DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-80-89 УДК: 621.039.73; 66.081

# СОВРЕМЕННЫЕ СОРБЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОТ РАДИОНУКЛИДОВ ЦЕЗИЯ И СТРОНЦИЯ

**В. В. Милютин, Н. А. Некрасова, В. О. Каптаков**

**Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва**

Статья поступила в редакцию 26 августа 2020 г.

*В работе описаны основные типы сорбционных материалов, которые в настоящее время наиболее широко используются для очистки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) низкого и среднего уровня активности от радионуклидов цезия и стронция. Главное внимание уделено российским сорбентам, выпускаемым в промышленном или опытно-промышленном масштабе. Приведены экспериментальные значения коэффициентов распределения ($K_d$) радионуклидов $^{137}Cs$ и $^{90}Sr$ на сорбентах различного типа с использованием разработанной стандартизованной методики. Показано, что данная методика позволяет проводить объективное сравнение сорбционных характеристик материалов различных типов и осуществлять обоснованный выбор наиболее эффективных сорбентов для очистки ЖРО сложного солевого и радионуклидного состава.*

**Ключевые слова:** *радиоактивные отходы, жидкие радиоактивные отходы, очистка, радионуклиды цезия и стронция, сорбенты, характеристики.*

## Введение

В результате работы предприятий ядерного топливного цикла, а также при использовании радиоактивных веществ в различных отраслях науки и техники образуются значительные количества жидких радиоактивных отходов (ЖРО) разнообразного химического и радионуклидного состава. Большую экологическую опасность представляют ЖРО низкого и среднего уровня активности ввиду их значительного объема, большой суммарной активности и возможности неконтролируемого распространения при аварийных ситуациях.

В настоящее время для очистки низко- и среднеактивных ЖРО от радионуклидов широко применяются методы с использованием сорбционных материалов различных типов. Чаще всего данные методы используются для очистки ЖРО от радионуклидов цезия и стронция, которые во многих случаях вносят определяющий вклад в общую активность указанного вида ЖРО.

Данная работа представляет собой обзор основных типов сорбционных материалов, наиболее часто используемых в настоящее время для очистки ЖРО низкого и среднего уровня активности, а также приведены определенные экспериментально в соответствии с разработанной стандартизованной методикой значения сорбционных характеристик сорбентов различных типов по отношению к радионуклидам цезия и стронция. Основное внимание уделено сорбентам российского производства, выпуск которых налажен в промышленном или опытно-промышленном масштабе.

## Основные типы сорбентов для извлечения радионуклидов цезия и стронция

Для извлечения радионуклидов цезия и стронция используются органические *ионообменные смолы* и *неорганические сорбенты* различных типов.

Среди *органических ионообменных смол* наибольшее применение в процессах очистки ЖРО получили сильнокислотные *сульфокатиониты*, для которых ряд селективности выглядит следующим образом:

$$H^+ < Na^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Ba^{2+} < \\ < Al^{3+} < Fe^{3+} < Th^{4+}.$$

Видно, что для сульфокатионитов характерно повышение сродства при увеличении размера и заряда сорбируемого иона. В целом сульфокатиониты не обладают заметной специфичностью поглощения радионуклидов цезия и стронция в присутствии неактивных конкурирующих катионов натрия, калия, кальция, магния и др. В связи с ограниченной селективностью и высокой ценой органические ионообменные смолы после насыщения подвергают регенерации растворами неорганических кислот или солей и используют повторно. Опыт эксплуатации ионообменных установок показал, что применение органических катионообменных смол целесообразно для очистки ЖРО, содержащих не более 1 г/дм$^3$ растворенных солей. Более высокие концентрации солей ведут к необходимости частой регенерации ионитов, что приводит к получению значительных объемов активных регенерационных растворов [1—3].

Кроме сульфокатионитов для очистки ЖРО используют слабокислотные *резорцинформальдегидные катиониты,* обладающие высокой селективностью к ионам тяжелых щелочных металлов, особенно цезия. Сорбция на сорбентах данного типа наиболее эффективно протекает в сильнощелочных средах (pH > 12). Сорбированные металлы могут быть легко десорбированы разбавленными растворами кислот [4].

*Неорганические сорбенты,* по сравнению с органическими ионитами, обладают повышенной химической, термической и радиационной стойкостью, а также высокой селективностью к определенному иону или группе ионов [1, 5]. Для очистки ЖРО от радионуклидов цезия и стронция наиболее часто используют следующие типы неорганических сорбентов:

- природные и синтетические алюмосиликаты;
- оксигидраты титана, циркония, марганца;
- фосфаты титана и циркония;
- титаносиликаты щелочных металлов;
- ферроцианиды переходных металлов.

*Алюмосиликатные сорбенты* природного или искусственного происхождения представляют собой соединения общей формулы:

$$Me_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O,$$

где Me — катион щелочного или щелочноземельного металла с валентностью *n*. Сорбция осуществляется за счет замены присутствующих в составе сорбента подвижных катионов $Na^+$, $K^+$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ на катионы из раствора.

По структуре алюмосиликаты разделяются на слоистые и сетчатые. Среди слоистых алюмосиликатных сорбентов для очистки ЖРО наиболее часто используются бентонитовые глины [6—8]. Каркасные алюмосиликаты (цеолиты) обладают жесткой трехмерной структурой с определенным размером входных окон в решетке. Среди природных цеолитов наибольшее практическое применение получил *клиноптилолит* — высококремнистый цеолит состава $(Na,K)_4CaAl_6Si_{30}O_{12} \cdot 24H_2O$ [9—11]. Среди *синтетических цеолитов* наиболее часто используются цеолиты типа A и X в натриевой форме (NaA и NaX) с эффективным диаметром окон 0,4 и 0,9 нм соответственно [12, 13].

Синтетические и природные алюмосиликатные сорбенты используются главным образом для очистки ЖРО от радионуклидов Cs и Sr. Сорбция радионуклидов наиболее эффективно протекает в нейтральной и слабощелочной среде в диапазоне pH 6,5—8,5. Сорбенты данного типа используются однократно и после насыщения радионуклидами подлежат захоронению, как твердые радиоактивные отходы.

Неорганические сорбенты на основе нерастворимых *оксигидратов многовалентных металлов* представляют собой соединения общей формулы: $MeO_x(OH)_y \cdot zH_2O$, где Me — Fe(III), Cr(III), Mn(III, IV), Sn(IV), Ti(IV), Zr(IV), Sb(V) и др. [1, 5, 14]. Среди сорбентов данного типа наиболее широко используются оксигидраты циркония, титана, марганца (III, IV). Эти сорбенты применяются в основном для извлечения радионуклидов стронция.

Сорбенты на основе *фосфатов титана* и *циркония* используются для очистки растворов от радионуклидов цезия, урана, плутония, кобальта, марганца и др. [5, 15].

*Кристаллические* и *полукристаллические титаносиликаты щелочных металлов* ($M_2Ti_2O_3SiO_4 \cdot nH_2O$, где M — Na, K, n = 2—6) используются для удаления радионуклидов стронция и цезия из щелочных растворов. Титаносиликат натрия под маркой IONSIV IE-911 (UOP, США) успешно использовался для очистки от цезия и стронция высокосолевых щелочных растворов на предприятиях в Хенфорде и Ок-Ридже (США) [16, 17]. В России титаносиликаты щелочных металлов в промышленном масштабе не производятся. Небольшие партии сорбентов данного типа марки *TiSi* изготавливаются в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук (ИХТРЭМС КНЦ РАН), г. Апатиты [18].

Неорганические сорбенты на основе *ферроцианидов переходных металлов* имеют следующий химический состав: $M^{I}_{4-2x}M^{II}_{x}[Fe(CN)_6]$, где $M^{I}$ — $K^{+}$; $M^{II}$ — $Co^{2+}$, $Ni^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$ и др. Ряд селективности ферроцианидов переходных металлов: $Na^{+} < K^{+} < NH^{4+} << Rb^{+} < Cs^{+}$ свидетельствует об их повышенной селективности к ионам $Cs^{+}$ [19, 20].

Ферроцианидные сорбенты выпускают в гранулированном и мелкодисперсном виде. Для получения гранулированных сорбентов ферроцианид соответствующего переходного металла наносят на различные носители (силикагель, древесные опилки, углеродные волокна) или гранулируют с различными связующими. Мелкодисперсные сорбенты получают осаждением осадка ферроцианида переходного металла на поверхность порошкообразного минерального носителя.

В настоящее время в России выпускается большой ассортимент сорбентов на основе ферроцианидов переходных металлов. Марки некоторых промышленно выпускаемых ферроцианидных сорбентов приведены в табл. 1.

***Таблица 1. Марки российских ферроцианидных сорбентов (ФОЦ — ферроцианид)***

| Марка сорбента | Основа | Носитель; связующее | Содержание ферроцианидной составляющей, масс. % |
|---|---|---|---|
| Термоксид-35 | ФОЦ Ni-K | Гидроксид циркония | 30–35 |
| НЖС; Феникс; Селекс ЦФН; ФНС; ФСС; СФНС | ФОЦ Ni-K | Силикагель | 5–10 |
| ФС-1 | ФОЦ Ni-K | Золь кремниевой кислоты | 40–50 |
| ФС-2; ФС-10 | ФОЦ Cu-K | Золь кремниевой кислоты | 40–50 |
| Никет | ФОЦ Ni-K | Алюмосиликат | до 10 |
| Фежел; Анфеж; Уникет | ФОЦ Fe-K | Древесные опилки | до 10 |
| ZF-N | ФОЦ Ni-K | Природный цеолит | 5–10 |
| FN | ФОЦ Ni-K | Углеволокно | 20–30 |
| ФНД; СФНМ | ФОЦ Ni-K | Мел; диатомит | 15–25 |

Особую группу неорганических сорбентов образуют так называемые *сорбционно-реагентные материалы* (СРМ), для которых характерно образование сорбционно-активной фазы в процессе взаимодействия сорбента и раствора. К такого рода материалам относится сорбент СРМ-Sr на основе силиката бария, синтезированный в Институте химии ДВО РАН, г. Владивосток. Данный сорбент обладает повышенной селективностью при извлечении радиостронция из высокосолевых ЖРО типа морской воды. Сорбция стронция эффективно протекает из растворов, содержащих сульфат-ионы с концентрацией не менее 1 г/дм$^3$ [21, 22].

## Российские производители ионообменных смол и неорганических сорбентов

*ООО Производственное объединение «ТОКЕМ» (ООО ПО «ТОКЕМ»),* г. Кемерово. Единственный в России крупнотоннажный производитель ионообменных смол. Выпускает широкий ассортимент катионитов и анионитов различных типов под торговой маркой «Токем».

*АО «Аксион — Редкие и Драгоценные Металлы» (АО «АРДМ»),* г. Пермь. Выпускает в опытно-промышленном масштабе различные ионообменные смолы специального назначения: фосфорнокислые, аминокарбоксильные, резорцинформальдегидные катиониты, винилпиридиновые аниониты, ТВЭКСы и др. Торговая марка выпускаемой продукции — Axionit (Аксионит).

*НПФ «Термоксид»,* г. Заречный Свердловской обл. Крупнейший в России производитель неорганических сорбентов с торговой маркой «Термоксид». Селективные неорганические сорбенты марки «Термоксид» выпускаются в виде сферических механически прочных гранул с высокой химической, термической и радиационной устойчивостью. Термостойкие сорбенты сохраняют физико-химические и сорбционные свойства при длительном воздействии на них воды под давлением при температурах до 350 °C [23, 24]. Основные марки выпускаемой продукции: Термоксид-3А, Термоксид-3К, Термоксид-5, Термоксид-35.

*ООО НПП «Эксорб»,* г. Екатеринбург, выпускает целый ряд ферроцианидных (Никет, Уникет, Анфеж) и оксигидратных (Рацир, Модикс) сорбентов.

*Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов,* г. Ишимбай, Башкирия. Выпускает синтетические цеолиты различных типов, в частности NaA и NaX.

*Институт химии ДВО РАН,* г. Владивосток. Выпускает ферроцианидные сорбенты марок:

ZF-N ZF-F, ZF-F, а также сорбционно-реагентный материал CPM-Sr.

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук (ИХТРЭМС КНЦ РАН),* г. Апатиты Мурманской обл. Выпускает сорбенты марок TiP (фосфат титана), TiSi (титаносиликат натрия) и др.

*Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН),* г. Москва, на опытной установке выпускает следующие виды неорганических сорбентов: ФНС, ФСС, СФНС, СФНМ, ФНД, ФС-1, ФС-2, ФС-10, МДМ и др.

## Сорбционно-селективные характеристики различных сорбентов по отношению к радионуклидам цезия и стронция

В связи с тем что радионуклиды цезия и стронция в составе ЖРО среднего и низкого уровня активности находятся в микроколичествах, их сорбция протекает на линейном участке изотермы при постоянном значении коэффициента распределения ($K_d$). В области микроконцентраций численное значение $K_d$ не зависит от исходной активности радионуклида в растворе и от соотношения массы сорбента и объема раствора и определяется только сорбционной способностью сорбента и составом раствора. В связи с этим значение коэффициента распределения соответствующего радионуклида является наиболее важной сорбционной характеристикой сорбента.

В научно-технической литературе опубликовано большое количество работ, посвященных определению сорбционных характеристик различных типов сорбентов по отношению к радионуклидам цезия и стронция. Однако приведенные в литературе характеристики сорбентов определены при различных условиях проведения экспериментов, что не позволяет объективно сравнить их сорбционные свойства. Поэтому нами была разработана стандартизованная методика определения в статических условиях значений $K_d$ различных сорбционных материалов по отношению к радионуклидам цезия и стронция. Основой для разработки методики являлся более чем 35-летний опыт исследований, проводимых в лаборатории хроматографии радиоактивных элементов ИФХЭ РАН [25—32]. Стандартные условия определения значений $K_d$ $^{137}$Cs и $^{90}$Sr приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Стандартные условия определения в статических условиях значений коэффициентов распределения ($K_d$) радионуклидов $^{137}$Cs и $^{90}$Sr**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Размер частиц:<br>• для гранулированных сорбентов;<br>• для мелкодисперсных сорбентов | <br>0,25–0,50<br>менее 0,25 |
| Масса сорбента, г | 0,05–0,20* |
| Объем раствора, см$^3$ | 20,0 |
| Соотношение массы сорбента к объему раствора (Т:Ж), г/см$^3$ | 1:(100–400)* |
| Время контакта, ч | 48 |
| Температура раствора, °C | 20–25 |
| Состав модельных растворов при сорбции $^{137}$Cs, моль/дм$^3$, ед. pH | $NaNO_3$ – 0,1, pH = 5–6;<br>$NaNO_3$ – 1,0, pH = 5–6 |
| Состав модельных растворов при сорбции $^{90}$Sr, моль/дм$^3$, ед. pH | $NaNO_3$ – 0,1, pH = 5–6;<br>$Ca(NO_3)_2$ – 0,01, pH = 5–6 |
| Удельная активность $^{137}$Cs и $^{90}$Sr в исходном растворе, Бк/дм$^3$ | $10^5$–$10^6$ |

* В зависимости от сорбционных характеристик сорбента.

Перед началом испытаний сорбционный материал подвергают предподготовке, которая включает в себя операции усреднения пробы, сушки и получения гранул сорбента определенного размера. Влажные, гигроскопичные термически устойчивые сорбенты высушивают на воздухе при температуре 105 °C до постоянного веса. Образцы органических ионообменных смол высушивают при температуре не выше 60 °C. Термически неустойчивые сорбенты выдерживают при комнатной температуре (20—25 °C) до достижения постоянного веса. После высушивания сорбенты подвергают рассеву на стандартных ситах с получением фракции с размером частиц 0,25—0,50 мм — для гранулированных сорбентов и меньше 0,25 мм — для мелкодисперсных сорбентов.

Значение $K_d$ определяют в статических условиях путем перемешивания навески сорбента с аликвотой раствора известного состава до наступления сорбционного равновесия. После этого разделяют твердую и жидкую фазы и определяют удельную активность сорбируемого радионуклида в исходном и равновесном растворе. Значение $K_d$ рассчитывают по формуле:

$$K_d = V_p \cdot (A_0 - A_p)/(A_p \cdot m_c),$$

где $A_0$, $A_p$ — соответственно исходная и равновесная удельная активность сорбируемого радионуклида, Бк/дм$^3$;
$V_p$ — объем жидкой фазы, см$^3$;
$m_c$ — масса сорбента, г.

Соотношение массы сорбента и объема раствора (Т:Ж), в зависимости от сорбционных характеристик сорбента, составляет 1:(100—400) г/см$^3$. Для проведения испытаний удобно использовать стандартные пластиковые емкости (виалы) объемом 20 см$^3$ с герметичной резьбовой крышкой. Для сорбентов с невысокой сорбционной активностью рекомендуется использовать навески 0,1—0,2 г, Т : Ж = 1 : (200—100) г/см$^3$, а для сорбентов с высокой эффективностью сорбции навеска сорбента не должна превышать 0,05 г на 20 см$^3$ раствора (Т : Ж = 1 : 400 г/см$^3$). Образцы сорбентов взвешивают на аналитических весах с точностью взвешивания 0,0001 г.

Для определения времени достижения сорбционного равновесия проводят предварительные кинетические эксперименты. По нашему опыту, в большинстве случаев для завершения процесса сорбции достаточно 48 ч непрерывного перемешивания. Для обеспечения постоянного контакта фаз наиболее целесообразно использовать шейкеры с горизонтальной платформой.

После окончания перемешивания производят отделение частиц сорбента от раствора путем фильтрации через мелкопористый бумажный фильтр «синяя лента». При невозможности отделения частиц сорбента на бумажном фильтре, используют методы центрифугирования или фильтрации через мембранный фильтр с рейтингом 0,45 или 0,2 мкм.

При сорбции $^{137}$Cs в качестве жидкой фазы используют модельные растворы с концентрацией 0,1 и 1,0 моль/дм$^3$ $NaNO_3$, pH = 5—6. Выбор состава растворов обусловлен тем, что в большинстве видов ЖРО низкого и среднего уровня активности основной солевой составляющей являются соли натрия. Сравнение значений $K_d$ $^{137}$Cs в 0,1 и 1,0 моль/дм$^3$ растворах $NaNO_3$ дает четкое представление о селективности изучаемых сорбентов по отношению к цезию в низко- и высокосолевых ЖРО.

При сорбции $^{90}$Sr в качестве жидкой фазы используют модельные растворы, содержащие 0,1 моль/дм$^3$ $NaNO_3$, pH = 5—6, и 0,01 моль/дм$^3$ $Ca(NO_3)_2$, pH = 5—6. Выбор состава растворов обусловлен тем, что в большинстве случаев соединения натрия и кальция определяют катионный состав низко- и среднеактивных ЖРО. Ионы $Ca^{2+}$, вследствие близости химических свойств и размеров ионов, оказывают наибольшее негативное влияние на сорбцию стронция. Сравнение значений $K_d$ $^{90}$Sr в модельных растворах приведенного состава определяет селективность изучаемых сорбентов по отношению к стронцию на фоне преобладающих количеств конкурирующих ионов натрия и кальция.

Удельная активность $^{137}$Cs и $^{90}$Sr в исходных модельных растворах составляет ~ 10$^5$—10$^6$ Бк/дм$^3$, что соответствует низкому (среднему) уровню активности ЖРО и обеспечивает достаточную точность измерения активности растворов после сорбции.

Удельную активность $^{137}$Cs в растворах определяют прямым гамма-спектрометрическим методом по энергетическому пику 661 кэВ. Удельную активность $^{90}$Sr в растворах определяют по суммарной бета-активности с использованием бета- или жидкосцинтиляционных спектрометров. Измерения активности проб проводят в соответствии с методиками выполнения измерений (МВИ) соответствующего аналитического оборудования.

По величине $K_d$ можно рассчитать такой важный для практического использования параметр, как коэффициент очистки ($K_{оч}$) раствора при заданной дозировке сорбента (*Д*) или решить обратную задачу — определить дозировку сорбента (*Д*) для достижения требуемого значения $K_{оч}$:

$$K_{оч} = 1 + K_d \cdot Д/1000,$$

$$Д = 1000 \cdot (K_{оч} - 1)/K_d,$$

где $K_d$ — коэффициент распределения, см$^3$/г; *Д* — дозировка сорбента, г/дм$^3$.

Как было сказано выше, разработанная унифицированная методика применима для определения сорбционно-селективных характеристик по отношению к радионуклидам $^{137}$Cs и $^{90}$Sr. При проведении испытаний эти радионуклиды находятся в единственно возможном ионном состоянии, что позволяет воспроизводить эти эксперименты в различных лабораториях. Радионуклиды других химических элементов (кобальта, марганца, железа, сурьмы, европия, урана, америция, плутония и др.), присутствие которых возможно в составе ЖРО в нейтральных водных растворах, могут находиться в различном фазово-дисперсном состоянии (ионном, коллоидном, псевдоколлоидном). В связи с этим сорбционное поведение указанных радионуклидов является неопределенным и плохо воспроизводимым.

В табл. 3 и 4 приведены значения коэффициентов распределения микроколичеств радионуклидов $^{137}$Cs и $^{90}$Sr на различных типах сорбционных материалов, определенных по разработанной стандартизованной методике. В таблицах приведены средние значения двух параллельных экспериментов. Относительная погрешность определения значений $K_d$ не превышает 30 %.

Представленные результаты показывают, что в малосолевых растворах (0,1 моль/дм$^3$ $NaNO_3$) высокую селективность к $^{137}$Cs ($K_d$ $^{137}$Cs > 10$^3$ см$^3$/г) проявляют бентонитовые глины, природные и

**Таблица 3. Значения коэффициентов распределения ($K_d$) $^{137}$Cs на различных сорбентах**

| Тип сорбента (марка сорбента) | Значения $K_d$ $^{137}$Cs, см$^3$/г в растворе | |
|---|---|---|
| | 0,1 моль/дм$^3$ $NaNO_3$ | 1,0 моль/дм$^3$ $NaNO_3$ |
| ***Органические ионообменные смолы*** | | |
| Сульфокатионит КУ-2-8 | 390 | 10 |
| Резорцинформальдегидный катионит Axionit RCs | 1100 (pH = 6)<br>8700 (pH = 12) | 1800 (pH = 6)<br>$1{,}1\cdot10^4$ (pH = 12) |
| ***Природные и синтетические алюмосиликаты и цеолиты*** | | |
| Бентонитовая глина[1] | $1{,}9\cdot10^4$ | 2400 |
| Бентонитовая глина[2] | 7700 | 590 |
| Глауконит[3] | $1{,}6\cdot10^4$ | 3400 |
| Диатомит[4] | 2700 | 880 |
| Трепел[5] | 3000 | 580 |
| Клиноптилолит[6] | 1800 | 64 |
| Клиноптилолит[7] | 1600 | 80 |
| Синтетический цеолит NaA[8] | 8900 | 720 |
| Синтетический цеолит NaX[9] | 1800 | 190 |
| ***Оксигидраты, фосфаты, титаносиликаты*** | | |
| Силикагель АСКГ | 305 | 20 |
| МДМ[10] | 290 | 5 |
| Термоксид-3К[11] | 150 | 10 |
| Термоксид-5[12] | 44 | < 1 |
| Термоксид-3А[13] | 1800 | 150 |
| PTi[14] | 7300 | 820 |
| TiSi (титаносиликат натрия)[15] | $1{,}9\cdot10^5$ | $1{,}2\cdot10^5$ |
| ***Ферроцианидные сорбенты*** | | |
| Термоксид-35[16] | $1{,}2\cdot10^5$ | $8{,}1\cdot10^4$ |
| ФНС; СФНС[17] | $8{,}4\cdot10^4$ | $7{,}3\cdot10^4$ |
| ФНД; СФНМ[18] | $8{,}1\cdot10^4$ | $7{,}9\cdot10^4$ |
| Анфеж[19] | $2{,}0\cdot10^4$ | $4{,}1\cdot10^3$ |
| Никет[20] | $1{,}3\cdot10^4$ | $5{,}5\cdot10^4$ |
| FN[21] | $3{,}0\cdot10^6$ | $1{,}5\cdot10^6$ |
| ***Углеродные сорбенты*** | | |
| Активированный уголь БАУ | 43 | < 2 |
| Природный шунгит[22] | 910 | 135 |

1 – Нелидовское месторождение (Белгородская обл.); 2 – месторождение «10-й хутор» (Республика Хакассия); 3 – Каринское месторождение (Челябинская обл.); 4 – Инзенское месторождение (Ульяновская обл.); 5 – Зикеевское месторождение (Калужская обл.); 6 – Холинское месторождение (Читинская обл.); 7 – Шивыртуйское месторождение (Читинская обл.); 8, 9 – синтетические цеолиты без связующего (Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов, Башкирия); 10 – оксиды марганца (III, IV) (ИФХЭ РАН); 11 – гидратированный оксид циркония (НПФ «Термоксид»); 12 – гидратированный оксид титана (НПФ «Термоксид»); 13 – фосфат циркония (НПФ «Термоксид»); 14 – фосфат титана (ИХТРЭМС КНЦ РАН); 15 – титаносиликат натрия, опытный образец (ИХТРЭМС КНЦ РАН); 16 – сорбент на основе ферроцианида (ФОЦ) никеля и гидроксида циркония (НПФ «Термоксид»); 17 – сорбент на основе ФОЦ никеля и силикагеля (ИФХЭ РАН); 18 – мелкодисперсные сорбенты на основе ФОЦ никеля и диатомита (ИФХЭ РАН); 19 – композиционный сорбент на основе ФОЦ железа и целлюлозы (НПП «Эксорб»); 20 – композиционный сорбент на основе ФОЦ никеля и природного алюмосиликата (НПП «Эксорб»); 21 – волокнистый композиционный сорбент на основе ФОЦ никеля и углеродного волокна (ИХ ДВО РАН); 22 – Зажогинское месторождение, Карелия.

**Таблица 4. Значения коэффициентов распределения ($K_d$) $^{90}$Sr на различных сорбентах**

| Тип сорбента (марка сорбента) | Значения $K_d$ $^{90}$Sr, см$^3$/г в растворе | |
|---|---|---|
| | 0,1 моль/дм$^3$ $NaNO_3$ | 0,01 моль/дм$^3$ $Ca(NO_3)_2$ |
| Сульфокатионит КУ-2-88 | 2000 | 310 |
| Бентонитовая глина1 | 110 | 40 |
| Клиноптилолит2 | 310 | 70 |
| Синтетический цеолит NaA3 | $8{,}5\cdot10^4$ | 4400 |
| Синтетический цеолит NaX4 | 7900 | 1680 |
| МДМ5 | $4{,}0\cdot10^4$ | 8600 |
| Термоксид-3К6 | $3{,}5\cdot10^4$ | 217 |
| Термоксид-3А7 | 326 | 440 |
| PTi8 | $5{,}1\cdot10^4$ | $3{,}5\cdot10^4$ |
| TiSi9 | $3{,}0\cdot10^4$ | $2{,}5\cdot10^4$ |
| Активированный уголь БАУ | 190 | < 2 |

1 – Нелидовское месторождение (Белгородская обл.); 2 – Шивыртуйское месторождение (Читинская обл.); 3, 4 – синтетические цеолиты без связующего (Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов, Башкирия); 5 – оксиды марганца (ИФХЭ РАН); 6 – гидратированный оксид циркония (НПФ «Термоксид»); 7 – фосфат циркония (НПФ «Термоксид»); 8 – фосфат титана (ИХТРЭМС КНЦ РАН); 9 – титаносиликат натрия, опытный образец (ИХТРЭМС КНЦ РАН)

синтетические цеолиты, фосфаты титана и циркония, титаносиликаты и ферроцианидные сорбенты. В высокосолевых растворах (1,0 моль/дм$^3$ $NaNO_3$) высокая селективность к $^{137}$Cs сохраняется только для титаносиликатов и ферроцианидных сорбентов.

Как следует из табл. 4, при сорбции $^{90}$Sr в присутствии ионов натрия повышенную селективность к стронцию проявляют синтетические цеолиты, сорбент на основе оксидов марганца (III, IV) — МДМ, фосфат титана, титаносиликат натрия. В присутствии ионов кальция сорбция стронция резко ухудшается на большинстве изученных типов сорбентов. Максимальная сорбция стронция в присутствии ионов кальция наблюдается на сорбенте МДМ, фосфате титана и титаносиликате натрия.

Таким образом, разработанная стандартизованная методика определения сорбционно-селективных характеристик различных типов сорбционных материалов по отношению к радионуклидам $^{137}$Cs и $^{90}$Sr позволяет проводить объективное сравнение их сорбционных свойств и осуществлять целенаправленный выбор наиболее эффективных сорбентов для очистки ЖРО сложного солевого и радионуклидного состава.

## Литература

1. *Кузнецов Ю. В., Щебетковский В. Н., Трусов А. Г.* Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М. : Атомиздат, 1974. 366 с.
2. *Егоров Е. В., Макарова С. Б.* Ионный обмен в радиохимии. М. : Атомиздат, 1971. 406 с.
3. *Рябчиков Б. Е.* Очистка жидких радиоактивных отходов. М. : ДеЛи принт, 2008. 516 с.
4. *Fiskum S. K., Blanchard D. L., Steele M. J., Thomas K. K., Trang-Le T. and Thorson M. R.* Spherical Resorcinol-Formaldehyde Resin Testing for Cesium Removal from Hanford Tank Waste Simulant // Separation Science and Technology. 2006. Vol. 41. No. 11. Pp. 2461—2474.
5. *Амфлетт Ч.* Неорганические иониты. М. : Мир, 1966. 188 с.
6. *Pusch R.* Use of bentonite for isolation of radioactive waste products // Clay Minerals. 1992. Vol. 27. Pp. 353—361.
7. *Murali M. S., Mathur J. N.* Sorption characteristics of Am(III), Sr(II) and Cs(I) on bentonite and granite // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2002. Vol. 254. No. 1. Pp. 129—136.
8. *Galambos M. et al.* Cesium sorption on bentonites and montmorillonite K10 // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2010. Vol. 284. Pp. 55—64.
9. *Челищев Н. Ф.* Ионообменные свойства минералов. М. : Наука, 1973. 203 с.
10. *Borai E. H., Harjula R., Paajanen A.* Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals // J. Hazard. Mater. 2009. Vol. 172. Pp. 416—422.
11. *Чернавская Н. Б.* Сорбция стронция на клиноптилолите и гейландите // Радиохимия. 1985. Т. 25. № 5. С. 37—40.
12. *Брэк Д.* Цеолитовые молекулярные сита. М. : Мир, 1976. 782 с.
13. *Жданов С. П., Хвощев С. С., Самулевич Н. Н.* Синтетические цеолиты: Кристаллизация, структурно-химическое модифицирование и адсорбционные свойства. М. : Химия, 1981. 261 с.
14. *Егоров Ю. В.* Статика сорбции микрокомпонентов оксигидратами. М. : Атомиздат, 1975. 197 с.
15. *Сухарев Ю. И., Егоров Ю. В.* Неорганические иониты типа фосфата циркония. М. : Энергоатомиздат, 1983. 110 с.
16. *Chaptman D. M., Roe A. L.* Synthesis, characterization and crystal chemistry of microporous titanium-silicate materials // Zeolites. 1990. Vol. 10. Pp. 730—737.
17. *Clearfield A., Bortun L. N., Bortun A. I.* Alkali metal ion exchange by the framework titanium silicate $M_2Ti_2O_3SiO_4{*}nH_2O$ (M = H, Na) // Reactive & Functional Polymers. 2000. Vol. 43. Pp. 85—95.
18. *Бритвин С. Н., Герасимова Л. Г., Иванюк Г. Ю. и др.* Применение титансодержащих сорбентов для очистки жидких радиоактивных отходов с последующей локализацией радионуклидов в титанатных керамиках типа Synrok // Химическая технология. 2015. Т. 16. № 4. С. 229—238.
19. *Тананаев И. В., Сейфер Г. Б., Харитонов Ю. Я. и др.* Химия ферроцианидов. М. : Наука, 1971. 320 с.
20. *Вольхин В. В., Зильберман М. В., Колесова С. А., Шульга Е. А.* Общая характеристика сорбционных свойств ферроцианидов двухвалентных переходных металлов // Журнал прикладной химии. 1975. Т. 48. С. 54—59.
21. *Авраменко В. А., Железнов В. В., Каплун Е. В., Сокольницкая Т. А., Юхкам А. А.* Сорбционно-реагентное извлечение стронция из высокосолевых растворов // Химическая технология. 2001. № 7. С. 23—26.
22. *Авраменко В. А., Каплун Е. В., Сокольницкая Т. А., Железнов В. В., Юхкам А. А., Братская С. Ю.* Способ извлечения радионуклида стронция из водных растворов (варианты). Патент РФ 2185671, опубл. 20.07.2002.
23. *Шарыгин Л. М., Муромский А. Ю., Моисеев В. Е., Сараев О. М., Морозов В. Г.* Испытания селективного сорбента Термоксид-3А для очистки от радионуклидов теплоносителя бассейна выдержки Белоярской АЭС // Атомная энергия. 1996. Т. 80. Вып. 4. С. 279—282.
24. *Шарыгин Л. М.* Термостойкие неорганические сорбенты. Екатеринбург : УрО РАН, 2012. 303 с.
25. *Милютин В. В.* Физико-химические методы извлечения радионуклидов из жидких радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. Автореф. дисс.... докт. хим. наук. М., 2008. 49 с.
26. *Милютин В. В., Гелис В. М., Пензин Р. А.* Сорбционно-селективные характеристики неорганических сорбентов и ионообменных смол по отношению к цезию и стронцию // Радиохимия. 1993. Т. 35. № 3. С. 76—78.
27. *Милютин В. В., Гелис В. М.* Сравнительная оценка селективности сорбентов различных типов по отношению к ионам стронция // Журнал прикладной химии. 1994. Т. 67. № 11. С. 1776—1779.
28. *Милютин В. В., Гелис В. М.* Сравнительная оценка селективности сорбентов различных типов по отношению к ионам цезия // Журнал прикладной химии. 1997. Т. 70. № 12. С. 1967—1970.
29. *Милютин В. В., Гелис В. М., Кононенко О. А., Михеев С. В.* Сорбция цезия на мелкодисперсных композиционных ферроцианидных сорбентах // Радиохимия. 2010. Т. 52. № 3. С. 238—240.
30. *Милютин В. В., Везенцев А. И., Соколовский П. В., Некрасова Н. А.* Сорбция радионуклидов цезия из водных растворов на природных

и модифицированных глинах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. Вып. 5. С. 879—883.
31. *Стрелко В. В., Милютин В. В., Гелис В. М., Псарева Т. С., Журавлев И. З., Шапошникова Т. А., Мильграндт В. Г., Бортун А. И.* Сорбция радионуклидов цезия на полукристаллических силикатитанатах щелочных металлов // Радиохимия. 2015. Т. 57. № 1. С. 64—68.
32. *Милютин В. В., Некрасова Н. А., Яничева Н. Ю., Калашникова Г. О., Ганичева Я. Ю.* Сорбция радионуклидов цезия и стронция на кристаллических титаносиликатах щелочных металлов // Радиохимия. 2017. Т.59. № 1. С. 59—62.

## Информация об авторах

*Милютин Виталий Витальевич,* доктор химических наук, заведующий лабораторией, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4), e-mail: vmilyutin@mail.ru.

*Некрасова Наталья Анатольевна,* кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4), e-mail: nnekrassova@gmail.com.

*Каптаков Виктор Олегович,* инженер, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4), e-mail: v.kapt@yandex.ru.

## Библиографическое описание статьи

*Милютин В. В., Некрасова Н. А., Каптаков В. О.* Современные сорбционные материалы для очистки жидких радиоактивных отходов от радионуклидов цезия и стронция // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 80—89. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-80-89.

# MODERN SORPTION MATERIALS FOR CESIUM AND STRONTIUM RADIONUCLIDE EXTRACTION FROM LIQUID RADIOACTIVE WASTE

**Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Kaptakov V. O.**

**Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow, Russia**

Article received on August 26, 2020

*The paper describes the main types of sorption materials used to remove cesium and strontium radionuclides from low-level and intermediate-level liquid radioactive waste (LRW). It mainly focuses on sorbents produced at an industrial or pilot scale in Russia. Based on a developed standardized technique, it presents the experimental values for $^{137}$Cs and $^{90}$Sr distribution coefficients ($K_d$) accounting for various types of sorbents. The study demonstrates that based on the developed technique, sorption characteristics of various types of sorption materials can be compared in an unbiased manner and most effective sorbents can be reasonably selected to treat liquid radioactive waste of various salt and radionuclide composition.*

**Keywords:** *radioactive waste, liquid radioactive waste, purification, cesium and strontium radionuclides, sorbents, characteristics.*

## References

1. Kuznetsov Yu. V., Schebetkovsky V. N., Trusov A. G. *Osnovy ochistki vody ot radioactivnych zagryaznenii* [Fundamentals of water purification from radioactive contamination]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 366 p.
2. Egorov E. V., Makarova S. B. *Ionnyi obmen v radiokhimii* [Ion exchange in radiochemistry]. Moscow, Atomizdat Publ., 1971. 406 p.
3. Ryabchikov B. E. *Ochistka zchidkich radioactivnich otkhodov* [Purification of liquid radioactive waste]. Moscow, Delhi print Publ., 2008. 516 p.

4. Fiskum S. K., Blanchard D. L., Steele M. J., Thomas K. K., Trang-Le T., Thorson M. R. Spherical Resorcinol-Formaldehyde Resin Testing for Cesium Removal from Hanford Tank Waste Simulant. *Separation Science and Technology,* 2006, vol. 41, no. 11, pp. 2461—2474.

5. Amphlett Ch. *Neorganicheskie ionoobmenniki* [Inorganic ion exchangers]. Moscow, Mir Publ., 1966. 188 p.

6. Pusch R. Use of bentonite for isolation of radioactive waste products. *Clay Minerals,* 1992, vol. 27. pp. 353—361.

7. Murali M. S., Mathur J. N. Sorption characteristics of Am(III), Sr(II) and Cs(I) on bentonite and granite. *J. Radioanal. Nucl. Chem.,* 2002, vol. 254, no. 1, pp. 129—136.

8. Galambos M. et al. Cesium sorption on bentonites and montmorillonite K10. *J. Radioanal. Nucl. Chem.,* 2010, vol. 284, pp. 55—64.

9. Chelishchev N. F. *Ionoobmennie svoistva mineralov* [Ion exchange properties of minerals]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 203 p.

10. Borai E. H., Harjula R., Paajanen A. Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals. *J. Hazard. Mater.,* 2009, vol. 172, pp. 416—422.

11. Chernavskaya N. B. Sorbciya stronciya na klinoptilolite i helandite [Sorption of strontium on clinoptilolite and heulandite]. *Radiokhimiya — Radiochemistry,* 1985, vol. 25, no. 5, pp. 37—40.

12. Brack D. *Ceolitovye molekulyarnye sita* [Zeolite molecular sieves]. Moscow, Mir Publ., 1976. 782 p.

13. Zhdanov S. P., Khvoshchev S. S., Samulevich N. N. *Sinteticheskie ceolity: kristalizaciya, structurnaya i khimicheskaya modificaciya i adsorbcionnye svoistva* [Synthetic zeolites: Crystallization, structural and chemical modification and adsorption properties]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 261 p.

14. Egorov Yu. V. *Statika sorbcii mikrokomponentov oksihidratami* [The statics of sorption of microcomponents by oxyhydrates]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 197 p.

15. Sukharev Yu. I., Egorov Yu. V. *Neorganicheskie ionoobmenniki tipa fosfata cirkoniya* [Inorganic ion exchangers such as zirconium phosphate]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 110 p.

16. Chaptman D. M., Roe A. L. Synthesis, characterization and crystal chemistry of microporous titanium-silicate materials. *Zeolites,* 1990, vol. 10, pp. 730—737.

17. Clearfield A., Bortun L. N., Bortun A. I. Alkali metal ion exchange by the framework titanium silicate $M_2Ti_2O_3SiO_4{\cdot}nH_2O$ (M = H, Na). *Reactive & Functional Polymers,* 2000, vol. 43, pp. 85—95.

18. Britvin S. N., Gerasimova L. G., Ivanyuk G. Yu. et al. Primenenie titan-soderzchazshich sorbentov dlya ochistki zchidkich radioactivnich otkhodov s nosleduyuzshei lokalizaciei radionuklidov v titanatnuyu keramiku tipa Sinrock [Application of titanium-containing sorbents for purification of liquid radioactive waste with subsequent localization of radionuclides in titanate ceramics of the Synrok type]. *Khimicheskaya Tekhnologiya — Chemical Technology,* 2015, vol. 16, no. 4, pp. 229—238.

19. Tananaev I. V., Seifer G. B., Kharitonov Yu. Ya. et al. *Khimiya ferrocianidov* [Chemistry of ferrocyanides]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 320 p.

20. Volkhin V. V., Zilberman M. V., Kolesova S. A., Shulga E. A. Obzchie kharakteristiki sorbcionnich svoistv ferrocianidov dvukhvalentnych perekhodnych metallov [General characteristics of sorption properties of ferrocyanides of divalent transition metals]. *Zhurnal prikladnoi khimii – Russian Journal of Applied Chemistry,* 1975, vol. 48, pp. 54—59.

21. Avramenko V. A., Zheleznov V. V., Kaplun E. V., Sokolnitskaya T. A., Yukhkam A. A. Sorbtsionno-reagentnoe izvlechenie strontsiya iz vysokosolevykh rastvorov [Sorption-reagent extraction of strontium from high-salt solutions]. *Khimicheskaya Tekhnologiya — Chemical Technology,* 2001, no. 7, pp. 23—26.

22. Avramenko V. A., Kaplun E. V., Sokolnitskaya T. A., Zheleznov V. V., Yukhkam A. A., Bratskaya S. Yu. Metod izvlecheniya stronciya iz vodnych rastvorov (varianti) [Method for extracting strontium radionuclide from aqueous solutions (options)]. RU patent 2185671, publ. July 20, 2002.

23. Sharygin L. M., Muromsky A. Yu., Moiseev V. E., Saraev O. M., Morozov V. G. Ispipaniya selektivnogo sorbenta Termoksid-3 dlya ochstki ot radionuklidov teplonositelya basseina vyderzshki Beloyarskoy AES [Tests of the selective sorbent Termoksid-ZA for cleaning the coolant from the cooling pool of the Beloyarsk NPP from radionuclides]. *Atomnaya Energiya — Atomic energy,* 1996, vol. 80, no. 4, pp. 279—282.

24. Sharygin L. M. *Termostoikie neorganicheskie sorbenty* [Heat-resistant inorganic sorbents]. Yekaterinburg, Uro RAN Publ., 2012. 303 p.

25. Milyutin V. V. Fiziko-khimicheskie metody izvlecheniya radionuklidov iz zchidkich radioactivnich otkhodov nizkogo I srednego urovnya aktivnosti [Physicochemical methods for extracting radionuclides from liquid radioactive waste of low and medium level of activity]. Dr. chem. sci. diss. Abstr. Moscow, 2008. 49 p.

26. Milyutin V. V., Gelis V. M., Penzin R. A. Sorbcionno-selektivnye kharakteristiki neorganicheskich sorbentov i ionoobmennych smol po otnosheniyu k ceziyu i stronciyu [Sorption-selective characteristics of inorganic sorbents and ion-exchange resins in relation to cesium and strontium]. *Radiokhimiya —Radiochemistry,* 1993, vol. 35, no. 3, pp. 76—78.

27. Milyutin V. V., Gelis V. M. Sravnitelnaya otsenka selektivnosti sorbentov razlichnych tipov po otnosheniyu k ionam stronciya [Comparative assessment of the selectivity of sorbents of various types in relation to strontium ions]. *Zhurnal prikladnoi khimii — Russian Journal of Applied Chemistry,* 1994, vol. 67, no. 11, pp. 1776—1779.
28. Milyutin V. V., Gelis V. M. Sravnitelnaya oschenka selektivnosti sorbentov razlichnych tipov po otnosheniyu k ionam ceziya [Comparative assessment of the selectivity of sorbents of various types in relation to cesium ions]. *Zhurnal prikladnoi khimii – Russian Journal of Applied Chemistry,* 1997, vol. 70, no. 12, pp. 1967—1970.
29. Milyutin V. V., Gelis V. M., Kononenko O. A., Mikheev S. V. Sorbciya ceziya na melkodispersnych kompozicionnych ferrocianidnych sorbentach [Sorption of cesium on finely dispersed composite ferrocyanide sorbents]. *Radiokhimiya — Radiochemistry,* 2010, vol. 52, no. 3, pp. 238—240.
30. Milyutin V. V., Vezentsev A. I., Sokolovsky P. V., Nekrasova N. A. Sorbcia radionuklidov ceziya iz vodnych rastvorov na prirodnych i modificirovannych glinach [Sorption of cesium radionuclides from aqueous solutions on natural and modified clays]. *Sorbcionnye i khromatograficheskie processi — Sorption and chromatographic processes,* 2014, vol. 14, no. 5, pp. 879—883.
31. Strelko V. V., Milyutin V. V., Gelis V. M., Psareva T. S., Zhuravlev I. Z., Shaposhnikova T. A., Milgrandt V. G., Bortun A. I. Sorbcia radionuklidov ceziya na polukristallicheskich silikotitanatach schelochnych metallov [Sorption of cesium radionuclides on semi-crystalline silicatitanates of alkali metals]. *Radiokhimiya — Radiochemistry,* 2015, vol. 57, no. 1, pp. 64—68.
32. Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Yanicheva N. Yu., Kalashnikova G. O., Ganicheva Ya. Yu. Sorbcia radionuklidov ceziya I stronciya na kristallicheskich titanosilikatach schelochnych metallov [Sorption of cesium and strontium radionuclides on crystalline titanosilicates of alkali metals]. *Radiokhimiya — Radiochemistry,* 2017, vol. 59, no. 1, pp. 59—62.

## Information about the authors

*Milyutin Vitaly Vital'evich,* Doctor of Chemical Sciences, Head of Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS) (31, Leninsky Prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: vmilyutin@mail.ru.

*Nekrasova Natalia Anatol'evna,* PhD in Chemistry, Senior Researcher, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS) (31, Leninsky Prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: nnekrassova@gmail.com.

*Kaptakov Victor Olegovich, Engineer,* Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS) (31, Leninsky Prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: v.kapt@yandex.ru.

## Bibliographic description

Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Kaptakov V. O. Modern Sorption Materials for Cesium and Strontium Radionuclide Extraction from Liquid Radioactive Waste. *Radioactive Waste,* 2020, no. 4 (13), pp. 80—89. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-80-89.