

УДК 621.039.743

**Л. Н. Москальчук, А. А. Баклай, Т. Г. Леонтьева, Д. К. Стреленко**  
ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»  
Национальной академии наук Беларуси

### **СОРБЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ОСТРОЖАНСКОЕ» ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ**

Исследованы селективные сорбционные свойства образцов бентонитовой глины месторождения «Острожанское» Лельчицкого района Гомельской области. Проведено механическое обогащение отобранных образцов бентонитовой глины, определены параметры их селективной сорбции по отношению к радиоцезию. Сравнительный анализ сорбционных свойств природных и обогащенных образцов бентонитовой глины показал, что основным минералом, ответственным за селективную сорбцию  $^{137}\text{Cs}$ , является монтмориллонит. Установлено, что потенциал связывания радиоцезия RIP(K) обогащенных образцов бентонитовых глин в несколько раз превышает RIP(K) природных образцов и зависит от степени их дисперсности. Следовательно, в качестве сорбционных материалов, предназначенных для безопасного хранения и захоронения радиоактивных отходов, предпочтительно использовать обогащенные бентонитовые глины.

В качестве основного компонента сорбционных материалов использовался образец бентонитовой глины с наилучшими сорбционными характеристиками по отношению к  $^{137}\text{Cs}$ . Путем механического смешения бентонитовой глины и кварцевого формовочного песка в различных соотношениях получены образцы сорбционных материалов и определены их основные физико-химические характеристики и параметры селективной сорбции  $^{137}\text{Cs}$ . Установлено, что при увеличении содержания кварцевого формовочного песка от 5 до 25 мас. % в составе сорбционных материалов наблюдается снижение основных сорбционных показателей: потенциала связывания радиоцезия RIP(K) и емкости специфической сорбции FES. Для использования сорбционного материала в качестве инженерного барьера при хранении и захоронении радиоактивных отходов оптимальным является содержание кварцевого формовочного песка в количестве  $20 \pm 2,5$  мас. %.

**Ключевые слова:** бентонитовая глина, монтмориллонит, обогащение, сорбционный материал, инженерный барьер, селективная сорбция, потенциал связывания радиоцезия.

**L. N. Maskalchuk, A. A. Baklay, T. G. Leontieva, D. K. Stralenka**  
Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny  
of the National Academy of Sciences of Belarus

### **SORPTION MATERIALS BASED ON BENTONITE OF THE “OSTROZHANSKOYE” DEPOSIT FOR RADIOACTIVE WASTE SAFE MANAGEMENT**

Selective sorption properties of bentonite samples from the deposit "Ostrozhanskoye" Lelchitsy district, Gomel region were investigated. The selected bentonite samples were enriched, radiocaesium selective sorption parameters for given samples were determined. Comparative analysis of native and enriched bentonite samples sorption properties showed that the main mineral which is responsible for  $^{137}\text{Cs}$  selective sorption is montmorillonite. It was found that the Radiocaesium Interception Potential of the enriched bentonite samples exceeds RIP(K) of the native samples in several times and strongly depends on the clay dispersity. Therefore, it is preferable to use enriched bentonite as sorption materials for safe storage and disposal of radioactive waste.

The enriched bentonite sample with the best  $^{137}\text{Cs}$  selective sorption properties was used as the main component of the sorption materials. The sorbent samples were prepared by bentonite and quartz foundry sand mechanical mixing in various proportions. The main physicochemical characteristics and  $^{137}\text{Cs}$  selective sorption parameters for the obtained materials were determined. It was established that increase in quartz foundry sand fraction from 5 to 25 mass % causes a reduction of the main sorption characteristics of the sorption materials: the Radiocaesium Interception Potential (RIP(K)) and the Frayed Edge Sites capacity (FES). For use of the sorption materials as an engineering barrier for safe storage and disposal of radioactive waste the optimal containment of quartz foundry sand is  $20 \pm 2.5$  mass %.

**Key words:** bentonite, montmorillonite, enrichment, sorption materials, engineering barrier, selective sorption, the Radiocaesium Interception Potential.

**Введение.** Развитие атомной энергетики привело к накоплению значительного количества радиоактивных отходов (РАО), для переработки и захоронения которых необходима разработка эффективных и экологически безопасных методов. Общеизвестно, что единственным способом обращения с РАО является размещение их в геологических формациях. При этом необходимо создание многобарьерной системы защиты, которая должна предотвратить миграцию радионуклидов в среду обитания человека [1–4]. Важная роль в обеспечении радиационной безопасности принадлежит так называемым инженерным барьерам, состоящим из сорбционных материалов. Прямая непосредственно к контейнеру с отходами, буфер препятствует поступлению радионуклидов в подземные воды. Материалы для создания сорбционных барьеров должны обладать высокой сорбционной емкостью, низкой водопроницаемостью, достаточной теплопроводностью, термо- и радиационной устойчивостью. В зарубежных технологиях в качестве барьера предусмотрено использование в основном бентонитовых глин [5–8]. Бентонитовые глины являются тонкодисперсными материалами, обладают большой удельной поверхностью, имеющей нескомпенсированный отрицательный заряд, что определяет высокие катионообменные свойства материала [8, 9].

В настоящее время в Беларуси осуществляется строительство собственной АЭС. В связи с этим для решения проблемы безопасного захоронения радиоактивных отходов весьма актуальной задачей является поиск и обоснование возможности использования дешевых и эффективных сорбционных материалов на основе минерального сырья Республики Беларусь. Так для использования в качестве буферной засыпки или противомиграционного барьера предлагается использовать бентонитовую глину месторождения «Острожанское» Лельчицкого района Гомельской области [10].

Целью данной работы является изучение свойств сорбционных материалов на основе бентонитовой глины и кварцевого формовочного песка Республики Беларусь для использования при хранении и захоронении РАО.

**Основная часть.** Бентонитовая глина обладает рядом специфических свойств, обусловленных входящим в ее состав монтмориллонитом: хорошей пластичностью и набухаемостью, низкой водопроницаемостью, высокой ионообменной емкостью и сорбционной способностью по отношению к радионуклидам, стабильно-

стью свойств на протяжении длительного промежутка времени [7, 8].

Механические и физико-химические свойства бентонитовых глин месторождения «Острожанское» описаны в отчете Центральной лаборатории ПО «Белгеология» [11]. Согласно данным отчета, отбор проб производился по-слою по литологическим разновидностям глинистых пород с длиной интервала 2,0–2,5 м. Всего изучено 783 пробы. Установлено, что бентонитовые глины месторождения «Острожанское» состоят, в основном, из высоко- и среднелдисперсных фракций. Содержание низкодисперсных фракций, в том числе карбонатных включений, отмечено лишь в единичных пробах. Гранулометрический состав бентонитовых глин представлен в табл. 1 [11].

Таблица 1

**Гранулометрический состав бентонитовой глины месторождения «Острожанское»**

Размер фракции, мм	Содержание, %
< 0,001	26,3–84,3
0,001–0,01	32,7–98,4
0,01–0,05	0,4–19,6
> 0,05	0,002–1,0

Глинистая часть, определяющая основные свойства бентонитовых глин месторождения «Острожанское», представлена неупорядоченными смешанослойными минералами типа гидрослюда-монтмориллонита и монтмориллонита, также встречаются примеси каолинита и гидрослюда. Минералогический состав бентонитовых глин представлен в табл. 2 [11].

Таблица 2

**Минералогический состав бентонитовой глины месторождения «Острожанское»**

Наименование минеральной фазы	Содержание, %
Монтмориллонит	18,7–76,7
Гидрослюда-монтмориллонит	27,5–68,0
Каолинит	1,3–6,4
Гидрослюда	до 10,4
Кварц	10,6–38,6
Гетит-гематит	до 5,7
Полевой шпат	до 3,0
Кальцит	до 4,9
Сидерит	до 1,0
Рентгеноаморфные вещества	0–31,4

По данным отчета [11] бентонитовые глины месторождения «Острожанское» относятся к глинам с низким содержанием монтмориллонита

(30–50%). Химический состав бентонитовых глин представлен в основном оксидами  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ , незначительным количеством  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ . В обменном комплексе бентонитовых глин месторождения «Острожанское» преобладает сумма ионов кальция и магния, поэтому они классифицируются как щелочно-земельные кальциевые [11].

По механическим и физико-химическим свойствам бентонитовые глины месторождения «Острожанское» относятся к мало- и среднепрочным, средне- и малосвязующим с низкой и средней термоустойчивостью (табл. 3) [11].

Таблица 3

**Физико-механические и физико-химические свойства бентонитовой глины месторождения «Острожанское»**

Наименование показателя	Значение
рН	6,8–8,4
Емкость катионного обмена, мэкв/кг	269,2–1030,6
Показатель фильтрации, $\text{см}^3$	29–78
Коэффициент пластичности, ед.	0–0,5
Коллоидальность, %	27–46,6
Термическая устойчивость, ед.	0,3
Предел прочности при сжатии, $\text{кг} \cdot \text{с}/\text{см}^2$	0,71–1,3

Основным недостатком применения природного бентонита является незначительный отвод тепла, образующегося в результате продолжающегося радиоактивного распада РАО, и недостаточная механическая прочность, что может привести к разогреву складированного материала и нарушению целостности инженерного барьера. Данные недостатки можно устранить путем включения в состав сорбционных материалов кварцевого формовочного песка [3, 8, 9, 12].

При изготовлении сорбционных материалов на основе бентонитовых глин использовался кварцевый формовочный песок месторождения «Четверня» Жлобинского района Гомельской области, основные характеристики которого представлены в табл. 4 [13].

Таблица 4

**Физико-химические характеристики кварцевого формовочного песка**

Наименование показателя	Значение
Влажность песка, %, не более	4
Температура спекания, °С	1300–1350
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,244–0,279
Тепловая аккумуляция, $\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}/(\text{м}^2 \cdot \text{С})$	1260
Коэффициент фильтрации, м/сут.	0,5–4

**Объекты и методы исследований.** Объектами исследований являются образцы бентонитовых глин (БГ) месторождения «Острожанское» Лельчицкого района Гомельской области, а также изготовленные на их основе лабораторные образцы сорбционных материалов. Перечень образцов природных бентонитовых глин, предоставленных РУП «Научно-производственный центр по геологии», приведен в табл. 5.

Таблица 5

**Перечень образцов природных бентонитовых глин месторождения «Острожанское»**

Шифр образца	Наименование образца	Место отбора
БГ-1	Бентонитовая глина	Скважина № 1; проба № 15; инт. 25,5–28,5 м
БГ-2	Бентонитовая глина	Скважина № 23; проба № 1058; инт. 23,5–28,0 м
БГ-3	Бентонитовая глина, керн	Скважина № 4 Б
БГ-4	Бентопорошок	Скважина № 4 Б
БГ-5	Бентонитовая глина, керн	Скважина № 5 Б; инт. 34,0 м

Отобранные образцы бентонитовой глины перед проведением исследований высушивали в сушильном шкафу при температуре 40°C до постоянной массы, измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 0,63 мм. Обогащение образцов БГ с отбором фракции с размером менее 45 и 160 мкм проводили механическим способом с использованием шаровой мельницы Retch PM 100 и аналитической просеивающей машины Retch AS 200 basic.

На основании анализа данных [12] по физико-механическим и физико-химическим свойствам бентонит-кварцевых смесей различного состава установлено, что оптимальные значения таких показателей, как механическая прочность, теплопроводность и водопроницаемость, достигаются при содержании в них не более 25 мас. % кварцевого песка. В связи с этим для проведения исследований селективной сорбционной способности по отношению к  $^{137}\text{Cs}$  изготовили лабораторные образцы сорбционных материалов (СМ), состав которых представлен в табл. 6.

Для природных и обогащенных образцов бентонитовой глины, а также для полученных на их основе образцов сорбционных материалов физико-химические свойства определяли по стандартизированным методикам [14, 15].

Таблица 6  
Характеристика состава образцов сорбционных материалов

Шифр образца	Содержание, мас. %	
	БГ-4	Кварцевый формовочный песок
СМ-5	95	5
СМ-10	90	10
СМ-15	85	15
СМ-20	80	20
СМ-25	75	25

Селективная сорбция является основным процессом, определяющим поведение  $^{137}\text{Cs}$  в системе «минеральный сорбент – раствор». Механизмом селективной сорбции  $^{137}\text{Cs}$  является ионный обмен  $\text{Cs}^+$  на  $\text{K}^+$  и  $\text{NH}_4^+$  на селективных по отношению к цезию сорбционных местах FES (Frayed Edge Sites) в области клинообразных краев глинистых минералов. Доступ к этим местам больших гидратированных катионов типа кальция стерически невозможен. Поэтому для изучения селективной сорбции  $^{137}\text{Cs}$  обыкновенные ионообменные места RES (Regular Exchange Sites), расположенные на планарных поверхностях глинистых минералов, блокируют избытком хорошо сорбирующегося на этих местах катиона  $\text{Ca}^{2+}$  [16–18].

Основным параметром, используемым для оценки способности сорбентов к селективной сорбции, является потенциал связывания радиоцезия RIP(K) (Radiocaesium Interception Potential) – постоянная величина для определенного сорбента, характеризующая его способность селективно сорбировать  $^{137}\text{Cs}$ . Значимость RIP(K) определяется тем, что на его основе можно оценить величину коэффициента распределения  $^{137}\text{Cs}$  в системе «сорбент – раствор».

Потенциал связывания радиоцезия RIP(K) определяли на основании данных, полученных в результате изучения селективной сорбции  $^{137}\text{Cs}^+$  в присутствии конкурирующих катионов  $\text{K}^+$  на предварительно обработанных раствором  $\text{Ca}^{2+}$  образцах бентонитовой глины [19, 20]. Для определения селективной сорбционной емкости (FES) исследуемых образцов в отношении  $^{137}\text{Cs}$  использовали экспериментальный подход, основанный на измерении сорбции неактивного  $\text{Cs}^+$  в присутствии иона  $\text{Ca}^{2+}$  [19, 20]. Коэффициент селективности ионного обмена  $^{137}\text{Cs}^+$  по отношению к конкурирующему иону  $\text{K}^+$  ( $K_c(\text{Cs}^+/\text{K}^+)$ ) рассчитывали с использованием экспериментально полученных значений потенциала связывания радиоцезия RIP(K) и селективной сорбционной емкости FES.

Результаты определения селективных сорбционных свойств природных (п) и обогащенных (о) механическим способом образцов бентонитовых глин месторождения «Острожанское» представлены в табл. 7.

Таблица 7  
Параметры селективной сорбции  $^{137}\text{Cs}$  образцами бентонитовых глин

Шифр образца		RIP(K), мэкв/кг	FES, мэкв/кг	$K_c(\text{Cs}^+/\text{K}^+)$
БГ-1	п	548,4	11,6	33,9
	о	1126,2	21,6	37,0
БГ-2	п	678,3	13,8	34,4
	о	1335,2	23,3	38,4
БГ-3	п	691,5	14,2	35,2
	о	1397,8	24,2	39,2
БГ-4	п	1123,5	22,7	34,8
	о	1569,5	28,4	35,5
БГ-5	п	479,5	10,5	32,9
	о	922,8	18,5	34,3

Как видно из табл. 7, при повышении степени дисперсности образцов бентонитовых глин наблюдается увеличение значений таких параметров, как потенциал связывания радиоцезия RIP(K) и емкость селективной сорбции FES. Это связано с повышением доли монтмориллонита, ответственного за избирательную фиксацию радиоцезия, а также с увеличением общей площади сорбционной поверхности материала. Наилучшими сорбционными свойствами обладает обогащенный образец БГ-4, для которого параметры селективной сорбции по отношению к  $^{137}\text{Cs}$  составляют: RIP(K) = 1569,5 мэкв/кг, FES = 28,4 мэкв/кг,  $K_c(\text{Cs}^+/\text{K}^+) = 35,5$ . Данный образец использовался в качестве исходного компонента при изготовлении образцов сорбционных материалов.

Для образца БГ-4 с использованием растровой электронной микроскопии определены элементный состав и морфологическая структура. Анализ элементного состава показал, что, помимо алюмосиликатов типа монтмориллонита, в образце БГ-4 встречаются также такие минеральные фазы, как каолинит, кварц и др.

Морфологическая характеристика исследуемого образца бентонитовой глины представлена на рис. 1, на котором отчетливо видна его чешуйчатая тонкослоистая структура, характерная для слоистых алюмосиликатов типа иллита и монтмориллонита.

Для образца БГ-4 с размером фракции менее 45 мкм определены основные физико-химические и сорбционные характеристики. Установлено, что данный образец бентонитовой

глины имеет слабощелочную среду ( $\text{pH} = 7,9$ ), емкость катионного обмена (ЕКО) составляет 840 мэкв/кг, потенциал связывания радиоцезия  $\text{RIP}(\text{K}) = 7167,3$  мэкв/кг. При увеличении степени дисперсности образца БГ-4 от 630 до 45 мкм наблюдается повышение значения потенциала связывания радиоцезия  $\text{RIP}(\text{K})$  соответственно от 1123,5 до 7167,3 мэкв/кг, что, по-видимому, связано с увеличением доли активной составляющей – монтмориллонита, непосредственно влияющего на сорбцию  $^{137}\text{Cs}$ .

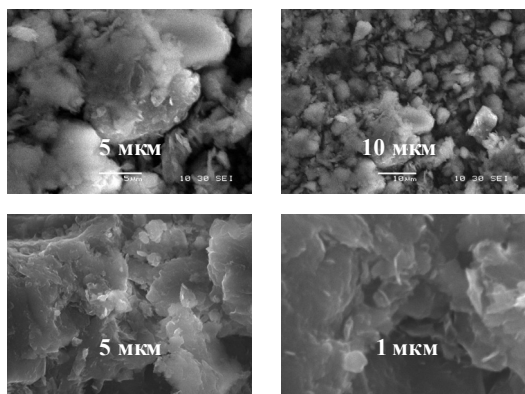


Рис. 1. Морфологическая характеристика образца БГ-4

В результате исследований физико-химических свойств изготовленных образцов сорбционных материалов установлено, что все образцы имеют слабощелочную среду ( $\text{pH} = 7,9$ ), при увеличении содержания кварцевого формовочного песка происходит снижение ЕКО от 760 мэкв/кг для СМ-5 до 470 мэкв/кг для СМ-25, что связано с уменьшением доли бентонитовой глины и, соответственно, активной составляющей (монтмориллонита).

Анализ экспериментальных данных по селективной сорбции  $^{137}\text{Cs}$  показал, что при увеличении содержания кварцевого формовочного песка в составе сорбционных материалов до 5 и 25 мас. % наблюдается снижение потенциала связывания радиоцезия  $\text{RIP}(\text{K})$  соответственно в 2,4 и 3,9 раза по сравнению с образцом БГ-4. Следовательно, при определении оптимального соотношения компонентов в сорбенте следует учитывать требования, предъявляемые к его сорбционным свойствам, и, в зависимости от этого, регулировать состав.

Для подстилающих или покрывающих экранов пунктов захоронения РАО в первую очередь важны такие свойства, как механическая прочность, низкая теплопроводность и влагонепроницаемость [4]. Требования, предъявляемые к сорбционным свойствам инженерных барьеров данного типа, достаточно низкие, так как большая часть радиоактивных веществ

фиксируется внутренними противомиграционными барьерами. Таким образом, для создания подстилающих или покрывающих экранов можно использовать сорбционные материалы, содержащие до 50 мас. % кварцевого формовочного песка.

При использовании сорбционного материала в качестве противомиграционного барьера недопустимо значительное снижение значений показателей селективной сорбции, также как и основных физико-механических показателей. Анализ имеющихся данных по механическим и физико-химическим свойствам бентонит-кварцевых смесей [12] и результатов собственных исследований селективной сорбции  $^{137}\text{Cs}$  изготовленными образцами сорбционных материалов, свидетельствует о том, что наиболее оптимальным является содержание  $20 \pm 2,5$  мас. % кварцевого формовочного песка, при котором все основные характеристики материала (механическая прочность, водопроницаемость, теплопроводность, потенциал связывания радиоцезия  $\text{RIP}(\text{K})$ ) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к противомиграционным барьерам [4].

**Заключение.** Механическое обогащение бентонитовой глины повышает содержание активной составляющей – монтмориллонита, влияющего на селективную сорбцию  $^{137}\text{Cs}$ . Это значительно увеличивает способность глин избирательно фиксировать радиоцезий: потенциал связывания радиоцезия  $\text{RIP}(\text{K})$  обогащенного образца БГ-4 увеличивается в 6,4 раза по сравнению с природным образцом.

Анализ литературных данных по механическим и физико-химическим свойствам бентонит-кварцевых смесей [12] и собственных экспериментальных данных позволил определить оптимальный состав сорбционного материала для применения в качестве противомиграционного барьера при хранении и захоронении РАО:  $80 \pm 2,5$  мас. % БГ-4 и  $20 \pm 2,5$  мас. % кварцевого формовочного песка.

Учитывая большие промышленные запасы бентонитовой глины месторождения «Острожанское» Республики Беларусь (12,3 млн т), возможность улучшения ее технико-экономических показателей и сорбционных свойств, предлагаемый сорбционный материал следует рассматривать как перспективный для применения в качестве инженерного барьера при хранении и захоронении РАО.

Вопрос практического применения бентонитовых глин месторождения «Острожанское» для обеспечения в Республике Беларусь безопасного обращения с РАО требует дальнейшего изучения.

### Литература

1. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами: серия учебных курсов № 27. Вена: МАГАТЭ, 2005. 230 с.
2. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности: нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности: утв. постановлением МЧС Респ. Беларусь 20.01.2012. № 7. Минск, 2012. 18 с.
3. Малеки Фарсани А., Скачек М. А. К оценке выхода радионуклидов из глубинного захоронения // Вестник МЭИ. 2009. № 3. С. 17–29.
4. ГОСТ Р 52037–2003. Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования. Москва, 2003. 22 с.
5. Василенко В. А. Обращение с радиоактивными отходами в России и странах с развитой атомной энергетикой: сб. науч. ст. СПб.: ООО НИЦ «Моринтех», 2005. 304 с.
6. Сабодина М. Н., Калмыков С. Н., Артемьева К. А., Захарова Е. В., Сапожников Ю. А. Поведение Cs, Np(V), Pu(IV), U(VI) в поровых водах бентонита // Радиохимия. 2006. Т. 48. № 5. С. 437–441.
7. Muurinen A., Lehtikoinen J. Porewater chemistry in compacted bentonite // Engineering Geology. 1999. Vol. 54. № 1–2. P. 207–241.
8. Савченко В. А. Разработка и применение технических грунтов для приповерхностного хранения радиоактивных отходов // Атомная техника за рубежом. 2004. № 7. С. 3–14.
9. Ковалев В. П., Мельгунов С. В., Пузанков Ю. М., Раевский В. П. Предотвращение неуправляемого распространения радионуклидов в окружающую среду. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1996. 163 с.
10. Описание объекта концессии. Месторождение бентонитовых глин «Острожанское» // РУП Науч.-произв. центр по геологии [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: [http://geology.org.by/images/docs/koncessiya\\_ostrozhanskoye.pdf](http://geology.org.by/images/docs/koncessiya_ostrozhanskoye.pdf). Дата доступа: 12.02.2015.
11. Отчет по детальной разведке Острожанского месторождения глин Лельчицкого района Гомельской области РБ с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.1997 г.: отчет о НИР (заключ.) / Произв. объедин. геологоразв. раб. «Белгеология»; рук. темы П. З. Хомич. 1997. 576 с. № ГР 6-94-1/1.
12. Обливанцев Д. Ю. Оптимизация состава бентонит-кварцевых смесей, используемых в качестве защитных барьеров приповерхностных хранилищ низко- и среднерadioактивных отходов: автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 2007. 23 с.
13. Лаборатория. Анализ формовочного песка // ОАО «Жлобинский карьер формовочных материалов» [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.karer.by/laboratory.html>. Дата доступа: 12.02.2015.
14. ГОСТ 26423–85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. Минск, 2015. 12 с.
15. ГОСТ 17.4.4.01–84. Охрана природы. Почвы. Методы определения емкости катионного обмена. Минск, 2014. 12 с.
16. Круглов С. В., Анисимов В. С., Анисимова Л. Н., Алексахин Р. М. Показатели специфической сорбционной способности почв и минеральных сорбентов в отношении  $^{137}\text{Cs}$  // Почвоведение. 2008. № 6. С. 693–703.
17. Степина И. А., Попов В. Е. Зависимость обменной доли селективно сорбированного  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и природных сорбентах от концентрации  $\text{K}^+$  и  $\text{NH}_4^+$  // Почвоведение. 2011. № 6. С. 713–718.
18. Везенцев А. И., Королькова С. В., Воловичева Н. А. Физико-химические характеристики природной и модифицированной глины месторождения «Поляна» Белгородской области // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. № 5. С. 790–795.
19. Коноплев А. В., Коноплева И. В. Определение характеристик равновесной селективной сорбции радиоцезия почвами и донными отложениями // Геохимия. 1999. № 2. С. 207–214.
20. Попов В. Е., Ильичева Н. С., Степина И. А., Маслова К. М. Влияние концентрации ионов калия и аммония на селективную сорбцию  $^{137}\text{Cs}$  иллитом и клиноптилолитом // Радиохимия. 2011. № 1. С. 86–90.

### References

1. *Tekhnologicheskie i organizatsionnye aspekty obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami: seriya uchebnykh kursov № 27* [Technological and organizational aspects of radioactive waste management: training courses series no. 27]. Vienna, IAEA Publ., 2005. 230 p.

2. *Zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti: normy i pravila po obespecheniyu yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti: utv. postanovleniem MChS Resp. Belarus' 20.01.2012. № 7* [Disposal of Radioactive Waste. Principles, criteria and basic safety requirements: The rules and regulations to ensure nuclear and radiation safety: approved by the Resolution of Ministry of Emergency, Republic of Belarus, 20.01.2012, no. 7]. Minsk, MChS Publ., 2012. 18 p.
3. Maleki Farsani A., Skachek M. A. Assessment of radionuclide release from deep burial. *Vestnik MEI* [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute], 2009, no. 3, pp. 17–29 (in Russian).
4. GOST P 52037–2003. Near-surface burial for radioactive waste disposal. General requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 22 p. (in Russian).
5. Vasilenko V. A. *Obrashchenie s radioaktivnymi otkhodami v Rossii i stranakh s razvitoy atomnoy energetikoy: sbornik nauchnykh statey* [Radioactive waste management in Russia and in the countries with developed nuclear power engineering: scientific articles collection]. Saint Petersburg, OOO NITs «Morintekh» Publ., 2005. 304 p.
6. Sabodina M. N., Kalmykov S.N., Artem'eva K.A., Zakharova E.V., Sapozhnikov Yu.A. Behavior of Cs, Np (V), Pu (IV), U (VI) in bentonite pore waters. *Radiokhimiya* [Radiochemistry], 2006, no. 5, pp. 437–441 (in Russian).
7. Muurinen A., Lehtikoinen J. Porewater chemistry in compacted bentonite. *Engineering Geology*, 1999, vol. 54, no. 1–2, pp. 207–241.
8. Savchenko V. A. Development and application of technical grounds for near surface radioactive waste storage. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear machinery abroad], 2004, no. 7, pp. 3–14 (in Russian).
9. Kovalev V. P., Mel'gunov S. V., Puzankov Yu. M., Raevskiy V. P. *Predotvrashchenie nepravlyayemogo rasprostraneniya radionuklidov v okruzhayushchuyu sredu* [Prevention of radionuclides uncontrolled transmission into the environment]. Novosibirsk, SO RAN NITs OIGGM Publ., 1996. 163 p.
10. *Opisanie ob'ekta kontsessii. Mestorozhdenie bentonitovykh glin «Ostrozhanskoye»* [A concession object description. Bentonite clay deposit "Ostrozhanskoye"]. Available at: [http://geology.org.by/images/docs/koncessiya\\_ostrozhanskoye.pdf](http://geology.org.by/images/docs/koncessiya_ostrozhanskoye.pdf). (accessed 12.02.2015).
11. *Zaklyuchitel'nyy otchet po detal'noy razvedke Ostrozhanskogo mestorozhdeniya glin Lel'chitskogo rayona Gomel'skoy oblasti RB s podschetom zapasov po sostoyaniyu na 01.01.1997 g.: otchet o NIR* [Final report of the detailed exploration of clay deposit "Ostrozhanskoye", Lelchitsa, Gomel region of Belarus, with the estimated reserves as of 01.01.1997: research report]. Minsk, 1997. 576 p.
12. Oblivantsev D. Y. *Optimizatsiya sostava bentonit-kvartsevykh smesey, ispol'zuemykh v kachestve zashchitnykh bar'erov pripoverkhnostnykh khranilishch nizko- i sredneradioaktivnykh otkhodov: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Optimization of bentonite-quartz compositions used as protective barriers in near surface repositories of low- and medium- level radioactive waste waste. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Moscow, 2007. 23 p.
13. *Laboratoriya. Analiz formovochnogo peska* [Laboratory. Analysis of foundry sand]. Available at: <http://www.karer.by/laboratory.html>. (accessed 12.02.2015).
14. GOST 26423–85. Soil. Methods for conductivity, pH and solid residue of aqueous extract determination. Minsk, Standartinform Publ., 2015. 12 p. (in Russian).
15. GOST 17.4.4.01–84. The Nature Conservancy. Soil. Methods for cation exchange capacity determination. Minsk, Standartinform Publ., 2014. 12 p. (in Russian).
16. Kruglov S. V., Anisimov V. S., Anisimova L. N., Aleksakhin R. M. Indicators of specific sorption capacity of soils and mineral sorbents in relation to  $^{137}\text{Cs}$ . *Pochvovedenie* [Pedology], 2008, no. 6, pp. 693–703 (in Russian).
17. Stepina I. A., Popov V. E. Dependence of exchange part of selectively adsorbed on soils and natural sorbents  $^{137}\text{Cs}$  on  $\text{K}^+$  and  $\text{NH}_4^+$  concentration. *Pochvovedenie* [Pedology], 2011, no. 6, pp. 713–718 (in Russian).
18. Vezentsev A. I., Korol'kova S. V., Volovicheva N. A. Physico-chemical characteristics of natural and modified clays from the deposit «Polyana», Belgorod Region. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2008, no. 5, pp. 790–795 (in Russian).
19. Konoplev A. V., Konopleva I. V. Determination of characteristics of equilibrium selective sorption of radiocaesium by soils and sediments. *Geokhimiya* [Geochemistry], 1992, no. 2, pp. 207–214 (in Russian).
20. Popov V. E., Il'icheva N. S., Stepina I. A., Maslova K. M. Influence of potassium and ammonium ions concentration on  $^{137}\text{Cs}$  selective sorption by illite and clinoptilolite. *Radiokhimiya* [Radiochemistry], 2011, no. 1, pp. 86–90 (in Russian).

### Информация об авторах

**Москальчук Леонид Николаевич** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий лабораторией. ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: L.Maskalchuk@sosny.bas-net.by, leonmosk@tut.by

**Баклай Анатолий Анатольевич** – старший научный сотрудник. ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: rptl@sosny.bas-net.by

**Леонтьева Татьяна Геннадьевна** – старший научный сотрудник. ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: t.leontieva@tut.by

**Стреленко Дарья Константиновна** – младший научный сотрудник. ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: 363378@inbox.ru

### Information about the authors

**Maskalchuk Leonid Nikolaevich** – Ph. D. Agriculture, associate professor, head of the Remediation Techno Polluted Territories Laboratory. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Academician A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: L.Maskalchuk@sosny.bas-net.by, leonmosk@tut.by

**Baklay Anatoliy Anatol'yevich** – senior researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Academician A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rptl@sosny.bas-net.by

**Leontieva Tat'yana Gennad'yevna** – senior researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Academician A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: t.leontieva@tut.by

**Stralenka Dar'ya Konstantinovna** – junior researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Academician A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 363378@inbox.ru

*Поступила 24.02.2015*