

## ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В БАРЬЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Г. А. Варлакова<sup>1</sup>, А. С. Баринов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара», Москва

<sup>2</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2019 г.

---

*Представлены результаты экспериментов по определению форм нахождения радионуклидов цезия, кобальта и стронция в природных материалах, представляющих собой глинистый грунт и песок озерно-ледникового генезиса и выполняющих роль естественных барьеров в хранилищах радиоактивных отходов. Установлено, что в результате продолжительного контакта с барьерными материалами происходит изменение форм нахождения радионуклидов. В исследованных барьерных материалах с течением времени доминирующими становятся фиксированные формы радионуклидов цезия, кобальта и стронция.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, радионуклиды, формы нахождения, барьерные материалы, длительность взаимодействия, поглощение.

Хранение/захоронение отходов низкого и среднего уровня активности осуществляется в приповерхностных хранилищах, заглубленных или расположенных на поверхности земли. Безопасность таких сооружений в эксплуатационный и постэксплуатационный периоды обеспечивается за счет многобарьерной защитной системы, представляющей собой совокупность естественных и инженерных барьеров [1, 2], препятствующих воздействию ионизирующих излучений и миграции радиоактивных веществ в окружающую среду. Одним из естественных барьеров является вмещающая среда (порода), в которой или на которой расположено хранилище. Кроме того, к элементам инженерных барьеров относятся: буферный материал, подстилающий и покрывающий экраны. Часто при создании инженерных барьеров используют природные материалы: песок, изъятую породу

или их смеси, т. к. они обладают хорошими противомиграционными свойствами по отношению к радионуклидам и доступны. В связи с этим материал, из которого состоит вмещающая среда, может выступать в качестве буферного и в составе подстилающего и покрывающего экранов, что часто и практикуется на объектах, где сооружаются подобные хранилища. Для выполнения функции по ограничению миграции радионуклидов барьерные материалы должны обладать хорошими сорбционными свойствами по отношению к ним и сохранять способность прочно фиксировать их в период потенциальной опасности радиоактивных отходов. Миграция радионуклидов за пределы хранилища и их распространение в окружающей среде зависят от сорбционных свойств барьерных материалов, которые, в свою очередь, обуславливают формы нахождения радионуклидов в них, особенно на

длительный период. С течением времени после попадания радионуклидов в природные материалы физико-химические формы радионуклидов изменяются [3], т. к. они взаимодействуют с барьерными материалами. Это приводит к фиксации радионуклидов на твердой фазе и замедлению миграции. По аналогии с тяжелыми металлами формы радионуклидов в породах и грунтах условно разделяют на подвижные и фиксированные [3, 4]: к подвижным относят водорастворимые, сорбированные и обменные формы, а к фиксированным — труднорастворимые и остаточные.

Неоднократно было отмечено, что в процессе эксплуатации хранилищ радиоактивных отходов происходит перераспределение форм существования радионуклидов в материалах барьера (вмещающей породе, буферной засыпке) [5, 6], изменяются соотношения доли подвижных и фиксированных форм радионуклидов, что и сказывается на их миграционной способности [7, 8].

Целью данной работы являлась оценка прочности фиксации радионуклидов в барьерных материалах в процессе длительного контакта с ними.

### Экспериментальная часть

Опыты проводили на образцах покровных суглинков, отобранных на площадке пункта хранения радиоактивных отходов, и песка озерно-ледникового генезиса, использованных в качестве барьерных материалов при создании приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов. Химический и минералогический составы суглинков и песка приведены в работах [9–11]. В составе покровных суглинков присутствуют кварц, полевые шпаты и глинистые минералы — группы каолинита, иллит, вермикулит, монтмориллонит, и в примесях — гидрослюды. Песок в основном состоит из кварца. В его составе в малых количествах присутствуют глинистые минералы, полевые шпаты, глауконит, гидрослюды, соединения железа. В опытах использовались фракции материалов с размерами частиц менее 2 мм.

Эксперимент основан на последовательной обработке образцов материалов, находившихся в контакте с радиоактивными растворами в течение 2 недель, 1, 2, 4 и 6 месяцев, растворами реагентов различного состава.

Опыты построены следующим образом. На первом этапе проводили сорбционные эксперименты, для чего исследуемые образцы материалов приводили в контакт с модельными

растворами, содержащими радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{60}\text{Co}$ , которые готовили на основе деионизированной воды. Взаимодействие образцов грунта с модельными растворами происходило в статических условиях при соотношении твердой и жидкой фаз 1:2 и температуре 22 °С. Каждому времени контакта и каждому радионуклиду соответствовали отдельные образцы двух видов материалов. По истечении установленного времени производили разделение твердой и жидкой фаз с помощью центрифугирования. Активность в жидкой фазе измеряли радио- и спектрометрическими методами. По результатам измерений рассчитывали удельную активность радионуклида в твердой фазе ( $A_{\text{т.ф.}}$ , Бк/г) по формуле:

$$A_{\text{т.ф.}} = \frac{(A_0 - A_{\text{ж.ф.}}) \cdot V}{m},$$

где  $A_0$  — удельная активность исходного модельного раствора, Бк/мл;

$A_{\text{ж.ф.}}$  — удельная активность модельного раствора по истечении времени контакта, Бк/мл;

$V$  — объем модельного раствора в контакте с твердой фазой, мл;

$m$  — масса твердой фазы, г.

Таким способом были получены модельные образцы барьерных материалов, содержащие радионуклиды цезия, кобальта и стронция.

На втором этапе проводили селективную десорбцию радионуклидов из твердой фазы с целью определения форм их нахождения в образцах материалов. Метод заключается в последовательной обработке образцов растворами различных реагентов [3, 7, 12], что позволяет извлекать из твердой фазы радионуклиды в различных формах. Использованные реагенты, определяемая форма нахождения радионуклидов и условия эксперимента приведены в таблице 1. Образцы обрабатывались реагентами в указанной последовательности при перемешивании при соотношении твердой и жидкой фаз 1:10. По окончании каждого этапа твердая фаза отделялась от жидкой методом центрифугирования.

Таблица 1. Условия экспериментов по десорбции

Форма	Этап	Реагенты	Условия эксперимента
Водорастворимая	(I)	$\text{H}_2\text{O}$	T:Ж = 1:10; 22 °С; время обработки 15 мин
Обменная, легко-растворимая	(II)	$1\text{M}\cdot\text{CH}_3\text{COONH}_4$	T:Ж = 1:10; 22 °С; время обработки 60 мин
Кислоторастворимая	(III)	$6\text{M}\cdot\text{HCl}$	T:Ж = 1:10; 22 °С; время обработки 60 мин
Остаточная	(IV)	$7,5\text{-M}\cdot\text{HNO}_3$	T:Ж = 1:10; 85 °С; время обработки 60 мин

В отделившейся жидкой фазе определяли суммарную активность десорбированного радионуклида радиометрическими и спектрометрическими методами.

### Результаты и обсуждение

Эксперименты по выявлению сорбционных возможностей по отношению к радионуклидам [13, 14] дают представление об их общем содержании в твердой фазе (материалах барьеров), а данные по десорбции радионуклидов из твердой фазы дают ответ о формах их нахождения, что позволяет сделать вывод о прочности связи их с барьерными материалами и прогнозировать их поведение.

Эксперименты показали, что в исследуемых барьерных материалах радионуклиды цезия, стронция и кобальта находятся в разных формах и соотношениях. С течением времени происходит изменение форм их нахождения в этих материалах, о чем свидетельствуют данные, представленные в графическом виде (рис. 1–3).

Для всех радионуклидов характерным является снижение доли подвижных форм (I–III этапы десорбции) с увеличением времени взаимодействия их с материалами. Одновременно происходит повышение доли прочносвязанных форм радионуклидов, извлекаемых на IV этапе

и неизвлекаемых из твердой фазы. При этом скорости процессов трансформации форм радионуклидов в материалах различаются, что связано с механизмом поглощения радионуклидов твердой фазой: вхождением в кристаллическую решетку глинистых минералов, ионным обменом, химическим соосаждением и т. п. [15].

Значительная часть цезия с первых недель взаимодействия с материалами переходит в фиксированное состояние (рис. 1а, б). В грунте цезий прочно фиксируется на уровне 95–98% (продолжительность опыта — от 4 до 6 месяцев), в песке — на уровне 89–96%, причем с течением времени доля фиксированного цезия быстро возрастает. Это явление связывают с тем, что цезий, в основном за счет изовалентного изоморфизма, входит в кристаллическую решетку калиевых минералов (слюды и полевые шпаты и др.) [16], и с наличием пленок железа (оксидов, гидроксидов) на поверхности частиц, существенно способствующих сорбции.

Среди подвижных форм стронция в грунте и в песке по истечении времени большую долю (29% и 25% соответственно) составляют обменные и легкорастворимые формы радионуклидов (рис. 2а, б).

Содержание фиксированных форм стронция в исследуемом временном интервале увеличивается примерно в 2–3 раза, но заметно, что

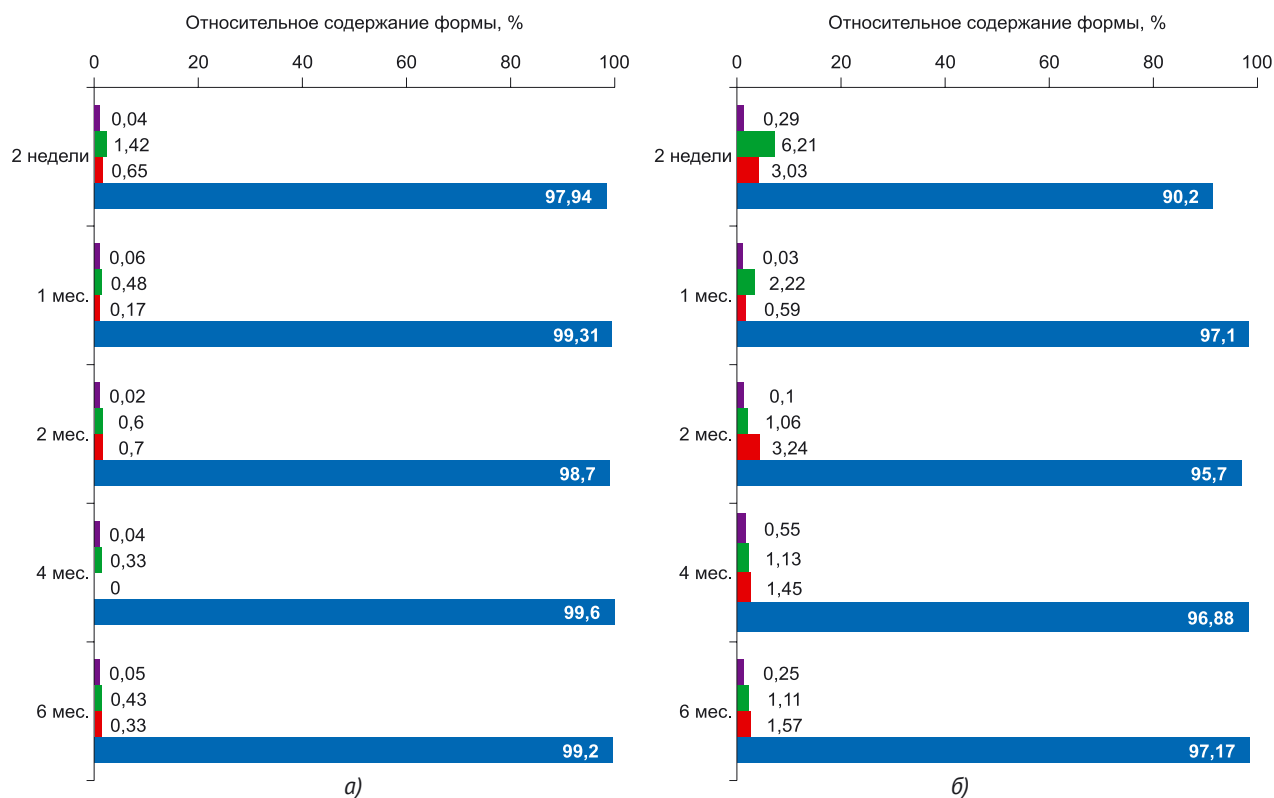


Рис. 1. Формы нахождения  $^{137}\text{Cs}$  в зависимости от длительности взаимодействия с глинистым грунтом (а) и песком (б):  
■ – водорастворимая, ■ – обменная, ■ – кислоторастворимая, ■ – остаточная

## Захоронение РАО

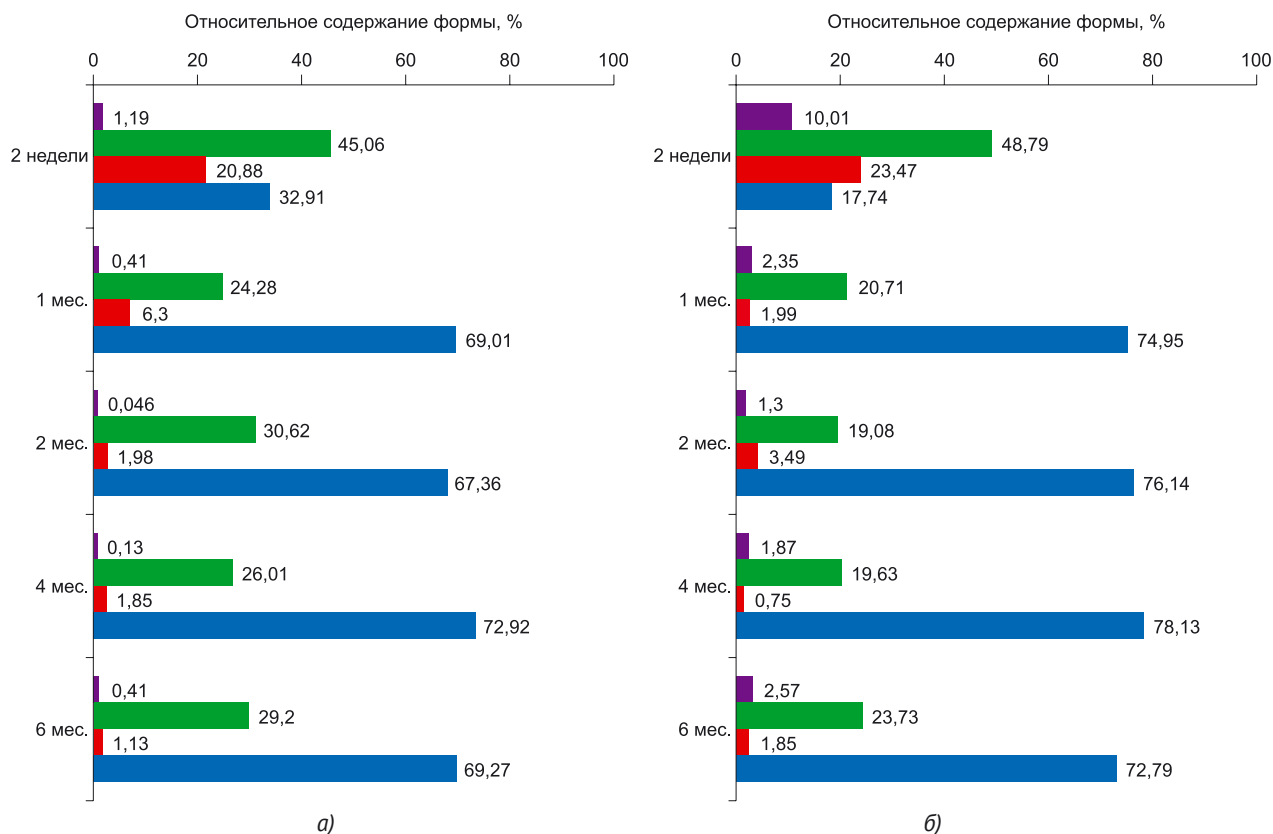


Рис. 2. Формы нахождения  $^{90}\text{Sr}$  в зависимости от длительности взаимодействия с глинистым грунтом (а) и песком (б):  
 — водорастворимая, — обменная, — кислоторастворимая, — остаточная

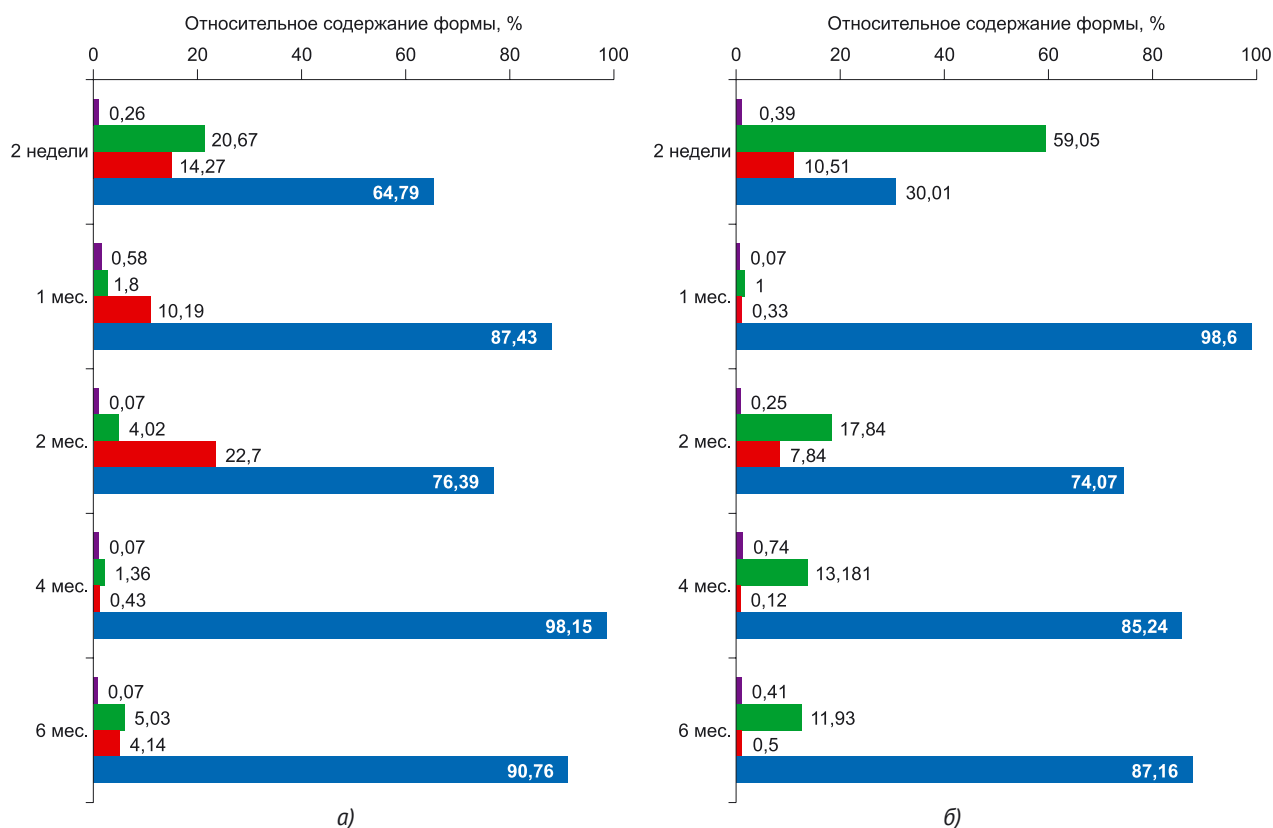


Рис. 3. Формы нахождения  $^{60}\text{Co}$  в зависимости от длительности взаимодействия с глинистым грунтом (а) и песком (б):  
 — водорастворимая, — обменная, — кислоторастворимая, — остаточная

длительность взаимодействия радионуклида с материалами не оказывает влияния на его переход в фиксированное состояние.

В работах [10, 17] показано, что содержание обменного стронция практически не зависит от времени взаимодействия его с грунтом. Как известно, стронций поглощается глинистыми минералами по механизму ионного обмена в межслоевом пространстве, постепенно замещая обменные катионы ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), до момента установления равновесия [18], чем, вероятно, и объясняется то, что величина сорбции почти не изменяется в последующий период.

В результате продолжительного взаимодействия с барьерными материалами значительная часть радионуклидов кобальта переходит из водорастворимой и обменной форм в фиксированную (рис. 3а, б).

Как отмечено в [19], кобальт активно поглощается глинистыми минералами и кислородными соединениями железа, которые являются составляющими рассматриваемых барьерных материалов. Поведение кобальта при сорбции, а в дальнейшем и миграция, будут определяться его формой (в виде иона или комплекса) [13, 20] в грунтовом растворе. В настоящих опытах по сорбции кобальт в модельных растворах находился в форме катиона.

Обнаружение радионуклидов в разных формах в материалах, используемых в качестве барьерных, свидетельствует о различной прочности их связи с твердой фазой, а следовательно, и скорости их миграции за пределы хранилища и в окружающей среде. Анализ результатов экспериментов показывает, что стронций, в сравнении с цезием и кобальтом в катионной форме, является более подвижным радионуклидом и его переход в фиксированные формы происходит постепенно в течение всего эксперимента. Перераспределение форм рассматриваемых радионуклидов в глинистом грунте происходит быстрее, чем в песке. При этом скорость перераспределения и доля фиксированных форм возрастает с течением времени в ряду  $\text{Sr} < \text{Co} < \text{Cs}$ .

Таким образом, в рассматриваемых материалах доминируют фиксированные формы цезия, кобальта и стронция, что говорит о прочных связях радионуклидов с минеральными компонентами глинистого грунта и песка. С течением времени прочность фиксации радионуклидов материалами будет увеличиваться, что способствует их локализации в пределах барьеров, а миграция радионуклидов — снижаться, что ранее подтверждено в отношении стронция и цезия расчетными данными [21].

В завершение можно сказать, что результаты настоящей и других работ по изучению поведения радионуклидов в природных средах целесообразно учитывать и принимать к сведению, например, при разработке защитных барьеров хранилищ РАО и оценке долговременной безопасности ПЗРО.

## Литература

1. IAEA-TECDOC-1260: Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste. Vienna: IAEA, 2001. 96 p.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности (НП-069-14)» / Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 июня 2014 г. № 249.
3. Павлоцкая Ф. И. Формы нахождения и миграция искусственных радионуклидов в почве. М.: Атомиздат. 1979. 215 с.
4. Минеев В. Г. Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах: Сборник научных статей под ред. В. Г. Минеева. — Москва, 1994.
5. Захарова Е. В., Дарская Е. Н., Каймин Е. П. и др. Влияние продолжительности контакта жидких радиоактивных отходов с породами, вмещающими подземные хранилища, на миграционную способность  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  // Радиохимия. 2003. Т. 45, № 3. С. 282—284.
6. Захарова Е. В., Каймин Е. П., Дарская Е. Н. и др. Роль физико-химических процессов при долговременном хранении жидких радиоактивных отходов в глубинных пластах-коллекторах // Радиохимия. 2001. Т. 43, № 4. С. 378—380.
7. Павлоцкая Ф. И., Новиков А. П., Горяченкова Т. А. и др. Формы нахождения радионуклидов в воде и донных отложениях промышленных водоемов ПО «Маяк» // Радиохимия. 1998. Т. 40, № 5. С. 462—467.
8. Сабодина М. Н., Захарова Е. В., Мироненко М. В., Меняйло А. А. Влияние временного фактора на противомиграционные свойства барьера на основе песчано-глинистых пород // Радиохимия. 2009. Т. 51, № 4. С. 372—374.
9. Varlakova G. A., Barinov A. S., Ostashkina E. E., Golubeva Z. I. Selection of Backfill materials for near surface repository for low and intermediate Level Waste // The 13th International Conference on the Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere. Migration'11. Beijing, China, September 18–23, 2011, Abstracts, P. 233—234.

10. *Баринов А. С., Варлакова Г. А., Старцева И. В., Голубева З. И., Бурлака О. А.* Распределение радионуклидов в грунте экспериментального приповерхностного хранилища остеклованных РАО СУА // Пятая Рос. конф. по радиохимии «Радиохимия-2006»: Тезисы докладов. Дубна 23–27 октября 2006 г. — Дубна: 2006. С. 289–290.
11. *Варлакова Г. А., Голубева З. И., Рощагина С. В., Осташкина Е. Е., Баринов А. С.* Разработка составов буферной засыпки для приповерхностного хранилища радиоактивных отходов // Шестая Рос. конф. по радиохимии «Радиохимия-2009»: Тезисы докладов. Москва, 12–16 октября 2009 г. Озерск: Маяк, 2009. С. 253–254.
12. *Павлоцкая Ф. И., Горяченкова Т. А., Мясоєдов Б. Ф.* Формы нахождения техногенного плутония в аэрозолях, горячих частицах и почвах // Радиохимия. 1997. Т. 39, № 5. С. 464–470.
13. *Varlakova G. A., Ostashkina E. E., Golubeva Z. I.* Evaluation of the Antimigration Properties of Materials for Buffer Filling of a Near-Surface Radioactive Waste repository // Radiochemistry. 2014. Vol. 56. № 1. P. 109–113.
14. *Ostashkina E. E., Golubeva Z. I., Varlakova G. A.* Characterization of Radionuclide Retaining Properties of Backfill Materials for Near Surface Repositories for Low and Intermediate Level Radioactive Wastes // Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVI: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2013. Vol. 1518. P. 217–223.
15. *Сабодина М. Н., Калмыков С. Н., Артемьева К. А., Захарова Е. В.* Закономерности поведения радионуклидов при использовании глинистых пород в качестве материала защитного барьера в хранилищах РАО // Пятая Рос. конф. по радиохимии «Радиохимия-2006»: Тезисы докладов. Дубна 23–27 октября 2006 г. — Дубна: 2006. С. 269.
16. *Кудельский А. В., Смит Дж. Т., Овсянникова С. В., Пашкевич В. И.* Миграция  $^{137}\text{Cs}$  в почвах зоны аэрации и уровни  $^{137}\text{Cs}$ -загрязнения подземных вод Беларуси // Геоэкология. 2004. № 3. С. 223–236.
17. Радиобиология / *Белов А. Д., Киришин В. А., Лысенко Н. П., Пак В. В. и др.* Под ред. А. Д. Белова. — М.: Колос, 1999, 384 с.
18. *Кобец С. А.* Сорбция Sr(II) на монтмориллоните с осажденными на его поверхности гидроксидными железа // 8-я Международная конференция «Сотрудничество для решения проблемы отходов» WasteECO-2011. Харьков, Украина, 23–24 февраля 2011 г. URL: <http://waste.ua/cooperation/2011/theses/index.html>.
19. *Горячев В. А., Исаева А. А., Соيفер В. Н.* Формы нахождения  $^{60}\text{Co}$  в верхнем слое донных отложений и во взвешенном веществе бухты Чажма // Радиохимия. 2008. Т. 50, № 4. С. 380–383.
20. *Серебряков Б. Е., Иванов Е. А., Шукин А. П.* Моделирование процесса переноса  $^{60}\text{Co}$  грунтовыми водами // Атомная энергия. 2006. Т. 100. вып. 3. С. 220–225.
21. *Баринов А. С., Варлакова Г. А., Сухова Ю. В. и др.* Контроль свойств остеклованных радиоактивных отходов низкой и средней активности из приповерхностного хранилища. Оценка безопасности приповерхностного хранилища. // Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров: Труды ГУП МосНПО «Радон»: Итоги научной деятельности за 2005 г., вып. 13. С. 48–52.

---

### Информация об авторах

*Варлакова Галина Андреевна*, кандидат технических наук, главный специалист, АО Высотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А.А.Бочвара (123098, Москва, ул. Рогова д. 5а), e-mail: varlakova@inbox.ru.

*Баринов Александр Сергеевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

### Библиографическое описание статьи

*Варлакова Г. А., Баринов А. С.* Формы нахождения радионуклидов в барьерных материалах хранилищ радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2019. № 4(9). С. 63–70. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-63-70.

## SPECIATION OF RADIONUCLIDES IN BARRIER MATERIALS OF RADIOACTIVE WASTE STORAGE FACILITIES

Varlakova G. A.<sup>1</sup>, Barinov A. S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC A.A.Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Nuclear Safety Research Institute of RAS, Moscow, Russia

Article received on November 7, 2019

The paper overviews the results of experiments performed to determine the speciation of cesium, cobalt and strontium in natural materials. Such materials are glaciolacustrine clay soils and sands considered as natural barriers in radioactive storage facilities. It was determined that changes in radionuclide speciation occur as the result of their continuous interaction with the barrier materials. Over time, fixed forms of cesium, cobalt and strontium radionuclides become predominant in the studied barrier materials.

**Keywords:** radioactive waste, radionuclides, speciation, barrier materials, interaction time, absorption.

### References

1. IAEA-TECDOC-1260: Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste. Vienna: IAEA, 2001. 96 p.
2. Federal norms and rules in the field of the use of atomic energy. NP-069-14. Pripoverhnostnoe zahoronenie radioaktivnyh othodov. Trebovaniya bezopasnosti. [Near-surface disposal of radioactive waste. Safety requirements].
3. Pavlockaya F. I. Formy nahozhdeniya i migratsiya iskusstvennyh radionuklidov v pochve [Speciment and migration of artificial radionuclides in soil]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 215 p.
4. Mineev V. G. Tyazhelye metally i radionuklidy v agroekosistemah [Heavy metals and radionuclides in agroecosystems]. Moscow, Agroekolas Publ., 1994.
5. Zakharova E. V., Darskaya E. N., Kaymin E. P. et al. Vliyanie prodolzhitel'nosti kontakta zhidkih radioaktivnyh othodov s porodami, vmeshchayushchimi podzemnye hranilishcha, na migracionnyu sposobnost' of <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239</sup>Pu i <sup>241</sup>Am [Influence of the duration of contact of liquid radioactive waste with rocks containing underground storage facilities on migration ability of <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239</sup>Pu and <sup>241</sup>Am]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2003, vol. 45, no. 3, pp. 282—284.
6. Zakharova E. V., Darskaya E. N., Kaymin E. P. et al. Rol' fiziko-himicheskikh processov pri dolgovremennom hranenii zhidkih radioaktivnyh othodov v glubinykh plastah-kollektorah [The role of physico-chemical processes in the long-term storage of liquid radioactive waste in deep reservoirs]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2001, vol. 43, no. 4, pp. 378—380.
7. Pavlockaya F. I., Novikov A. P., Goryachenkova T. A. et al. Formy nahozhdeniya radionuklidov v vode i donnyh otlozheniyah promyshlennykh vodoemov PO "Mayak" [Speciment of radionuclides in water and bottom sediments of industrial reservoirs of "Mayak"]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 1998, vol. 40, no. 5, pp. 462—467.
8. Sabodina M. N., Zakharova E. V., Mironenko M. V., Menyailo A. A. Influence of time factor on anti-migration properties of a barrier based on sand-clay rocks. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2009, vol. 51, no. 4, pp. 422—424.
9. Varlakova G. A., Barinov A. S., Ostashkina E. E., Golubeva Z. I. Selection of Backfill materials for near surface repository for low and intermediate Level Waste. *The 13th Intern. Conf. on the Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere*. Migration'11. Beijing, China, September 18—23, 2011, Abstracts, P. 233—234.
10. Barinov A. S., Varlakova G. A., Startseva I. V., Golubeva Z. I., Burlaka O. A. Raspredelenie radionuklidov v grunte eksperimental'nogo pripoverhnostnogo hranilishcha osteklovannykh RAO SUA [Distribution of radionuclides in the soil of the experimental near-surface storage of vitrified radioactive waste]. *Pyataya Ros. konf. po radiohimii "Radiohimiya—2006"* [Proc. 5th Russ. conf. "Radiochemistry—2006"]. Dubna, 23—27 October 2006, pp. 289—290.
11. Varlakova G. A., Golubeva Z. I., Roshagina S. V., Ostashkina E. E., Barinov A. S. Razrabotka sostavov bufernoj zasypki dlya pripoverhnostnogo hranilishcha radioaktivnyh othodov [Development of buffer backfill compositions for near-surface storage of radioactive waste]. *Shestaya Ros. konf. po radiohimii "Radiohimiya—2009"* [Proc. 6th Russ. Conf. "Radiochemistry—2009"]. Ozersk, 12—16 October, pp. 253—254.
12. Pavlockaya F. I., Goryachenkova T. A., Myasoev B. F. Formy nahozhdeniya tekhnogen'nogo plutoniya v aerolyah, goryachih chasticah i pochvah

[Speciment of technogenic plutonium in aerosols, hot particles, and soils]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 1997, vol. 39, no. 5, pp. 464—470.

13. Varlakova G. A., Ostashkina E. E., Golubeva Z. I. Evaluation of the Antimigration Properties of Materials for Buffer Filling of a Near-Surface Radioactive Waste repository. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2014, vol. 56, no. 1, pp. 109—113.

14. Ostashkina E. E., Golubeva Z. I., Varlakova G. A. Characterization of Radionuclide Retaining Properties of Backfill Materials for Near Surface Repositories for Low and Intermediate Level Radioactive Wastes. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVI: Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 2013. Vol. 1518, pp. 217—223.

15. Sabodina M. N., Kalmykov S. N., Artemieva K. A., Zakharova E. V. Zakonomernosti povedeniya radionuklidov pri ispol'zovanii glinistyh porod v kachestve materiala zashchitnogo bar'era v hranilishchah RAO [Patterns of behavior of radionuclides when using clay rocks as a material of a protective barrier in RW storage facilities]. *Pyataya Ros. konf. po radiohimii "Radiohimiya—2006"* [Proc. 5th Russ. conf. "Radiochemistry—2006"]. Dubna, 23—27 October 2006, pp. 269.

16. Kudelskiy A. V., Smit J. T., Ovsyannikova S. V., Pashkevich V. I. Migratsiya  $^{137}\text{Cs}$  v pochvah zony aeratsii i urovni  $^{137}\text{Cs}$ -zagryazneniya podzemnyh vod Belarusi [ $^{137}\text{Cs}$  migration in soils of the aeration zone and levels of  $^{137}\text{Cs}$ -pollution of groundwater in Belarus]. *Geoecologiya — Geoecology*, 2004, no. 3, pp. 223—236.

17. Belov A. D., Kirshin V. A., Lysenko N. P., Pak V. V. et al. Radiobiologiya [Radiobiology]. Moscow, Kolos Publ., 1999. 384 p.

18. Kobec S. A. Sorbtsiya Sr(II) na montmorillonite s osazhdennymi na ego poverhnosti gidroksidami zheleza [Sorption of Sr (II) on montmorillonite with iron hydroxides deposited on its surface]. *Vos'maya Mezhdunar. konf. "Sotrudnichestvo dlya resheniya problemy othodov" WasteECO-2011* [Proc. 8th Int. Conf. "Collaboration to solve the problem of waste" WasteECO-2011]. Ukraine, Kharkov, 23—24 February, 2011. Available at: <http://waste.ua/cooperation/2011/theses/index.html>.

19. Goryachev V. A., Isaeva A. A., Soyfer V. N. Formy nahozhdeniya  $^{60}\text{Co}$  v verhnem sloe donnyh otlozhenij i vo vzveshennom veshchestve buhty Chazhma [Speciment of  $^{60}\text{Co}$  in the upper layer of bottom sediments and in suspended matter of Chazhma Bay]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2008, vol. 50, no. 4, pp. 380—383.

20. Serebryakov B. E., Ivanov E. A., Shchukin A. P. Simulation of  $^{60}\text{Co}$  transport by ground waters. *Atomic energy*, 2006, vol. 100, no. 3, pp. 215—220.

21. Barinov A. S., Varlakova G. A., Sukhova Yu. V. et al. Kontrol' svoystv osteklovannyh radioaktivnyh othodov nizkoj i srednej aktivnosti iz pri-poverhnostnogo hranilishcha. Ocenka bezopasnosti pripoverhnostnogo hranilishcha [Control of the properties of vitrified radioactive waste of low and medium activity from a near-surface storage. Surface Storage Safety Assessment]. *Ohrana okruzhayushchej sredy i obrashchenie s radioaktivnymi othodami nauchno-promyshlennyh centrov — Environmental protection and radioactive waste management of scientific and industrial centers*, 2005, no. 13, pp. 48—52.

---

### Information about the authors

Varlakova Galina Andreevna, PhD, Main specialist, JCS "VNIINM" (5a, Rogova St., Moscow, 123098, Russia), e-mail: varlakova@inbox.ru.

Barinov Aleksandr Sergeevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulsckaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

### Bibliographic description

Varlakova G. A., Barinov A. S. Speciation of radionuclides in barrier materials of radioactive waste storages. *Radioactive waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 63—70. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-63-70. (In Russian).