

Извлечение стронция и свинца сорбентами импрегнированного типа на основе ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-крауна-6 и ионной жидкости

© Н. А. Бежин^{*a,б}, И. И. Довгий^{*c,б}, В. В. Милютин^{**d,б}, Н. А. Некрасова^б,
Э. А. Токарь^{*,б}, И. Г. Тананаев^{*,e}

^a Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, д. 33;
*e-mail: nickbezhin@yandex.ru

^b Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2;
**e-mail: dovhui.illarion@yandex.ru

^c Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,
119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4; ***e-mail: vmluytin@mail.ru

^d Дальневосточный федеральный университет, 690091, Владивосток, ул. Суханова, д. 8

^e Институт химии Дальневосточного отделения РАН, 690022, Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, д. 159

^e Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19

Получена 20.11.2018, после доработки 01.12.2018, принята к публикации 04.12.2018

УДК 541.183+544.135+621.039.714+546.36+547.458

Изучено извлечение ионов Sr(II) и Pb(II) сорбентами импрегнированного типа на основе ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-крауна-6 и ионной жидкости на основе 1-бутил-3-метилимидазолия ($C_4mim^+Tf_2N^-$). Оценено влияние концентрации краун-эфира в сорбенте, типа носителя и его предварительной подготовки, а также типа растворителя для импрегнирования на сорбцию Sr и Pb сорбентами на основе ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-крауна-6 и $C_4mim^+Tf_2N^-$. Установлено, что Sr(II) наилучшим образом сорбируется из нейтральных и слабокислых сред вплоть до 0.01 моль/дм³ по HNO_3 со степенью извлечения $R > 90\%$ и коэффициентами распределения K_d от 1410 до 706 см³/г соответственно. Установлено, что на эффективность сорбции Sr(II) не влияет содержание Na в растворе вплоть до его концентрации 1 моль/дм³. В присутствии ионов кальция с увеличением концентрации Ca(II) в растворе от 0.02 до 0.16 моль/дм³ значение K_d Sr(II) снижается в 4 раза. При сорбционном извлечении ⁹⁰Sr из морской воды K_d составляет 193 см³/г и увеличивается в 1.05 и 1.25 раза при разбавлении морской воды в 2 и 10 раз соответственно. Свинец(II) количественно извлекается из нейтральных сред ($R > 98\%$), а также из растворов 0.01–1.0 моль/дм³ HCl и 0.01–3.0 моль/дм³ HNO_3 ($R > 87\%$). Показана перспективность синтезированных сорбентов для радиоаналитического определения радионуклидов Sr и Pb в природных объектах.

Ключевые слова: сорбенты, ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-краун-6, ионная жидкость, стронций, свинец, радионуклиды, определение.

DOI: 10.1134/S0033831119060091

Одной из важнейших проблем современной радиоэкологии является поиск перспективных методов селективного сорбционного концентрирования, выделения и последующей локализации таких опасных радионуклидов, как ⁹⁰Sr и ²¹⁰Pb, из объектов окружающей среды. Для решения данной проблемы предлагается использовать сорбенты импрегнированного типа на основе краун-эфиров [1–5].

Большой интерес в качестве разбавителей краун-эфиров при получении сорбентов представляют ионные жидкости (ИЖ) [6, 7]. Они являются растворителями нового поколения, обладающими уникальными свойствами: низкой летучестью, высо-

кой электропроводностью, гидрофобностью, высокой экологической безопасностью.

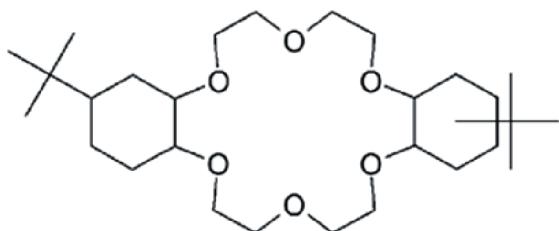
Важной характеристикой ИЖ является относительная легкость, с которой их физико-химические свойства могут быть «настроены» [8]. Миллионы комбинаций аниона и катиона ИЖ дают огромный выбор их использования для конкретной задачи [9].

Установлена эффективность замены органических разбавителей и экстрагентов на ИЖ за счет снижения их расхода в процессе экстракции при прочих равных условиях, а также повышения экологической безопасности соответствующих химических производств [10].

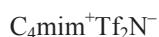
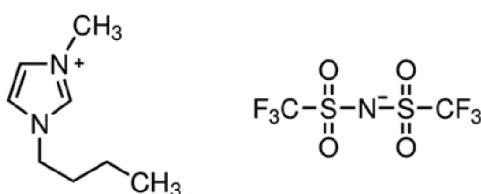
В области сорбционных процессов показано, что использование ИЖ в составе сорбционного материала повышает эффективность извлечения компонентов [11]. Так, в работе [12] отмечен рост K_d при сорбции Sr в 10⁴ раз при замене органических реагентов на ИЖ. Дигликольамид также обеспечивает значительно лучшую экстракцию трехвалентных актинидов и лантаноидов в ионные жидкости, чем в обычные органические соединения [13].

Однако кроме многочисленных достоинств использование ИЖ имеет ряд ограничений, прежде всего, в процессах с быстрым массопереносом в связи с неприемлемо высокой вязкостью реагента [14]. Для решения этих проблем ряд исследователей предлагают иммобилизацию тонкой пленки ИЖ на твердом носителе с большой площадью поверхности [15–17] – получение так называемых нанесенных ионных жидкостей (SILP – supported ionic liquid phase), которые хорошо зарекомендовали себя в области мембранных разделений [18]. Перспективным считается получение сорбентов на основе ионных жидкостей. Однако закономерности сорбции на них в настоящее время практически не изучены [8].

В настоящей статье описаны сорбенты импрегнированного типа на основе ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-краун-6 (ДТБДЦГ18К6) и ионной жидкости $C_4mim^+Tf_2N^-$ для извлечения Sr и Pb из нейтральных и кислых сред.



Ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-краун-6



Экспериментальная часть

Материалы. В работе использовали ДТБДЦГ18К6 (чистота >98%), ИЖ $C_4mim^+Tf_2N^-$ (>98%) и гидрофобизированный силикагель (размер частиц 250–500 мкм) производства ООО «Сорбент-Технологии» (Москва), а также стирол-дивинил-

бензольный носитель LPS-500 (размер частиц 150–250 мкм) производства ООО «Техносорбент» (Москва). Азотная и соляная кислота, метанол, ацетон и хлороформ имели квалификацию ч.д.а. (Реахим, Россия).

Для приготовления исследуемых и градуировочных растворов использовали концентрированную азотную или соляную кислоту и стандартные образцы растворов Sr (МСО 0148:2000) и Pb (МСО 0302:2002) (ООО «Ормет», Екатеринбург).

Методики подготовки носителя и получения сорбента. Подготовку носителя и получение сорбентов проводили способами, аналогичными описанным в работах [1, 2]. Для полученных сорбентов рассчитывали теоретическую емкость ($\Gamma_{\text{теор}}$, мг/г) по Sr и Pb аналогично работе [1].

Сорбционное извлечение стронция и свинца в статических условиях. Использовали нейтральные, азотнокислые (0.01–8 моль/дм³) и солянокислые (0.01–4 моль/дм³) растворы с концентрацией стронция 8 мг/дм³ или свинца 5 мг/дм³. Сорбцию макроличеств стронция и свинца, определение их концентрации в растворах, расчет коэффициента распределения, степени извлечения и емкости сорбента проводили аналогично описанному в работе [1].

Сорбция микроличеств ^{90}Sr . Сорбцию микроличеств ^{90}Sr проводили из растворов HNO_3 , а также нитратов натрия и кальция различной концентрации. Эксперименты проводили в статических условиях путем непрерывного перемешивания навески воздушно-сухого сорбента массой 0.1 г с 20 см³ раствора в течение 48 ч. Перед началом экспериментов в исходные растворы вносили индикаторные количества радионуклида ^{90}Sr (без носителя) в количестве около 10⁵ Бк/дм³. После окончания перемешивания смесь фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» и определяли в фильтрате удельную активность ^{90}Sr . По результатам анализов рассчитывали коэффициент распределения (K_d , см³/г) ^{90}Sr по формуле (1):

$$K_d = [(A_0 - A)/A](V/m), \quad (1)$$

где A_0 , A – удельная активность ^{90}Sr в исходном растворе и в фильтрате соответственно, Бк/дм³; V – объем жидкой фазы, см³; m – масса сорбента, г.

Удельную активность ^{90}Sr в растворах определяли прямым радиометрическим методом с использованием спектрометрического комплекса СКС-50М (Грин стар технолоджиз, Москва). Перед измерением проб, содержащих ^{90}Sr , их выдерживали в течение не менее 14 сут для достижения равновесия пары ^{90}Sr – ^{90}Y .

Сорбционное извлечение ^{90}Sr из морской воды. Сорбцию ^{90}Sr из морской воды в статических

Таблица 1. Характеристики полученных образцов сорбентов^a

Номер образца	Носитель	Растворитель	Разбавитель	Найдено	Вычислено ^b	
				С _{ДТБДЦГ18К6}		Г _{теор} , мг/г
				в сорбенте, мас%	в разбавителе, моль/дм ³	Sr
I.1	LPS-500	Хлороформ	Ионная жидкость	3.38	3.35	6.05
I.2				6.52	6.48	11.7
I.3				9.43	9.41	17.0
I.4				12.3	12.2	22.1
II.1	ГС			12.2	12.2	22.1
II.2	LPS-500	Метанол		12.3	12.2	52.2

^a Масса носителя 1 г; плотность разбавителя 1.5 г/см³, объем 0.5 см³; объем растворителя 10 см³.

Таблица 2. Параметры сорбции Sr в зависимости от концентрации HNO₃ (образец I.4)

Параметр	pH 6	Концентрация HNO ₃ , моль/дм ³						
		0.01	0.1	1	3	5	7	8
R, %	93.4	90.3	44.4	10.0	16.1	18.0	21.4	17.6
Г, мг/г	0.724	0.693	0.440	0.096	0.138	0.146	0.167	0.139

условиях проводили при соотношении $V/m = 1000$ см³/г, масса навески 0.048 г, объем раствора 48 см³, время перемешивания 24 ч. Коэффициент распределения ⁹⁰Sr рассчитывали по формуле (1).

В работе использовали морскую воду с солесодержанием 37 г/дм³, отобранную в акватории Амурского залива (Владивосток). Пробы морской воды до опыта предварительно фильтровали на фильтре марки «синяя лента» и вносили метку ⁹⁰Sr активностью 10⁶ Бк/дм³.

Результаты и обсуждение

Характеристики сорбентов. Характеристики полученных образцов сорбентов приведены в табл. 1.

Влияние концентрации HNO₃ на извлечение стронция. Установлено, что сорбент на основе ДТБДЦГ18К6 и ионной жидкости (образец I.4) имеет наилучшие характеристики при сорбции Sr из нейтральных и слабокислых (0.01 моль/дм³) азотнокислых растворов (рис. 1, табл. 2).

Влияние концентрации кислоты на извлечение свинца. Установлено, что сорбент на основе ДТБДЦГ18К6 и ИЖ (образец I.4) практически количественно извлекает свинец из нейтральных сред, а также из солянокислых (0.01–1 моль/дм³) и азотнокислых (0.01–3 моль/дм³) растворов (рис. 2, табл. 3).

Для оценки влияния концентрации краун-эфира в разбавителе (сорбенте), типа и подготовки носителя, растворителя для импрегнирования дальнейшие опыты по извлечению Sr и Pb проводили из нейтральных (pH 6) и слабокислых растворов (0.01 моль/дм³ HNO₃).

Влияние концентрации краун-эфира в разбавителе (сорбенте). Были получены результаты, пред-

ставленные на рис. 3 и в табл. 4. Установлено, что с повышением концентрации краун-эфира в разбавителе (сорбенте) увеличивается коэффициент распределения.

Для определения вклада ИЖ и краун-эфира в извлечение Sr и Pb были получены сорбенты импрегни-

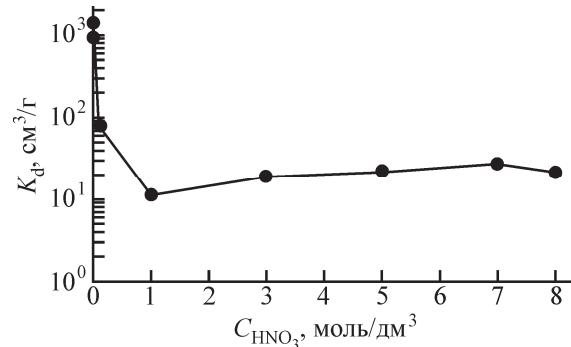


Рис. 1. Зависимость K_d Sr на образце I.4 от концентрации HNO₃.

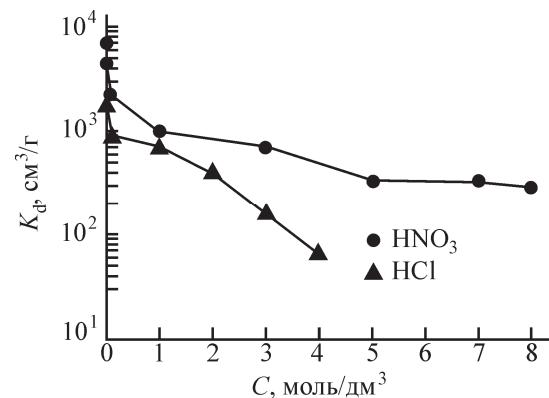


Рис. 2. Зависимость K_d Pb на образце I.4 от концентрации кислоты.

Таблица 3. Параметры сорбции Pb в зависимости от концентрации HCl и HNO₃ (образец I.4)

Параметр	pH 6	Концентрация HCl, моль/дм ³					
		0.01	0.1	1	2	3	4
R, %	98.5	94.5	90.2	87.6	79.5	61.2	39.4
Г, мг/г	0.426	0.413	0.407	0.405	0.370	0.256	0.172
		Концентрация HNO ₃ , моль/дм ³					
		0.01	0.1	1	3	5	7
R, %	97.8	95.6	90.6	87.5	76.9	76.4	74.3
Г, мг/г	0.421	0.414	0.370	0.292	0.275	0.272	0.266

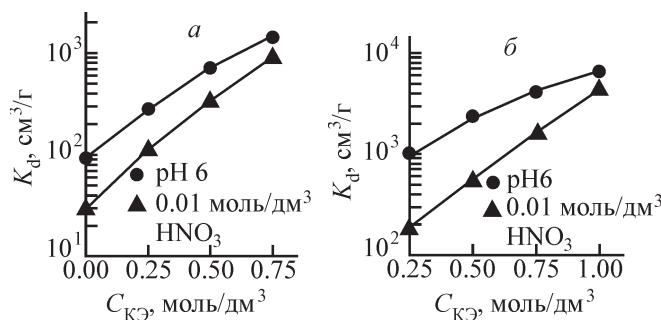
Таблица 4. Параметры сорбции Sr и Pb в зависимости от концентрации краун-эфира в разбавителе (сорбенте)

Извлекаемый металл	Номер образца	C _{ДТБДЦГ18К6}		pH 6		0.01 моль/дм ³ HNO ₃	
		в сорбенте, мас%	в разбавителе, моль/дм ³	R, %	Г, мг/г	R, %	Г, мг/г
Sr	I.1	3.35	0.25	47.6	0.389	23.1	0.189
	I.2	6.48	0.5	73.6	0.601	52.4	0.428
	I.3	9.41	0.75	87.6	0.715	77.2	0.631
	I.4	12.2	1	93.4	0.724	90.3	0.693
Pb	I.1	3.35	0.25	90.4	0.367	65.0	0.284
	I.2	6.48	0.5	95.8	0.389	84.7	0.370
	I.3	9.41	0.75	97.6	0.397	94.0	0.380
	I.4	12.2	1	98.5	0.400	97.8	0.395

Таблица 5. Параметры сорбции Sr и Pb в зависимости от типа и подготовки носителя

Извлекаемый металл	Номер образца	Носитель	Отмывка	pH 6			0.01 моль/л HNO ₃		
				K _d , см ³ /г	R, %	Г, мг/г	K _d , см ³ /г	R, %	Г, мг/г
Sr	I.4	LPS-500	—	527	84.1	0.687	353	77.9	0.637
			+	1430	93.4	0.724	928	90.3	0.693
	II.1	ГС	—	806	89.0	0.727	483	82.8	0.677
			+	420	80.8	0.660	276	73.4	0.600
Pb	I.4	LPS-500	—	2450	96.1	0.390	2310	95.8	0.418
			+	6640	98.5	0.400	4350	97.8	0.395
	II.1	ГС	—	3060	96.8	0.393	2710	96.4	0.421
			+	1910	95.0	0.386	1850	94.9	0.414

рованного типа на основе носителя LPS-500 и ионной жидкости (SILP). Было установлено, что при сорбции Sr из нейтральных и слабокислых растворов вклад ИЖ минимален (степень извлечения $R < 5\%$). Однако при сорбции Pb из нейтральных растворов за извлечение Pb отвечает ИЖ ($R = 90\%$), а не краун-эфир, в то время как при извлечении свинца из 0.01 моль/дм³ HNO₃ вклад ИЖ незначителен ($R < 10\%$).

**Рис. 3.** Зависимость K_d Sr (a) и Pb (б) на образцах I.1–I.4 от концентрации краун-эфира в разбавителе.

Влияние типа и подготовки носителя. Для определения влияния типа носителя на сорбцию Sr и Pb сравнивали сорбенты на основе стирол-дивинилбензольного носителя LPS-500 и гидрофобизированного силикагеля (образцы I.4 и II.1 соответственно), предварительно отмытые и не отмытые метанолом и ацетоном. Установлено, что сорбенты на основе LPS-500 имеют лучшие показатели сорбции Sr и Pb (табл. 5).

Объяснение влияния предварительной отмычки на сорбцию металлов сорбентами импрегнированного типа дано нами в работе [5].

Влияние растворителя для импрегнирования. С целью определения влияния растворителя для импрегнирования носителя на сорбцию Sr и Pb сравнивали сорбенты, полученные с использованием хлороформа и метанола (образцы I.4 и II.2 соответственно). Установлено, что наилучшим растворителем является хлороформ (табл. 6). В то же время при синтезе широко распространенных сорбентов для извлечения

Таблица 6. Параметры сорбции Sr и Pb в зависимости от типа растворителя для импрегнирования носителя

Извлекаемый металл	Номер образца	Растворитель	pH 6			0.01 моль/л HNO ₃		
			<i>K_d</i> , см ³ /г	<i>R</i> , %	Γ , мг/г	<i>K_d</i> , см ³ /г	<i>R</i> , %	Γ , мг/г
Sr	I.4	Хлороформ	1430	93.4	0.724	928	90.3	0.693
	II.2	Метанол	705	87.6	0.715	439	81.5	0.665
Pb	I.4	Хлороформ	6640	98.5	0.400	4350	97.8	0.395
	II.2	Метанол	6440	98.5	0.400	1920	95.1	0.415

Pb и Sr компания Triskem в качестве растворителя использует метанол [7, 8, 19–21].

Сорбция ⁹⁰Sr. Значения коэффициента распределения ⁹⁰Sr на образце I.4 в растворах азотной кислоты, нитратов натрия и кальция различной концентрации приведены на рис. 4–6 соответственно. Представленные результаты показывают, что сорбент на основе краун-эфира в ИЖ проявляет максимальную сорбционную активность по отношению к ⁹⁰Sr в нейтраль-

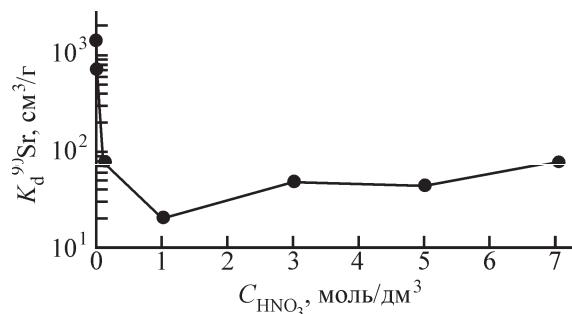


Рис. 4. Зависимость *K_d* ⁹⁰Sr на образце I.4 от концентрации HNO₃.

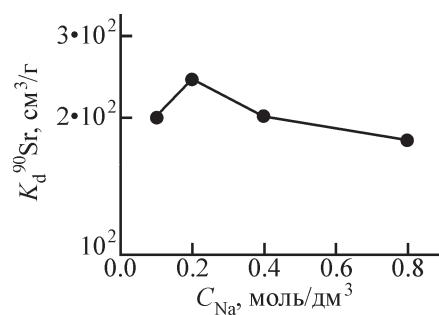


Рис. 5. Зависимость *K_d* ⁹⁰Sr на образце I.4 от концентрации ионов Na⁺.

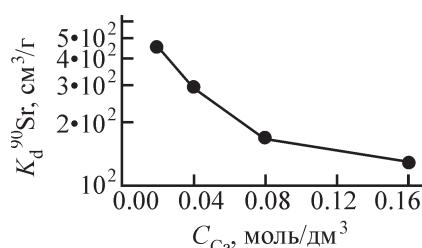


Рис. 6. Зависимость *K_d* ⁹⁰Sr на образце I.4 от концентрации ионов Ca²⁺.

ных (*K_d* = 1410 см³/г) и слабокислых (*K_d* = 706 см³/г) средах. Ионы натрия практически не влияют на сорбцию ⁹⁰Sr, а в присутствии ионов кальция сорбция ⁹⁰Sr закономерно снижается.

Результаты экспериментов по сорбции ⁹⁰Sr сорбентом I.4 из нативной морской воды (МВ) и из морской воды, разбавленной дистиллированной водой в 2 и в 10 раз (растворы МВ/2 и МВ/10 соответственно) представлены в табл. 7. Как видно из приведенных результатов, *K_d* ⁹⁰Sr на образце I.4 при сорбции из морской воды составляет 193 см³/г, что в несколько раз выше по сравнению с другими часто применяемыми сорбентами для сорбции ⁹⁰Sr. Так, на синтетических цеолитах [22, 23], титанатах натрия (SrTreat [24]) и силикотитанатах щелочных металлов (IONSV IE-911 [25]) *K_d* ⁹⁰Sr составляет 20–50 см³/г.

При разбавлении морской воды в 2 и 10 раз значения *K_d* ⁹⁰Sr изменяются сравнительно мало – в 1.05 и 1.25 раза соответственно, что свидетельствует об относительно высокой избирательности исследованного образца к радиостронцию. Хотя в условиях эксперимента не достигается количественного извлечения ⁹⁰Sr, его полное извлечение может быть достигнуто при меньшем, чем 1000, соотношении *V/m*.

Известна технология очистки морской воды от ⁹⁰Sr с использованием сорбционно-реагентного материала – силиката бария [26, 27]. Главным недостатком данного сорбента является низкая гидромеханическая прочность гранул, что приводит к заметному росту гидродинамического сопротивления колонки с сорбентом при его использовании в динамических условиях. Предлагаемые нами сорбенты обладают низким гидравлическим сопротивлением, что позволяет использовать их в режиме динамической сорбции без заметного увеличения сопротивления колонки.

Таблица 7. Результаты сорбции ⁹⁰Sr на образце I.4 из нативной (МВ) и разбавленной в 2 и 10 раз морской воды (МВ/2 и МВ/10) соответственно, *V/m* = 1000 см³/г, время перемешивания 24 ч

Раствор	<i>A₀</i> , Бк/см ³	<i>A</i> , Бк/см ³	<i>R</i> , %	<i>K_d</i> , см ³ /г
МВ	1076	903	16	193
МВ/2	1056	878	17	203
МВ/10	2316	1860	20	245

Таким образом, нами разработан сорбент импрегнированного типа на основе ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-краун-6 и ионной жидкости $C_4mim^+Tf_2N^-$. Полученные образцы сорбируют Sr из нейтральных и слабокислых азотнокислых растворов, а Pb – из нейтральных сред, а также из солянокислых (0.01–1.0 моль/дм³) и азотнокислых (0.01–3.0 моль/дм³) растворов.

Оценено влияние концентрации краун-эфира в сорбенте, типа носителя и его предварительной подготовки, типа растворителя для импрегнирования. Показано, что сорбент на основе стирол-дивинил-бензольного носителя LPS-500, импрегнированного раствором 1 моль/дм³ ди-*трет*-бутилдициклогексил-18-крауна-6 в ионной жидкости $C_4mim^+Tf_2N^-$ с использованием хлороформа в качестве растворителя, извлекает Sr и Pb наиболее эффективно.

Экспериментальные данные, полученные на природной смеси изотопов Sr, подтверждены на радионуклиде ⁹⁰Sr. Полученный сорбент проявляет максимальную сорбционную активность по отношению к ⁹⁰Sr в нейтральных ($K_d = 1410$ см³/г) и слабокислых ($K_d = 706$ см³/г) средах.

Синтезированные сорбционные материалы могут быть применены для концентрирования и выделения ⁹⁰Sr из морской воды, для его мониторинга в объектах окружающей среды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства г. Севастополя в рамках исследовательского проекта № 18-43-920004 «р_а» и в рамках государственного задания Министерства науки и образования Российской Федерации (тема «Океанологические процессы» № 0827-2018-0003). Работа по извлечению радионуклидов из морской воды выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 14-50-00034 и комплексной научной программы «Технологии мониторинга и рационального использования морских биологических ресурсов» по направлению №5 «Современные технологии контроля различных типов антропогенного загрязнения водной среды и оценки их влияния на морские биологические ресурсы» при поддержке программы Президиума РАН I.34 (0137-2018-0052).

Список литературы

- [1] Bezhin N. A., Dovhyi I. I., Lyapunov A. Yu. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2017. Vol. 311, N 1. P. 317–322.
- [2] Бежин Н. А., Довгий И. И. Патент RU 2636482. 2017. http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/IZPM/2017/11/27/INDEX_RU.HTM.
- [3] Yankovskaya V. S., Dovhyi I. I., Milyutin V. V. et al. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2017. Vol. 314, N 1. P. 119–125.
- [4] Bezhin N. A., Dovhyi I. I., Baulin V. E. et al. // Russ. Chem. Bull. 2018. Vol. 67, N 3. P. 485–489.
- [5] Yankovskaya V. S., Dovhyi I. I., Bezhin N. A. et al. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2018. Vol. 318, N 2. P. 1085–1097.
- [6] Dietz M. L., Dzielawa J. A., Laszak I. et al. // Green Chem. 2003. Vol. 5, N 6. P. 682–685.
- [7] Surman J. J., Pates J. M., Zhang H., Happel S. // Talanta. 2014. Vol. 129. P. 623–628.
- [8] Hawkins C. A., Momen M. A., Dietz M. L. // Sep. Sci. Technol. 2018. Vol. 53, N 12. P. 1820–1833.
- [9] Plechkova N. V., Seddon K. // Chem. Soc. Rev. 2008. Vol. 37, N 1. P. 123–150.
- [10] Плетнев И. В., Смирнова С. В., Хачатрян К. С., Зернов В. В. // Рос. хим. журн. 2014. Т. XLVII, N 6. С. 51–58.
- [11] Sun X., Luo H. M., Dai S. // Chem. Rev. 2012. Vol. 112, N 4. P. 2100–2128.
- [12] Dai S., Ju Y. H., Barnes C. E. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1999. N 8. P. 1201–1202.
- [13] Mohapatra P. K. // Chem. Prod. Process Model. 2015. Vol. 10, N 2. P. 135–145.
- [14] Riisager A., Fehrmann R., Haumann M., Wasserscheid P. // Top. Catal. 2006. Vol. 40, N 1–4. P. 91–102.
- [15] Valkenberg M. H., de Castro C., Hölderich W. F. // Green Chem. 2002. Vol. 4, N 2. P. 88–93.
- [16] Zhu L., Guo L., Zhang Z. J. et al. // Sci. China Chem. 2012. Vol. 55, N 8. P. 1479–1487.
- [17] Skoda-Földes R. // Molecules. 2014. Vol. 19, N 7. P. 8840–8884.
- [18] Dai Z. D., Noble R. D., Gin D. L. et al. // J. Membr. Sci. 2016. Vol. 497. P. 1–20.
- [19] Horwitz E. Ph., Chiarizia R., Dietz M. L. // Solvent Extr. Ion Exch. 1992. Vol. 10, N 2. P. 313–336.
- [20] Horwitz E. P., Dietz M. L., Rhoads S. et al. // Anal. Chim. Acta. 1994. Vol. 292. P. 263–273.
- [21] Dietz M. L., Yaeger J., Sajdak L. R. jr., Jensen M. P. // Sep. Sci. Technol. 2005. Vol. 40, N 1–3. P. 349–366.
- [22] Bengtsson G. B., Bortun A. I., Strelko V. V. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1996. Vol. 204, N 1. P. 75–82.
- [23] Marinin D. V., Brown G. N. // Waste Manag. 2000. Vol. 20, N 7. P. 545–553.
- [24] Lehto J., Brodin L., Harjula R., Tusa E. // Nucl. Technol. 1999. Vol. 127, N 1. P. 81–87.
- [25] Huckman M. E., Latheef I. M., Anthony R. G. // Sep. Sci. Technol. 1999. Vol. 34, N 6–7. P. 1145–1166.
- [26] Авраменко В. А., Голиков А. П., Железнов В. В. и др. // ЖФХ. 2004. Т. 78, N 3. С. 493–496.
- [27] Сокольницкая Т. А., Авраменко В. А., Голиков А. П. и др. // ЖФХ. 2004. Т. 78, N 3. С. 497–502.