izuchukwu N., Liu G., and Liu F. Removal of surface cesium ion contamination by peelable composite coating with a highly effective magnetic adsorbent, *J. Alloys and Compounds*, 2023, Vol. 958. — 170280.
5. Бежин Н. А., Довгий И. И., Токарь Э. А., Тананаев И. Г. Физико-химические закономерности извлечения цезия и стронция из морской воды сорбентами различных типов // Журнал радиоаналитической и ядерной химии. — 2021. — Т. 330. — С. 1101–1111.
6. Kim H., Eom H. H., Kim Y., Harbottle D., and Lee J. W. Reversible electro-mediated cesium ion removal using a zeolitic imidazolate framework derived zinc hexacyanoferrate composite, *Chem. Eng. J.*, 2022, Vol. 450. — P. 138029.
7. Prajitno M. Y., Harbottle D., Hondow N., Zhang H., and Hunter T. N. The effect of pre-activation and milling on improving natural clinoptilolite for ion exchange of cesium and strontium, *J. Env. Chem. Eng.*, 2020, Vol. 8, No. 1. — 102991.
8. Zheng B., Zhou B., Hu J., Zheng C.-A., Chen K., Yang S., Richtering W., Harbottle D., Hunter T. N., Zhang H. Bioinspired microgel-loaded smart membrane filtration with the thermo- and ion-dual responsive water gate for selective lead(II) separation, *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, 2024, Vol. 16, No. 34. — P. 45497–45510.

9. Семенищев В. С., Пьянков А. А., Ремез В. П., Афонин Ю. Д., Никифоров А. Ф. Изучение физико-химических и сорбционных свойств гексацианоферратов никеля и железа по отношению к цезию // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2020. — Т. 20 (1). — С. 54–63.
10. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. — М., Химия, 1984. — 592 с.
11. Chu W.-F., Yuan Z., Lin P., and Jin G.-P. Recovery of rubidium using hydrogel beads encapsulating potassium copper hexacyanoferrate from saline lake brines, *Industrial & Eng. Chem. Res.*, 2024, Vol. 63, No. 4. — P. 1988–1999.
12. Plackett R. L. and Burman J. P. The design of optimum multifactorial experiments, *Biometrika*, 1946, Vol. 33 (4). — P. 305–25.
13. Мешкова И. Н., Никашина В. А., Ушакова Т. М., Гринев В. Г., Ковалева Н. Ю., Новокшенова Л. А. Каталитическая полимеризация этилена на тонкодисперсном природном цеолите с целью получения ионообменных сорбентов // Высокомолекулярные соединения. — Сер. Б. — 2005. — Том 47. — № 9. — С. 1755–1760.
14. Tang X., Wang S., Zhang Z., Li Z., Wang L., Yuan L., Wang B., Sun J., Zheng L., Wang H., and Shi W. Graphene oxide/chitosan/potassium copper hexacyanoferrate(II) composite aerogel for efficient removal of cesium, *Chem. Eng. J.*, 2022, No. 444. — 136397.
15. Yaqub M., Mee-Ngern L., and Lee W. Cesium adsorption from an aqueous medium for environmental remediation: A comprehensive analysis of adsorbents, sources, factors, models, challenges, and opportunities, *Sci. Total Environ.*, 2024, Vol. 950. — 175368.

Поступила в редакцию 12/III 2025

После доработки 27/IV 2025

Принята к публикации 16/V 2025