



УДК 541.28+621.039.7

## Сорбционные технологии в современной прикладной радиохимии

Милютин В.В., Некрасова Н.А., Харитонов О.В.,  
Фирсова Л.А., Козлитин Е.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н.Фrumкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), Москва*

Поступила в редакцию 07.04.2016г.

В данной работе приведен обзор результатов исследований по изучению сорбционных характеристик ионообменных материалов по отношению к различным радионуклидам, проведенных в лаборатории хроматографии радиоактивных элементов Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН). Приведены результаты по сорбции урана из серноокислых и карбонатных растворов на хелатных ионообменных смолах; выделения цезия из азотнокислых растворов на ферроцианидном сорбенте ФС-10; сорбции ионов редкоземельных металлов и актиноидов на импрегнированных сорбентах; извлечения микроколичеств радионуклидов цезия и стронция на неорганических сорбентах различного типа. Приведены примеры практического использования сорбционных технологий в отечественной радиохимической практике.

**Ключевые слова:** сорбция, радионуклиды, цезий, стронций, уран, редкоземельные элементы, трансурановые элементы, облученное ядерное топливо, радиоактивные отходы

## Sorption technologies in modern applied radiochemistry

Milyutin V.V., Nekrassova N.A., Kharitonov O.V.,  
Firsova L.A., Kozlitin E.A.

*Federal State Budget Science Institution Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow*

This paper represents a review of results obtained in the Laboratory for radioactive elements chromatography with the Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (IPCE RAS) during the sorption material characterization studies in relation to different radionuclides. The studies showed the chelating resins with phosphonic groups to be the most efficient for the recovery of uranium from sulfate and carbonate solutions arisen in the uranium ore leaching process as well as for the separation of  $\text{Th}^{4+}/\text{UO}_2^{2+}$ ,  $\text{Pu}^{4+}/\text{UO}_2^{2+}$ ,  $\text{Pu}^{4+}/\text{Am}^{3+}$  pairs of ions.

The sorption technology for the recovery of  $^{137}\text{Cs}$  from Purex process raffinates was developed using a potassium-copper ferrocyanide based inorganic sorbent. The application of the technology provided for the recovery of  $^{137}\text{Cs}$  from nitrate solutions of a complex composition in the repetitive sorption-desorption-regeneration cycle mode. Studies of the Russian-manufactured tetraoctyldiglycolamide (TODGA) based sorbents demonstrated the high sorption capacity of those in relation to  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Th}^{4+}$ , and  $\text{UO}_2^{2+}$  ions within the wide range of the nitric acid concentration, and the sorbent characteristics to be highly competitive with foreign analogs. Investigation of the sorption-selective characteristics of inorganic sorbents of different type offered the possibility to develop a number of radioactive waste treatment technologies and successfully implement them at different enterprises of the Russian atomic industry.

**Keywords:** sorption, radionuclides, cesium, strontium, uranium, rare earth elements, transuranic elements, spent nuclear fuel, radioactive waste.

## Введение

В настоящее время сорбционные процессы широко используются в прикладной радиохимии, основными объектами которой являются: добыча и переработка урановых руд; радиохимическая переработка облученного ядерного топлива (ОЯТ); утилизация жидких радиоактивных отходов (ЖРО). При переработке урановых руд сорбционные методы используются, главным образом, при извлечении урана из растворов подземного выщелачивания и для аффинажа соединений урана. При радиохимической переработке ОЯТ ионный обмен используется для выделения ряда продуктов деления урана, а также для выделения и разделения редкоземельных (РЗЭ) и трансурановых (ТУЭ) элементов. При переработке ЖРО сорбционные методы используются, в основном, для очистки растворов от долгоживущих радионуклидов цезия и стронция. Данная работа является обзором результатов научных исследований, проведенных в лаборатории хроматографии радиоактивных элементов ИФХЭ РАН, по изучению сорбционных характеристик ионообменных материалов по отношению к различным радионуклидам, а также использованию разработанных сорбционных технологий в отечественной радиохимической практике. В данной статье не рассматриваются процессы разделения радиоактивных РЗЭ и ТПЭ методом вытеснительной комплексообразовательной хроматографии, рассмотрению которых будет посвящена отдельная статья.

### Сорбционное выделение урана из растворов подземного выщелачивания

В технологиях выделения природного урана ионный обмен используется, в основном, для извлечения урана из растворов подземного выщелачивания – сульфатных или карбонатных. Для выбора наиболее эффективных сорбентов были проведены исследования по сорбции урана из сернокислых и карбонатных сред на различных ионообменных материалах, в первую очередь, на анионитах и комплексообразующих сорбентах.

Результаты экспериментов по сорбции урана из сернокислых сред [1, 2] показали, что среди изученных сорбентов по величине статической обменной емкости (СОЕ) по урану выделяется хелатный сорбент с фосфоновыми и сульфогруппами марки Purolite S957 (рис. 1). Его емкость, в зависимости от содержания сульфат-ионов, составляет порядка 280-350 мг/г, что в 3.0-3.5 раза выше, по сравнению с другими сорбентами.

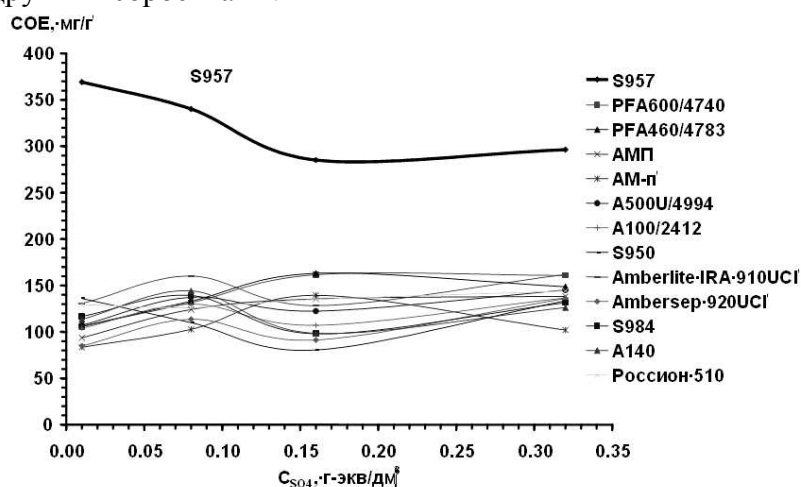


Рис. 1. Зависимость статической обменной емкости (СОЕ) различных сорбентов по урану от концентрации сульфат-ионов (Т:Ж=500, время контакта фаз – 24 ч)

В сернокислых растворах выщелачивания урана из руд присутствуют нитрат- и хлорид-ионы, которые могут негативно влиять на сорбцию урана. Как было показано [2], данные ионы не оказывают заметного влияния на сорбцию урана сорбентом Purolite S957. В то же время, емкость других исследованных сорбентов в присутствии хлорид-ионов снижается до 50-100 мг/г, а в присутствии нитрат-ионов – до 40 мг/г.

Результаты сорбции урана из модельного карбонатного раствора на различных сорбентах [3] показали, что для извлечения урана из карбонатных сред наиболее эффективными являются высокоосновные аниониты марок PFA300, PFA600/4740, A560/4790 («Purolite»), Amberlite IRA 910UCI, Ambersep 920UCI («Rohm and Haas»), АВ-17×8 (ООО «Токем», Россия), а также хелатный сорбент Purolite S957 (рис. 2).

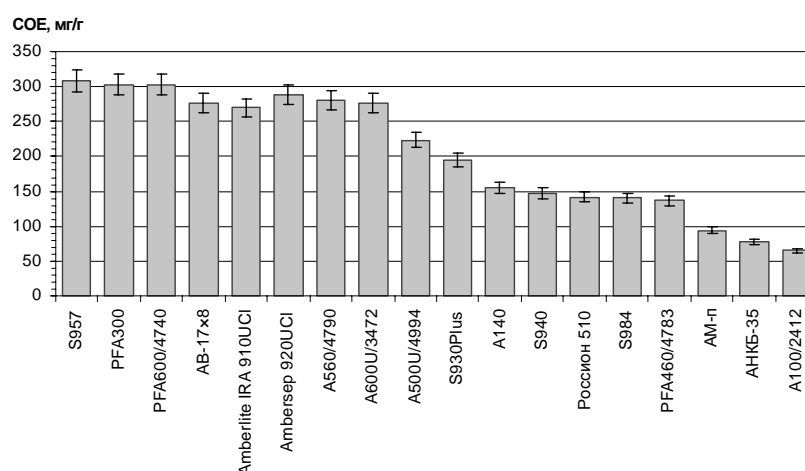


Рис. 2. Значения статической обменной емкости (COE) по урану при сорбции из карбонатного раствора на различных сорбентах (Т:Ж=1:3000, время контакта фаз – 24 ч)

Максимальная емкость по урану при сорбции из карбонатных сред на высокоосновных анионитах достигается при значении рН=6-8, а для хелатного сорбента S957 при значениях рН менее 7.5.

На основании полученных результатов были определены оптимальные условия для извлечения урана из карбонатных и сернокислых растворов с использованием органических ионообменников [4].

Выделение радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  из растворов от переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ)

Проблема выделения  $^{137}\text{Cs}$  из растворов от переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) является весьма актуальной в связи с важным значением этого долгоживущего радионуклида при переработке и долговременном хранении жидких радиоактивных отходов (ЖРО) высокого уровня активности, а также ввиду широкого использования соединений  $^{137}\text{Cs}$  в источниках ионизирующего излучения.

Ранее для выделения  $^{137}\text{Cs}$  из растворов радиохимических производств использовали методы, основанные на соосаждении  $^{137}\text{Cs}$  с осадками ферроцианидов переходных металлов или солями гетерополикислот [5]. Недостатками осадительных методов являются их низкая производительность, невысокая степень извлечения  $^{137}\text{Cs}$  и трудность дальнейшей переработки цезий-содержащих осадков.

Одним из наиболее эффективных способов извлечения  $^{137}\text{Cs}$  из растворов является сорбционный метод с использованием неорганических сорбентов на основе

ферроцианидов переходных металлов состава  $K_{1.0}Me_{1.5}^{(II)}Fe^{(II)}(CN)_6$ , где  $Me^{(II)}$  – Ni(II), Zn(II), Cu(II). Проведенные исследования показали, что наиболее эффективным для извлечения цезия является сорбент марки ФС-10 на основе ферроцианида меди-калия.

Данный сорбент обладает высокой емкостью по цезию и способен к работе в режиме сорбция-десорбция-регенерация. Десорбция цезия осуществляется раствором азотной кислоты с концентрацией 6-8 моль/дм<sup>3</sup>, а регенерация – раствором нитрита калия. Также было установлено, что при сорбции из растворов, содержащих азотную кислоту, емкость сорбента ФС-10 резко снижается вследствие его окисления. Для подавления окислительной способности азотнокислых растворов и, следовательно, повышения обменной емкости по цезию, в исходный раствор вводят гидразин-нитрат. Введение гидразин-нитрата с концентрацией 0.05 моль/дм<sup>3</sup> позволяет проводить эффективную сорбцию цезия из растворов с концентрацией HNO<sub>3</sub> до 4 моль/дм<sup>3</sup>.

На основе проведенных исследований была создана сорбционная технология извлечения <sup>137</sup>Cs из рафинатов ПУРЕКС-процесса, состоящая из следующих стадий [6]:

- подготовка исходного раствора (корректировка кислотности, введение гидразин-нитрата);
- сорбция <sup>137</sup>Cs на сорбенте ФС-10;
- десорбция <sup>137</sup>Cs 6-8 моль/дм<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub>;
- упарка азотнокислого десорбата до получения сухой соли <sup>137</sup>CsNO<sub>3</sub>.
- регенерация сорбента раствором состава, г/дм<sup>3</sup>: NaNO<sub>2</sub> – 18; KNO<sub>3</sub> – 40; pH 6-8.

Сорбент ФС-10 обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Средняя потеря емкости сорбента после проведения 20 циклов сорбция-десорбция-регенерация составляет 0.3-0.5% за цикл. В настоящее время сорбент ФС-10 выпускается опытными партиями на участке синтеза неорганических сорбентов ИФХЭ РАН.

С использованием данной технологии, начиная с 1988 г. по настоящее время, переработаны десятки тысяч кубических метров производственных растворов и выделено более 100 миллионов кюри <sup>137</sup>Cs в виде азотнокислых десорбатов и солей цезия высокой степени чистоты.

#### Выделение и разделение редкоземельных и трансурановых элементов

Различие в сорбционном поведении ионов редкоземельных (РЗЭ) и трансурановых элементов (ТУЭ) в азотнокислых средах позволяет проводить их эффективное разделение. С этой целью наиболее эффективно использование фосфорсодержащих ионитов. Так, для сорбента Purolite S957 с фосфоновыми и сульфогруппами экспериментально установлен следующий ряд селективности: Th<sup>4+</sup>, Pu<sup>4+</sup> > UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> >> NpO<sub>2</sub><sup>+</sup> >> Am<sup>3+</sup> ≈ Eu<sup>3+</sup>, что позволило разработать методики разделения следующих пар ионов: Th<sup>4+</sup>/UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>, Pu<sup>4+</sup>/UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>, Pu<sup>4+</sup>/Am<sup>3+</sup> [7].

При сорбции урана из азотнокислых растворов максимальной емкостью обладают: фосфорнокислый катионит марки КРФ-20, хелатные сорбенты Purolite S957 и Purolite S950 с иминофосфоновыми группами. Десорбция урана с указанных сорбентов может быть осуществлена растворами карбоната натрия или аммония [8].

В настоящее время в процессах экстракции радиоактивных редкоземельных (РЗЭ) и трансплутониевых (ТПЭ) элементов широко используются экстрагенты на основе диамидов дигликолевой кислоты [9]. Признано, что наилучшими экстракционными свойствами среди них обладает N,N,N',N'-тетра-*n*-октилдигликольамид (TODGA, ДГА) (рис. 3).

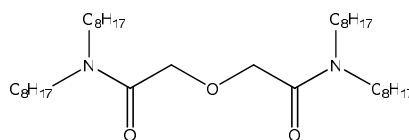


Рис. 3. Структурная формула N,N,N',N'-тетра-*n*-октилдигликольамида

На основе различных диамидов дигликолевой кислоты, в том числе ДГА, были синтезированы сорбенты, полученные путем импрегнирования полимерной матрицы органическим экстрагентом. Так, компанией «Triskem International» (Франция) выпускается сорбент марки DGA Resin, полученный путем импрегнирования матрицы стиролдивинилбензольного сополимера жидким ДГА. Указанный сорбент использовали для выделения и разделения пар РЗЭ/ТПЭ, Sr/Y, Ra/Ac [10, 11], для отделения макроколичеств америция с целью последующего спектрального определения примесей в диоксиде америция [12] и для решения ряда других радиохимических задач.

В настоящее время выпуск опытных партий импрегнированных сорбентов на основе ДГА освоен российскими предприятиями ООО «Сорбент-Технологии», г. Москва (сорбенты марки ВАУ) и ЗАО «Аксион-РДМ», г. Пермь (сорбент марки AXIONIT MND 40T).

На рис. 4 приведена зависимость статической емкости (СЕ) по ионам  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Th}^{4+}$ ,  $\text{UO}_2^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  от концентрации азотной кислоты для сорбента AXIONIT MND 40T (ЗАО «Аксион-РДМ») [13].

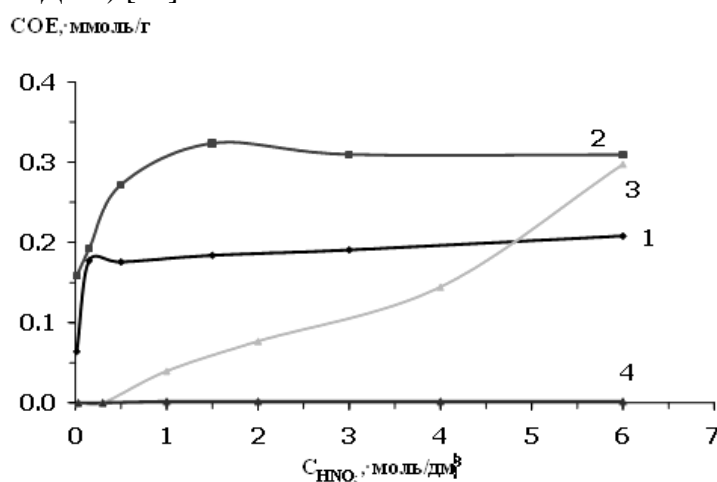


Рис. 4. Зависимость статической емкости (СЕ) сорбента AXIONIT MND 40T от концентрации азотной кислоты по ионам: 1 –  $\text{Eu}^{3+}$ ; 2 –  $\text{Th}^{4+}$ ; 3 –  $\text{UO}_2^{2+}$ ; 4 –  $\text{Fe}^{3+}$  (Т:Ж=1:200, время контакта фаз – 24 ч)

Как видно из рисунка, сорбент российского производства марки AXIONIT MND 40T обладает высокой сорбционной емкостью по ионам  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Th}^{4+}$  и  $\text{UO}_2^{2+}$  в широком диапазоне концентраций азотной кислоты (до 6.0 моль/дм<sup>3</sup>). Весьма характерным для данного сорбента является отсутствие сорбции конкурирующих ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . Различное сорбционное поведение ионов РЗЭ и актинидов на сорбентах, содержащих ДГА, позволяет проводить эффективное разделение пар ионов РЗЭ<sup>3+</sup>/ $\text{UO}_2^{2+}$  и  $\text{Th}^{4+}$ / $\text{UO}_2^{2+}$ . Для десорбции РЗЭ (европия) могут быть использованы растворы разбавленной азотной кислоты, а для актинидов – растворы комплексонов (ДГПА). Установлено, что сорбенты на основе ДГА обладают стабильными сорбционными характеристиками при использовании в многоциклическом режиме

«сорбция-десорбция». По своим характеристикам российские сорбенты не уступают зарубежному аналогу – сорбенту марки DGA Resin.

#### Переработка жидких радиоактивных отходов

При работе предприятий ядерного топливного цикла, а также при использовании радиоактивных веществ в различных отраслях науки и техники образуется значительное количество радиоактивных отходов различного уровня активности. Наибольшую экологическую опасность, представляют техногенные жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), а также радиоактивно-загрязненные природные воды. Повышенная опасность данного вида отходов обусловлена их большим объемом, высокой суммарной активностью, а также возможностью их неконтролируемого распространения. Таким образом, проблема очистки радиоактивно-загрязненных сточных и природных вод является ключевой для дальнейшего развития всей атомной энергетики и промышленности.

В настоящее время для переработки ЖРО используются различные методы: термические, осадительные, сорбционные, мембранные. Выбор наиболее эффективного метода зависит от химического и радионуклидного состава жидких отходов, а также от требований к качеству очистки и к вторичным радиоактивным отходам.

Наиболее актуальной задачей при переработке ЖРО является извлечение долгоживущих и высокотоксичных радионуклидов цезия и стронция. Для удаления данных радионуклидов применяются, в основном, сорбционные методы с использованием, как органических ионообменных смол, так и неорганических сорбентов различных типов. Систематические исследования, проведенные в лаборатории хроматографии радиоактивных элементов ИФХЭ РАН позволили осуществить целенаправленный выбор наиболее эффективных сорбентов для решения данной задачи [14]. Ниже приведены обобщенные результаты исследований по сорбции микроколичеств  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  на различных типах сорбентов.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов распределения ( $K_d$ ) микроколичеств радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в растворах нитрата натрия с концентрацией 0.1 и 1.0 моль/дм<sup>3</sup> на различных типах сорбентов.

Представленные данные показывают, что по отношению к ионам цезия наибольшую селективность проявляют ферроцианидные сорбенты, силикотитанат натрия, а также резорцинформальдегидная смола (при pH>12). На данных сорбентах достигаются значения  $K_d$   $^{137}\text{Cs}$  более  $10^4$  см<sup>3</sup>/г даже в высокосолевым растворе (1.0 моль/дм<sup>3</sup> NaNO<sub>3</sub>). Для очистки малосолевых растворов также возможно использование природных и синтетических цеолитов, фосфатов титана и циркония и др.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов распределения ( $K_d$ ) микроколичеств радионуклида  $^{85}\text{Sr}$  для различных типов сорбентов в растворах солей натрия и кальция.

Как видно из представленной таблицы, в присутствии ионов натрия повышенную селективность к стронцию проявляет широкий круг сорбентов: карбоксильные катиониты, синтетические цеолиты NaA, NaX, сорбент на основе оксидов марганца (III, IV) марки МДМ, силикотитанат натрия. Уникальную селективность к стронцию в присутствии натрия проявляет синтетический шабазит марки KG-13.

Таблица 1. Значения коэффициентов распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  на различных сорбентах в растворах нитрата натрия

Наименование сорбента	Значения $K_d$ $^{137}\text{Cs}$ , $\text{см}^3/\text{г}$ в растворе:	
	0.1 М $\text{NaNO}_3$	1.0 М $\text{NaNO}_3$
Ионообменные смолы		
Сульфокатионит КУ-2·8	390	10
Карбоксильный катионит	82	<1
Резорцинформальдегидная смола	$2.0 \cdot 10^4$ (pH>12)	$2.0 \cdot 10^4$ (pH>12)
Природные и синтетические алюмосиликаты и цеолиты		
Природный бентонит	$1.4 \cdot 10^4$	620
Природный клиноптилолит	2500	610
Синтетический цеолит NaA	8900	720
Синтетический цеолит NaX	3100	280
Оксигидраты, соли поливалентных металлов и многоосновных кислот		
Термоксид-5 ( $\text{TiO}_2$ )	44	<1
Фосфат титана	3600	770
Фосфат циркония	7300	700
Силикотитанат натрия	$1.9 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^5$
Ферроцианидные сорбенты		
ФНС-10 (фоц Ni-K)	$8.2 \cdot 10^4$	$7.5 \cdot 10^4$
ФНК-50 (фоц Ni -K)	$1.5 \cdot 10^5$	$9.0 \cdot 10^4$
НЖС (фоц Ni-K)	$3.0 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^4$
Термоксид-35 (фоц Ni-K)	$8.0 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$

Таблица 2. Значения коэффициентов распределения ( $K_d$ )  $^{85}\text{Sr}$  на различных сорбентах

Наименование сорбента	Значения $K_d$ $^{85}\text{Sr}$ , $\text{см}^3/\text{г}$ в растворе:	
	0.1 М $\text{NaNO}_3$	0.01 М $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
Ионообменные смолы		
Сульфокатионит КУ-2·8	2000	310
Карбоксильный катионит	$1.1 \cdot 10^4$	125
Природные и синтетические алюмосиликаты и цеолиты		
Природный бентонит	112	41
Природный клиноптилолит	275	70
Синтетический цеолит NaA	$2.5 \cdot 10^4$	106
Синтетический цеолит NaX	7900	345
Синтетический шабазит KG-13	$2.5 \cdot 10^5$	250
Оксигидраты, соли поливалентных металлов и многоосновных кислот		
Природный пиролюзит ( $\text{MnO}_2$ )	1100	16
МДМ ( $\text{MnO}_2$ )	$4.0 \cdot 10^4$	2900
Термоксид-5 ( $\text{TiO}_2$ )	49	9
Фосфат титана	60	440
Фосфат циркония	40	75
Силикотитанат натрия	$3.0 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^4$

В присутствии ионов кальция сорбция стронция резко ухудшается на всех изученных типах сорбентов, при этом отличия в сорбционно-селективных свойствах сорбентов различных классов в значительной мере нивелируются. Значительная конкуренция со стороны ионов кальция на сорбцию стронция связана с близостью размеров ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$ . Максимальная сорбция стронция в присутствии ионов кальция наблюдается на силикотитанате натрия и сорбенте марки МДМ.

На наиболее перспективных сорбентах была исследована очистка водопроводной воды р. Москва от радионуклидов цезия и стронция в динамических условиях (табл. 3).

Таблица 3. Результаты очистки водопроводной воды от  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в динамических условиях

Сорбент	Количество профильтрованного раствора до достижения 1% проскока радионуклидов	
	$^{137}\text{Cs}$	$^{85}\text{Sr}$
КУ-2×8	440	600
Клиноптилолит	~5000	160
Фосфат циркония	1200	100
Цеолит NaA	8000	930
МДМ	-	2100
НЖС	60000	-

Динамические испытания сорбентов подтверждают основные закономерности, выявленные в процессе статических исследований. Для очистки растворов от  $^{137}\text{Cs}$  наиболее эффективны ферроцианидные сорбенты, ресурс которых составляет 60 тыс. колоночных объемов. Ресурс синтетических и природных цеолитов на порядок, а сульфокатионита КУ-2×8 – на два порядка ниже. При очистке воды от стронция наибольший ресурс очистки наблюдается для сорбента на основе диоксида марганца (МДМ).

В настоящее время сорбционные технологии очистки ЖРО от радионуклидов широко используются на практике [15]:

- переработка ЖРО ремонтно-технологического предприятия (РТП) «Атомфлот», г. Мурманск с использованием ферроцианидного сорбента марки НЖС и синтетического цеолита марки ЦМП;
- переработка высокосолевых ЖРО, образующихся при эксплуатации, ремонте и утилизации атомных подводных лодок в Дальневосточном регионе с использованием ферроцианидных сорбентов, природного клиноптилолита и селективного к стронцию сорбента марки СРМ;
- очистка воды бассейна выдержки отработанных тепловыделяющих сборок ФГУП «ПО «Маяк» от радионуклидов цезия на ферроцианидном сорбенте марки НЖА;
- извлечение радионуклидов цезия из кубовых остатков АЭС на ферроцианидном сорбенте «Термоксид-35».

## Заключение

Таким образом, результаты систематических научных исследований, проводимых в лаборатории хроматографии радиоактивных элементов ИФХЭ РАН, а также имеющийся опыт промышленного использования сорбционных технологий показывает их высокую эффективность для решения многих важных технологических и экологических задач прикладной радиохимии.

## Список литературы

1. Некрасова Н.А., Гелис В.М., Милютин экстракция: проблемы и перспективы», В.В., Козлитин Е.А. // «Сорбция и материалы III Международного симпозиума



по сорбции и экстракции, 20-24 сентября 2010 г., Владивосток, 2010, С. 124-126.

2. Некрасова Н.А., Милютин В.В., Гелис В.М. // «Физикохимия-2010», тезисы докладов V Конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН, 1 ноября–30 ноября 2010 г., Москва, 2010. С. 89.

3. Некрасова Н.А. и др. // *Радиохимия*. 2008. Т. 50. № 2. С. 154-155.

4. Некрасова Н.А. Дисс. канд. хим. наук. Москва, 2013. 149 с.

5. Николаев А.В. Химия долгоживущих осколочных элементов. М. Атомиздат. 1970. С. 56.

6. Милютин В.В., Гелис В.М., Дзекун Е.Г., Малых Ю.А. // *Радиохимия*. 1995. Т. 37. № 1. С. 92-94.

7. Некрасова Н.А. и др. // *Радиохимия*. 2010. Т. 52. № 1. С. 63-66.

8. Некрасова Н.А. и др. // *Радиохимия*. 2008. Т. 50. № 2. С. 156-157.

9. Sasaki Y., Tachimori S. // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2002. Vol. 20 (1). pp.21-34.

10. Horwitz E.P., McAlister D.R., Bond A.H., Barrans R.E. // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2005. Vol. 23, pp.219-224.

11. Maxwell S.L., Culligan B.K. // *J. of Radioanalytical and Nucl. Chem.* 2006. Vol. 270, № 3, pp. 699-704.

12. Чухланцева Е.В. и др. // *Аналитика и контроль*. 2012. Т. 16. № 2. С. 143-150.

13. Милютин В.В. и др. // *Радиохимия*. 2015. Т. 57. № 5. С. 438-441.

14. Милютин В.В., Гелис В.М., Пензин Р.А. // *Радиохимия*. 1993. Т. 35. № 3. С.76-78.

15. Милютин В.В., Гелис В.М., Некрасова Н.А., Козлитин Е.А. // «Новые подходы в химической технологии минерального сырья», тезисы докладов 2-й Российской конференции с международным участием, 3-6 июня 2013 г., Санкт-Петербург, 2013, Ч. 1. С. 30-31.

## References

1. Nekrasova N.A., Gelis V.M., Milyutin V.V., Kozlitin E.A., «Sorptions and Extractions: Problems and Prospects», In: Proceedings of the III International Symposium on Sorption and Extractions, September 20-24, 2010, Vladivostok, Russia (*in Russian*), 2010, pp. 124-126.

2. Nekrasova N.A., Milyutin V.V., Gelis V.M., «Phisikokhimiya-2010», V Conference of Junior Scientists, Postgraduates and Students of IPCE RAS, November 1-30 2010, Moscow. Abstracts (*in Russian*), 2010, pp. 89.

3. Nekrasova N.A. et al., *Radiochemistry*, 2008, Vol. 50, No 2, pp. 180-182.

4. Nekrasova N.A., Diss. cand. chem. Nauk, M, 2013, 149 p. (*in Russian*)

5. Nikolaev A.V., Chemistry of Long-Lived Fission Products, M, Atomizdat 1970, pp. 56. (*in Russian*)

6. Milyutin V.V., Gelis V.M., Dzekun E.G., Malykh Yu.A., *Radiochemistry*, 1995, Vol. 37, No 1, pp. 92-94. (*in Russian*)

7. Nekrasova N.A., *Radiochemistry*, 2010, Vol. 52, No 1, pp. 71-75.

8. Nekrasova N.A., *Radiochemistry*, 2008, Vol. 50, No 2, pp. 183-185.

9. Sasaki Y., Tachimori S. // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2002. Vol. 20 (1), 21-34 pp.

10. Horwitz E.P., McAlister D.R., Bond A.H., Barrans R.E., *Solv. Extr. Ion Exch.*, 2005, Vol. 23, pp. 219-224.

11. Maxwell S.L., Culligan B.K., *J. of Radioanalytical and Nucl. Chem.*, 2006, Vol. 270, No 3, pp. 699-704.

12. Chukhlantseva E.V. et al., *Analytics and Control*, 2012, Vol. 16, No 2, pp. 143-150. (*in Russian*)

13. Milyutin V.V. et al., *Radiochemistry*, 2015, Vol. 57, No 5, pp. 513-517.

14. Milyutin V.V., Gelis V.M., Penzin R.A., *Radiochemistry*, 1993, Vol. 35, No 3, pp. 76-78. (*in Russian*)

15. Milyutin V.V., Gelis V.M., Nekrasova N.A., Kozlitin E.A., New Approaches in Chemical Technology of Mineral Resources, 2nd Russian Conference with International Participants, June 3-6 2013, Saint Petersburg. Abstracts (*in Russian*), 2013, Part 1. pp. 30-31.

**Милютин Виталий Витальевич** – заведующий лабораторией, д.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им.

**Milyutin Vitaly V.** – Head of Laboratory, Doctor of Chemical Sciences, Federal State Budget Science Institution Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of

А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН), Москва

**Некрасова Наталья Анатольевна** – научный сотрудник, к.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН), Москва

**Харитонов Олег Викторович** – ведущий научный сотрудник, к.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН), Москва

**Фирсова Любовь Александровна** – старший научный сотрудник, к.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН), Москва

**Козлитин Евгений Анатольевич** – старший научный сотрудник, начальник станции переработки радиоактивных отходов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН), Москва

Sciences (IPCE RAS), Moscow, E-mail: [vmilyutin@mail.ru](mailto:vmilyutin@mail.ru).

**Nekrasova Natalya A.** – Scientist, Ph.D. in Chemistry, Federal State Budget Institution of Science Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow, E-mail: [nnekrassova@rambler.ru](mailto:nnekrassova@rambler.ru).

**Kharitonov Oleg V.** – Leading Scientist, Ph.D. in Chemistry, Federal State Budget Institution of Science Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow

**Firsova Lyubov A.** – Senior Scientist, Ph.D. in Chemistry, Federal State Budget Institution of Science Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow

**Kozlitin Evgeny A.** – Senior Scientist, Head of the Radioactive Waste Management Facility with the Federal State Budget Institution of Science Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow