

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

## ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-79-88>  
УДК 544.723;544.58;621.039.736



Оригинальная статья

А. А. Баклай, Т. Г. Леонтьева\*, Н. А. Маковская, А. С. Онищук

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –  
Сосны Национальной академии наук Беларуси, а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь*

### ВЛИЯНИЕ МОДЕЛЬНОГО МИНЕРАЛИЗОВАННОГО РАСТВОРА НА ДИФФУЗИЮ $^{137}\text{Cs}$ И $^{85}\text{Sr}$ В ГЛИНЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «МАРКОВСКОЕ» ПРИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ ПУНКТЕ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Аннотация.** Методом прямой диффузии изучена миграция радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в образце глины месторождения «Марковское» Гомельской области (сухая плотность  $1400 \text{ кг/м}^3$ ) в зависимости от минерализации порового раствора. Образцы глины увлажняли путем добавления дистиллированной воды и модельного минерализованного раствора. Данный минерализованный раствор моделировал химический состав поровой воды образца глины в случае проникновения атмосферных осадков в пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и их последовательного прохождения через материалы физических барьеров: бетон – Na-бентонит (буферная засыпка) – бетон. По результатам экспериментов определены значения кажущихся коэффициентов диффузии ( $D_a$ )  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в образце глины, которые составили: для дистиллированной воды –  $(1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  для  $^{137}\text{Cs}$  и  $(3,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$  для  $^{85}\text{Sr}$ ; для минерализованного раствора –  $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  для  $^{137}\text{Cs}$  и  $(6,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$  для  $^{85}\text{Sr}$ . Установлено, что с увеличением минерализации порового раствора образца глины среднее значение  $D_a$   $^{85}\text{Sr}$  возрастает в 1,7 раза, а среднее значение  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$  не изменяется в пределах погрешности экспериментов. Влияние минерализации влаги на изменение диффузии  $^{85}\text{Sr}$  в глине необходимо учитывать при ее использовании в составе подстилающего экрана пункта захоронения низко- и среднеактивных отходов АЭС, так как это будет способствовать увеличению вероятности миграции стронция за его пределы. Необходимо предусмотреть технологические решения, позволяющие ограничить или снизить доступ влаги в ПЗРО, а также увеличить время диффузии в глине посредством увеличения толщины подстилающего экрана. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что глина месторождения «Марковское» Гомельской области перспективна для использования в составе подстилающего экрана при строительстве ПЗРО.

**Ключевые слова:** глина, монтмориллонит, сорбция, диффузия, цезий, стронций, модельный минерализованный раствор, пункт захоронения радиоактивных отходов

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** Баклай Анатолий Анатольевич – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси, e-mail: a.baklay@tut.by; Леонтьева Татьяна Геннадьевна – заведующий лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны, e-mail: leontieva@sosny.bas-net.by; Маковская Наталья Александровна – кандидат биологических наук, доцент, ученый секретарь Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси, e-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by; Онищук Анна Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси, e-mail: hannaonis@gmail.com

**Вклад авторов:** Баклай Анатолий Анатольевич – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), создание модели исследования, планирование исследований по изучению диффузии

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

$^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  глинами, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$ , применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования; *Леонтьева Татьяна Геннадьевна* – анализ и обобщение литературных данных, пробоподготовка образцов глин, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$ , обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования, формулировка выводов, работа с графическим материалом, критический пересмотр текста рукописи, редактирование текста рукописи; *Маковская Наталья Александровна* – разработка методологии исследования, участие в исследованиях по изучению диффузии  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  глинами, проведение сравнительного анализа, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи, редактирование текста рукописи; *Онищук Анна Сергеевна* – пробоподготовка образцов глин, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$ , редактирование текста рукописи.

**Для цитирования:** Влияние модельного минерализованного раствора на диффузию  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в глине месторождения «Марковское» при ее использовании в приповерхностном пункте захоронения радиоактивных отходов / А. А. Баклай, Т. Г. Леонтьева, Н. А. Маковская, А. С. Онищук // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 1. – С. 79–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-79-88>

Поступила в редакцию: 06.03.2025

Доработанный вариант: 18.11.2025

Утверждена к публикации: 05.03.2026

Подписана в печать: 12.03.2026

### Original article

**Anatoly A. Baklay, Tatiana G. Leontieva\*, Natalia A. Makovskaya, Anna S. Onischuk**

*The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National of the Academy of Sciences of Belarus,  
PO Box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus*

#### THE EFFECT OF MODEL MINERALIZED SOLUTION ON DIFFUSION OF $^{137}\text{Cs}$ AND $^{85}\text{Sr}$ IN THE CLAY FROM “MARKOVSKOE” DEPOSIT WHEN USED IN NEAR-SURFACE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

**Abstract.** The migration of radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in a compacted clay sample from the “Markovskoye” deposit of the Gomel region depending on the mineralization of its pore solution has been studied by the in-diffusion method. Distilled water and model mineralized solution were added to clay; the mineralized solution was modeling the chemical composition of pore water of the clay sample in case of atmospheric precipitation permeation into the radioactive waste disposal site and its consecutive passage through the materials of the physical barriers: concrete – Na-bentonite – concrete. The apparent diffusion coefficients ( $D_a$ ) of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the clay sample were determined by the results of experiments:  $(1.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  for  $^{137}\text{Cs}$  and  $(3.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  for  $^{85}\text{Sr}$  in distilled water,  $(1.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  for  $^{137}\text{Cs}$  and  $(6.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  for  $^{85}\text{Sr}$  in mineralized solution. It was found that with increasing mineralization of the pore solution of the clay sample  $D_a$   $^{90}\text{Sr}$  increases by 1,7 times, and  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$  does not change within the limits of the error of the experiments. This change of  $^{90}\text{Sr}$  diffusion coefficient in clay should be taken into account in case of its use as a part of the underlying screen of the disposal site of low- and medium-active waste of NPP, as it will increase the probability of  $^{90}\text{Sr}$  migration beyond its limits. There is a necessity to come up with technological solutions to prevent or decrease water permeation into the radioactive waste disposal as well as increase the diffusion time by raising the thickness of the clay barrier. The results of the experiments in this study confirm that clay from the “Markovskoye” deposit of the Gomel region is promising for use as a compacted clay barrier in the radioactive waste disposal facility.

**Keywords:** clay, montmorillonite, sorption, diffusion, cesium, strontium, model mineralized solution, radioactive waste disposal facility

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Anatoly A. Baklay* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: [a.baklay@tut.by](mailto:a.baklay@tut.by); *Tatiana G. Leontieva* – Head of the Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: [leontieva@sosny.bas-net.by](mailto:leontieva@sosny.bas-net.by); *Natalia A. Makovskaya* – Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Scientific Secretary at The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: [nata.mak@sosny.bas-net.by](mailto:nata.mak@sosny.bas-net.by); *Anna S. Onischuk* – Junior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: [hannaonis@gmail.com](mailto:hannaonis@gmail.com)

**Contribution of the authors:** *Anatoly A. Baklay* – designing the concept of the study (posing the idea and goals of the study), creating the model of the study, planning the investigation of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  diffusion in clays, carrying out the practical experiments and measurements of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  activity in solutions, implementation of statistical and mathematical methods to analyze the results of the experiments, summarizing the results of the study, interpreting the results of the study; *Tatiana G. Leontieva* – analysis and summarizing of literature, clay sample preparation, carrying out the practical experiments

and measurements of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  activity in solutions, summarizing the results of the study, interpreting the results of the study, conclusion formulation, creating graphs and illustrations, critical analysis of the manuscript, editing the manuscript; *Natalia A. Makovskaya* – creating the model of the study, participation in investigating  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  diffusion in clays, conducting the comparative analysis, conclusion formulation, critical analysis of the manuscript, editing the manuscript; *Anna S. Onischuk* – clay sample preparation, carrying out the practical experiments and measurements of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  activity in solutions, editing the manuscript.

**For citation:** Baklay A. A., Leontieva T. G., Makovskaya N. A., Onischuk A. S. The effect of model mineralized solution on diffusion of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  in the clay from “Markovskoe” deposit when used in near-surface radioactive waste disposal. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 1, pp. 79–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-79-88>

Received: 06.03.2025

Modified: 18.11.2025

Approved for publication: 05.03.2026

Signed to the press: 12.03.2026

**Введение.** В практике обращения с радиоактивными отходами диффузионным и сорбционным процессам, связанным с миграционным поведением радионуклидов в окружающей среде, уделяется значительное внимание [1; 2]. Это связано как с выявлением особенностей распространения радионуклидов в окружающей среде при различных авариях на предприятиях ядерного топливного цикла [3], так и с необходимостью создания физических барьеров для удержания радионуклидов в местах захоронения радиоактивных отходов (РАО) [4]. Низко- и среднеактивные радиоактивные отходы, образующиеся на АЭС, подлежат захоронению в приповерхностном пункте захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) [5]. Поэтому особую актуальность приобретает проблема долговременного и безопасного захоронения РАО. На практике решение данной проблемы связано с использованием многобарьерной защитной системы, основной функцией которой является предотвращение или значительное снижение выхода радионуклидов в окружающую среду [6].

К элементам системы физических барьеров безопасности ПЗРО относятся буферная засыпка, подстилающий и покрывающий экраны [7]. Для создания подстилающего экрана используют глину, которую уплотняют до такой степени, чтобы значение коэффициента фильтрации составляло не более  $10^{-5}$  м/сут, что позволяет создать условия, при которых миграция радионуклидов в глине в случае попадания воды в ПЗРО возможна только посредством диффузии [8; 9]. Ранее установлено [9], что коэффициент фильтрации в образце глины месторождения «Марковское» при ее сухой плотности  $1380 \text{ кг/м}^3$  составляет  $9,0 \cdot 10^{-6}$  м/сут. Продолжение изучения миграции радионуклидов в уплотненных глинах необходимо для определения коэффициента диффузии радионуклидов и последующего обоснования долговременного прогноза последствий захоронения РАО в ПЗРО [10].

Анализ данных [11; 12] показал, что диффузия любого радионуклида через слой глины может быть охарактеризована как кажущимся коэффициентом диффузии ( $D_a$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ), который учитывает эффект замедления радионуклида за счет сорбции на глине, так и эффективным коэффициентом диффузии ( $D_e$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ), который не учитывает это замедление. Для получения значения  $D_e$  необходимо установление стационарной диффузии радионуклида в системе глина – поровый раствор, что приводит к большой длительности экспериментов для сильносорбирующихся радионуклидов, в частности  $^{137}\text{Cs}$  [11]. Для определения значения  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$  или  $^{90}\text{Sr}$  в глинах используется метод прямой диффузии, в соответствии с которым в слоях глины регистрируется изменение концентрации радионуклида от времени в зависимости от продолжительности эксперимента [12].

Влага может проникать в ПЗРО с атмосферными осадками из-за потери покрывающим экраном противодиффузионных свойств [13]. При взаимодействии поверхностных вод с бетоном (конструкция ПЗРО) и Na-бентонитом (буферная засыпка) происходит увеличение pH и содержания катионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  в поровой влаге [14]. Это может отрицательно повлиять на противодиффузионные свойства глины в составе подстилающего экрана приповерхностного ПЗРО, увеличивая диффузию радионуклидов.

Согласно результатам исследования [14], образец глины месторождения «Марковское» (Гомельская область) обладает наилучшими сорбционными свойствами по отношению к  $^{137}\text{Cs}$  среди образцов глин из семи белорусских месторождений. Для дальнейшего изучения влияния мине-

рализованной поровой влаги на диффузионные свойства глины по отношению к радионуклидам цезия и стронция использовался образец глины указанного месторождения. Согласно работе [15], глины имеют различный минеральный состав, от которого зависят их фильтрационные, сорбционные и диффузионные свойства.

*Цель данной работы* – исследование диффузии  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в глине месторождения «Марковское» путем моделирования условий приповерхностного захоронения радиоактивных отходов.

**Материалы и методы исследования.** Для анализа диффузионных свойств использовали образец глины, отобранный в 2020 г. из промышленно разрабатываемого карьера месторождения «Марковское». Минеральный состав образца глины определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Ultima-N (Rigaku, Япония) с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения: диапазон съемки  $2\theta$  ( $2$ – $70^\circ$ ), шаг  $0,01$ – $0,02^\circ$ , время накопления сигнала – не менее  $0,3$  с на точку. Анализ результатов проводился согласно рекомендациям, описанным в [16; 17]. Количественный минеральный анализ осуществляли методом Ритвельда в программном пакете PROFEX GUI для BGMN (<http://www.bgm.de>) [17]. По результатам исследований установлен минеральный состав образца глины месторождения «Марковское» (далее – ГМ), мас.‰: монтмориллонит –  $39,6$ , иллит –  $4,0$ , каолинит –  $12,7$ , кварц –  $34,3$ , микроклин –  $6,3$ , альбит –  $2,3$  и анатаз –  $0,8$ .

Изучение миграции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в образце ГМ проводили методом прямой диффузии в соответствии с методикой [12]. Для этого использовали диффузионные ячейки из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $47$  мм (рис. 1).

Основными дозообразующими радионуклидами, вносящими вклад в активность низко- и среднеактивных РАО, являются  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  [5]. Для изучения диффузионных свойств образца глины по отношению к цезию и стронцию в данной работе использовали радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  (период полураспада  $T_{1/2} = 30,2$  года) и  $^{85}\text{Sr}$  ( $T_{1/2} = 64,85$  сут) соответственно. Применение  $^{85}\text{Sr}$  связано с тем, что по химическим свойствам он является аналогом  $^{90}\text{Sr}$ , однако выступает гамма-излучателем, что позволяет упростить (отсутствует необходимость выдержки растворов в течение определенного времени по сравнению со  $^{90}\text{Sr}$ ) и повысить точность измерений.

В экспериментах по изучению прямой диффузии  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{85}\text{Sr}$  в образце глины использовали два типа растворов:

- 1) дистиллированную воду, имитирующую атмосферные осадки;
- 2) модельную минерализованную поровую влагу (далее – модельный минерализованный раствор, ММР), моделирующую химический состав поровой воды образца глины в случае проникновения атмосферных осадков в пункт захоронения радиоактивных отходов и их последовательного прохождения через материалы физических барьеров: бетон – Na-бентонит – бетон, полученную по методике, приведенной в работе [14].

В табл. 1 приведен катионный и анионный составы модельного минерализованного раствора с  $\text{pH } 7,8 \pm 0,2$ .

Перед началом экспериментов образец глины высушивали при температуре  $105 \pm 5$  °С до постоянной массы, измельчали в ступке и просеивали через сито с размером ячеек  $1$  мм. Из полученного порошка глины отбирали навеску массой  $90$  г, увлажняли водой или ММР согласно методике, приведенной в [12], и оставляли на  $24$  ч для взаимодействия. По истечении

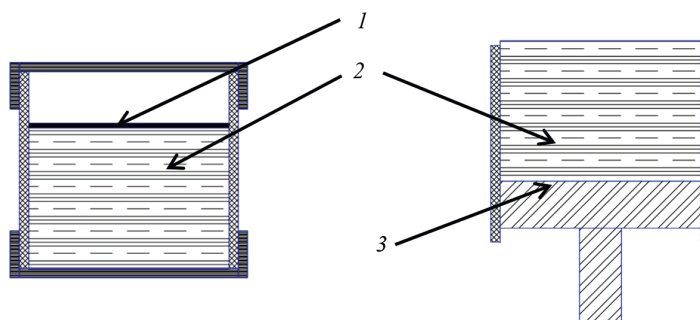


Рис. 1. Схема диффузионной ячейки: 1 – плоский источник; 2 – глина; 3 – поршень  
Fig. 1. Schematic diagram of the diffusion cell: 1 – flat source; 2 – clay; 3 – piston

указанного времени навеску увлажненной глины небольшими порциями закладывали в ячейку (см. рис. 1, слева) и уплотняли до значения плотности  $1400 \text{ кг/м}^3$ . Толщина уплотненного образца глины составляла 30 мм, диаметр – 47 мм. Затем на верхнее основание образца глины помещали диск из фильтровальной бумаги (далее – плоский источник), пропитанный раствором  $^{137}\text{Cs}$  в количестве  $10^{-8}$  моль (соответствует активности  $4,4 \cdot 10^6$  Бк) или  $^{85}\text{Sr}$  в количестве  $10^{-10}$  моль (соответствует активности  $7,4 \cdot 10^6$  Бк), и герметизировали ячейку крышкой.

Таблица 1. Состав модельного минерализованного раствора  
 Table 1. Composition of the model mineralized solution

Катионный состав Cationic composition	Содержание в растворе, мг/дм <sup>3</sup> Content in solution, mg/dm <sup>3</sup>	Анионный состав Anionic composition	Содержание в растворе, мг/дм <sup>3</sup> Content in solution, mg/dm <sup>3</sup>
[Na <sup>+</sup> ]	243,4	[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	2,1
[K <sup>+</sup> ]	13,5	[Cl <sup>-</sup> ]	240,3
[Ca <sup>2+</sup> ]	95,3	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	299,1
[Mg <sup>2+</sup> ]	1,5	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	103,7

По истечении времени контакта образца глины с плоским источником (70 сут для  $^{137}\text{Cs}$  и 10 сут для  $^{85}\text{Sr}$ ) ячейку разбирали, с торцов снимали крышки и устанавливали винтовой поршень. С его помощью постепенно выдавливали образец глины из ячейки (см. рис. 1, справа), делая срезы на слои толщиной ~ 1 мм (далее – слой), которые взвешивали и определяли толщину по формуле

$$h_i = \frac{m_i}{m} \cdot H, \quad (1)$$

где  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя образца глины, мм;  $m_i$  – масса  $i$ -го слоя образца глины, г;  $H$  – толщина уплотненного образца глины, мм;  $m$  – масса образца глины, г.

Затем слои образца глины высушивали до постоянной массы при температуре  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  в сушильном шкафу. Влажность ( $W$ , мас.%) каждого слоя образца глины и их сухую плотность ( $\rho_d$ ,  $\text{кг/м}^3$ ) определяли по формулам:

$$W = \frac{m_{1i} - m_{2i}}{m_{1i}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

$$\rho_d = \frac{m_{1i}}{(1 + 0,01W) \cdot V}, \quad (3)$$

где  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$  – масса влажного и сухого слоя образца глины соответственно, кг;  $V$  – объем слоя образца, м<sup>3</sup>.

После этого в сухих слоях образца глины измеряли удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{85}\text{Sr}$  прямым спектрометрическим методом по линиям  $E_\gamma$ , равным 662 и 514 кэВ соответственно, с использованием универсального спектрометрического комплекса РУС-91М (Республика Беларусь). Значение кажущегося коэффициента диффузии ( $D_a$ ) рассчитывали из наклона прямых, аппроксимирующих экспериментальные профили распределения диффундирующих радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{85}\text{Sr}$  в образце глины месторождения «Марковское». Все эксперименты проводили в двукратной повторности при температуре  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Результаты и их обсуждение.** Согласно работам [2; 11], если среда, в которой диффундирует радионуклид, является гомогенной и изотропной, а миграция радионуклида протекает в  $x$ -направлении, то уравнение диффузии радионуклида может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где  $C(x, t)$  – объемная активность радионуклида в пористой среде, Бк/м<sup>3</sup>;  $x$  – пространственная координата, м;  $t$  – время диффузии, с;  $D_a$  – кажущийся коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Решение уравнения (4) для тонкого плоского источника, в котором радионуклид распределен равномерно по площади поперечного сечения ( $S, \text{м}^2$ ), при начальных  $C(x=0, t=0) = C_0/(\delta(x) \cdot S)$  и граничных  $C(x=\infty, t>0) = 0$  условиях имеет следующий вид [2; 12]:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{S\sqrt{\pi D_a t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D_a t}\right), \quad (5)$$

где  $C_0$  – активность радионуклида в тонком плоском источнике, Бк;  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака.

Результаты исследования влажности ( $W$ , мас.%) и сухой плотности ( $\rho_d$ ,  $\text{кг/м}^3$ ) слоев образца глины, обработанного дистиллированной водой (далее – ДВ) или ММР, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Диапазон изменения значений влажности и сухой плотности слоев в образцах глины месторождения «Марковское», обработанных дистиллированной водой (ДВ) или модельным минерализованным раствором (ММР)

Table 2. Moisture content and dry density values range in the slices of the clay samples of the “Markovskoye” deposit treated with distilled water (DW) or a model mineralized solution (MMS)

Номер эксперимента Experiment number	Раствор для обработки образца глины Clay sample treatment solution	Радионуклид Radionuclide			
		$^{137}\text{Cs}$		$^{85}\text{Sr}$	
		Влажность слоев образца глины ( $W$ ), мас.% Moisture of clay sample layers ( $W$ ), wt.%	Плотность сухих слоев образца глины ( $\rho_d$ ), $\text{кг/м}^3$ Density of dry clay sample layers ( $\rho_d$ ), $\text{kg/m}^3$	Влажность слоев образца глины ( $W$ ), мас.% Moisture of clay sample layers ( $W$ ), wt.%	Плотность сухих слоев образца глины ( $\rho_d$ ), $\text{кг/м}^3$ Density of dry clay sample layers ( $\rho_d$ ), $\text{kg/m}^3$
1	ДВ	21,5–22,1	1417–1424	21,2–21,9	1419–1427
2	DW	21,8–22,3	1415–1420	21,6–22,2	1416–1423
1	ММР	21,7–22,4	1413–1422	21,8–22,3	1415–1420
2	MMS	21,9–22,5	1412–1419	21,4–21,9	1419–1419

Как видно из табл. 2, значения влажности и сухой плотности слоев в образце ГМ, обработанном ДВ и ММР, изменяются незначительно, что говорит о гомогенности распределения влаги в образце глины и его плотности. По данным [12; 18] пористую среду глины можно считать изотропной при рассмотрении диффузии радионуклида в направлении, перпендикулярном срезу ее слоев ( $x$ -направлении).

В результате экспериментов установлено, что образец ГМ толщиной 30 мм можно рассматривать в качестве бесконечной пористой среды, так как за время диффузии  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  (в течение 70 и 10 сут соответственно) данные радионуклиды не достигают нижней границы уплотненного образца глины. Полученные экспериментальные данные позволяют говорить о том, что диффузионное распределение  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{85}\text{Sr}$  в образце ГМ от тонкого плоского источника должно описываться выражением (5). Такая зависимость реализуется в координатах  $\ln C(x, t) - x^2/t$  или  $\ln I(x, t) - x^2/t$ , так как активность и скорость счета диффундирующего радионуклида пропорциональна его концентрации:

$$\ln I(x, t) = -\frac{x^2}{4D_a t} + \ln \frac{C_0}{S\sqrt{\pi D_a t}}, \quad (6)$$

где  $I(x, t)$  – удельная скорость счета радионуклида в слое образца глины на расстоянии  $x$  (мм) от тонкого плоского источника, имп/с·см<sup>3</sup>.

На рис. 2 и 3 представлены диффузионные профили распределения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в образце ГМ, обработанном ДВ и ММР, в координатах  $I(x, t) - x$  (см. рис. 2, *a, c* и рис. 3, *a, c*) и  $\ln I(x, t) - x^2/t$  (см. рис. 2, *b, d* и рис. 3, *b, d*). Полученные данные представлены для одного эксперимента ввиду близости результатов двух параллельных экспериментов в пределах их погрешности.

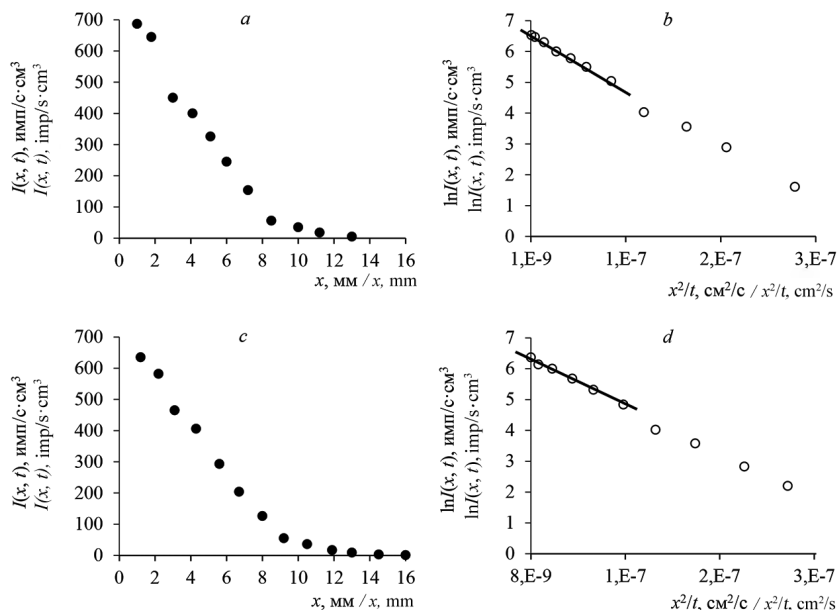


Рис. 2. Диффузионные профили распределения  $^{137}\text{Cs}$  в образце глины месторождения «Марковское», обработанном дистиллированной водой (a, b) или модельным минерализованным раствором (c, d)

Fig. 2. Diffusion profiles of  $^{137}\text{Cs}$  distribution in the clay sample of the “Markovskoye” deposit treated with distilled water (a, b) or model mineralized solution (c, d)

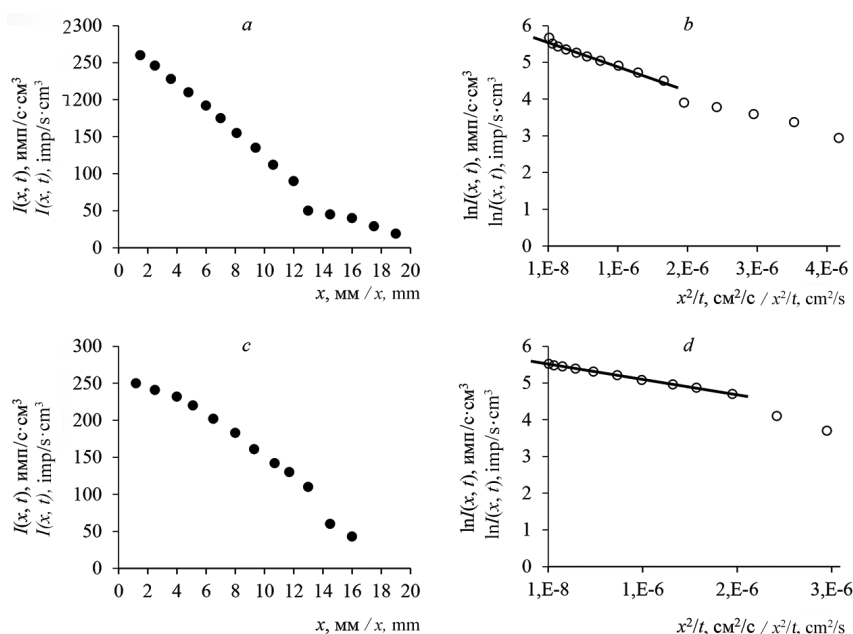


Рис. 3. Диффузионные профили распределения  $^{85}\text{Sr}$  в образце глины месторождения «Марковское», обработанном дистиллированной водой (a, b) или модельным минерализованным раствором (c, d)

Fig. 3. Diffusion profiles of  $^{85}\text{Sr}$  distribution in the clay sample of the “Markovskoye” deposit treated with distilled water (a, b) or model mineralized solution (c, d)

Как видно из рис. 2 и 3, диффузионные профили распределения  $^{85}\text{Sr}$  менее крутые, чем данные профили  $^{137}\text{Cs}$  в глине месторождения «Марковское», что свидетельствует о более быстрой миграции  $^{85}\text{Sr}$  и более высоком значении кажущегося коэффициента диффузии ( $D_a$ )  $^{85}\text{Sr}$  в ней.

Значение  $D_a$  радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в образце ГМ находили с использованием экспериментальных профилей, представленных в координатах  $\ln I(x, t) - x^2/t$  (см. рис. 2, b, d и 3, b, d). Полученные значения кажущегося коэффициента диффузии  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  для образца ГМ, обработанного ДВ или ММР, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значение кажущегося коэффициента диффузии ( $D_a$ )  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  для образца глины месторождения «Марковское», обработанного дистиллированной водой (ДВ) или модельным минерализованным раствором (ММР)

Table 3. Value of apparent diffusion coefficient ( $D_a$ )  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  for clay sample of «Markovskoye» deposit treated with distilled water (DW) or model mineralized solution (MMS)

Номер эксперимента Experiment number	Раствор для обработки образца глины Clay sample treatment solution	Средняя влажность слоя образца глины ( $W$ ), мас. % Average moisture content of the clay sample layer ( $W$ ), wt. %	Средняя плотность сухого слоя образца глины ( $\rho_d$ ), кг/м <sup>3</sup> Average density of dry clay sample layer ( $\rho_d$ ), kg/m <sup>3</sup>	Время диффузии в образце глины, сут Diffusion time in the clay sample, days	Значение кажущегося коэффициента диффузии ( $D_a$ ), м <sup>2</sup> /с The value of the apparent diffusion coefficient ( $D_a$ ), m <sup>2</sup> /s	Среднее значение $D_a$ , м <sup>2</sup> /с The average value of $D_a$ , m <sup>2</sup> /s
$^{137}\text{Cs}$						
1	ДВ DW	21,8 ± 0,3	1420 ± 4	70	1,4 · 10 <sup>-12</sup>	(1,5 ± 0,1) · 10 <sup>-12</sup>
2		22,1 ± 0,2	1417 ± 3	70	1,6 · 10 <sup>-12</sup>	
1	ММР MMS	22,0 ± 0,4	1417 ± 5	70	1,5 · 10 <sup>-12</sup>	(1,6 ± 0,1) · 10 <sup>-12</sup>
2		22,2 ± 0,3	1415 ± 4	70	1,7 · 10 <sup>-12</sup>	
$^{85}\text{Sr}$						
1	ДВ DW	21,6 ± 0,3	1423 ± 4	10	3,6 · 10 <sup>-11</sup>	(3,8 ± 0,2) · 10 <sup>-11</sup>
2		21,9 ± 0,3	1420 ± 3	10	4,0 · 10 <sup>-11</sup>	
1	ММР MMS	22,1 ± 0,2	1417 ± 3	10	6,0 · 10 <sup>-11</sup>	(6,3 ± 0,3) · 10 <sup>-11</sup>
2		21,7 ± 0,2	1422 ± 3	10	6,6 · 10 <sup>-11</sup>	

Значения кажущегося коэффициента диффузии  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{85}\text{Sr}$  для образца ГМ, обработанного ДВ или ММР, получены практически в одинаковых условиях (см. значения влажности и сухой плотности в табл. 3). Как видно, среднее значение  $D_a$   $^{85}\text{Sr}$  для образца ГМ при его обработке ДВ в 25 раз выше, чем среднее значение  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$ , а при обработке ММР – в 39 раз выше, чем среднее значение  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$ . С увеличением минерализации раствора среднее значение кажущегося коэффициента диффузии  $^{85}\text{Sr}$  возрастает в 1,7 раза, а среднее значение  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$  практически не меняется в пределах погрешности экспериментов. Полученный результат можно объяснить разным сорбционным поведением радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  на образце ГМ, что определяется структурными особенностями монтмориллонита, входящего в состав данного образца глины [13].

Согласно данным исследований [14; 19], сорбция  $^{137}\text{Cs}$  на изученном образце глины выше по сравнению со  $^{85}\text{Sr}$  и это связано тем, что  $^{137}\text{Cs}$  сорбируется в основном на высокоселективных центрах сорбции [13], а  $^{85}\text{Sr}$  – на низкоселективных центрах сорбции, которые не отдадут предпочтения какому-либо конкретному иону металла (неселективны) [19]. В связи с этим в основном за счет ионов  $\text{Ca}^{2+}$  (химический аналог стронция) и  $\text{Na}^+$ , входящих в состав модельного минерализованного раствора, значительно возрастает конкуренция за места сорбции с  $^{85}\text{Sr}$  на низкоселективных центрах сорбции образца ГМ [14], что и приводит к повышению значения  $D_a$   $^{85}\text{Sr}$ .

**Заключение.** Методом прямой диффузии в модельных условиях изучена миграция  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в образце глины месторождения «Марковское» (Гомельская область) при сухой плотности 1400 кг/м<sup>3</sup>. Для исследований использовали дистиллированную воду (бессолевого раствор) и модельный минерализованный раствор с концентрацией  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  соответственно 243,4; 13,5; 95,3 и 1,5 мг/дм<sup>3</sup>, который отражает химический состав поровой воды в глине в случае проникновения атмосферных осадков в ПЗРО и их последовательного прохождения через материалы физических барьеров: бетон (конструкция ПЗРО) – На-бентонит (буферная засыпка) – бетон (конструкция ПЗРО). По результатам экспериментов определены средние значения кажущихся коэффициентов диффузии  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{85}\text{Sr}$  в образце глины месторождения «Марковское» при сухой плотности 1400 кг/м<sup>3</sup>, которые составили:

- для бессолевого порового раствора:  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$  –  $(1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с и  $D_a$   $^{85}\text{Sr}$  –  $(3,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с;
- для модельного минерализованного порового раствора:  $D_a$   $^{137}\text{Cs}$  –  $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с и  $D_a$   $^{85}\text{Sr}$  –  $(6,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

Экспериментально установлено, что модельный минерализованный раствор практически не влияет на диффузию  $^{137}\text{Cs}$  в образце глины, но значительно влияет на диффузию  $^{85}\text{Sr}$ . Увеличение

минерализации порового раствора образца глины приводит к росту значения кажущегося коэффициента диффузии  $D_a^{85\text{Sr}}$  в 1,7 раза, а значение  $D_a^{137\text{Cs}}$  не изменяется в пределах погрешности экспериментов. Данный факт по изменению диффузии  $^{85}\text{Sr}$  в глине необходимо учитывать при ее использовании в составе подстилающего экрана пункта захоронения низко- и среднеактивных отходов АЭС. Минерализация поровой влаги будет способствовать увеличению миграции  $^{90}\text{Sr}$  (аналог  $^{85}\text{Sr}$ ), поэтому необходимо предусмотреть использование технологических решений, позволяющих ограничить или снизить доступ влаги в ПЗРО, а также увеличить время диффузии в глине посредством корректировки толщины подстилающего экрана.

Таким образом, проведенные исследования дополняют ранее полученные результаты [14] и подтверждают, что глина месторождения «Марковское» перспективна для использования в составе подстилающего экрана при строительстве пункта захоронения очень низко-, низко- и среднеактивных отходов. Она способна существенно снизить миграцию  $^{137}\text{Cs}$  за пределы ПЗРО даже при увеличении минерализации поровой влаги при проникновении атмосферных осадков в зону захоронения РАО.

### Список использованных источников

1. Applied geochemistry special issue on “Geochemistry of clays and clay rocks in the context of radioactive waste disposal” / A. Gautschi, I. Gaus, T. Gimmi [et al.] // Applied Chemistry. – 2019. – Vol. 105. – P. 127–129. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.05.001>
2. Диффузия и сорбция радия и стронция в слое пористого сорбента на основе гидроксипатита / А. В. Северин, А. В. Гопин, А. Н. Васильев, К. И. Еникеев // Радиохимия. – 2021. – Т. 63, № 1. – С. 54–58. <https://doi.org/10.31857/S0033831121010081>
3. Crovisier, J. L. Nature and role of natural alteration gels formed on the surface of ancient volcanic glasses. (Natural analogs of waste containment glasses) / J. L. Crovisier, T. Advocat, J. Dussossay // Journal of Nuclear Materials. – 2003. – Vol. 321, iss. 1. – P. 91–109. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(03\)00206-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(03)00206-X)
4. FUNMIG Integrated Project results and conclusions from a safety case perspective / B. Schwyn, P. Wersin, J. Rüedi [et al.] // Applied Chemistry. – 2012. – Vol. 27. – P. 501–525. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.018>
5. Жемжуров, М. Л. Техническая концепция захоронения очень низкоактивных, низкоактивных и короткоживущих среднеактивных отходов Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров, Н. Д. Кузьмина // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 105–118. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>
6. Анисимов, Н. А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов / Н. А. Анисимов, А. А. Куваев // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 3 (20). – С. 97–106. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-3-97-106>
7. Варлакова, Г. А. Оценка противомиграционных свойств материалов для буферной засыпки приповерхностного хранилища радиоактивных отходов / Г. А. Варлакова, Е. Е. Осташкина, З. И. Голубева // Радиохимия. – 2013. – Т. 55, № 6. – С. 549–552.
8. Шарафутдинов, Р. Б. Моделирование диффузии радионуклидов из приповерхностных хранилищ жидких РАО / Р. Б. Шарафутдинов, О. Н. Уманова, В. И. Корж // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 18–25.
9. Маковская, Н. А. Глины Республики Беларусь в качестве инженерных барьеров при захоронении радиоактивных отходов / Н. А. Маковская, Т. Г. Леонтьева, А. А. Баклай // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2023. – Т. 68, № 3. – С. 252–264. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-252-264>
10. Сускин, В. В. Подходы к геомиграционному моделированию при оценке безопасности пункта захоронения РАО в расчетном комплексе GERA / В. В. Сускин, И. В. Капырин, К. А. Балдырев // Радиоактивные отходы. – 2023. – № 3 (24). – С. 117–125. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2023-3-117-125>
11. Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite / M. Garcia-Gutiérrez, J. L. Cormenzana, T. Missana [et al.] // Journal of Iberian Geology. – 2006. – Vol. 32, № 1. – P. 37–53.
12. Baborová, L. Comparison of Sr transport in compacted homoionous Na and Ca bentonite using a planar source method evaluated at ideal and non-ideal boundary condition / L. Baborová, E. Viglošová, D. Vopálka // Water. – 2021. – Vol. 13. – P. 37–53. <https://doi.org/10.3390/w13111520>
13. Богатов, С. А. К вопросу выбора инженерных барьеров пункта приповерхностного захоронения РАО на примере сценария переполнения / С. А. Богатов, Г. Д. Неуважаев, В. Ю. Коновалов // Вопросы радиационной безопасности. – 2019. – № 3. – С. 3–14.
14. Влияние минерализованного раствора на защитные свойства глин при изоляции радиоактивных отходов / Н. А. Маковская, Т. Г. Леонтьева, А. А. Баклай, Д. А. Кузьмук // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 233–243. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-233-243>
15. Использование глинистых материалов для создания защитных барьеров радиационно опасных объектов / К. В. Мартынов, Е. В. Захарова, А. Н. Дорофеев [и др.] // Радиоактивные отходы. – 2020. – № 3 (12). – С. 39–53. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-3-39-53>
16. Post, J. E. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data / J. E. Post, D. L. Bish // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 1989. – Vol. 20, № 1. – P. 277–308.

17. Doebelin, N. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN / N. Doebelin, R. Kleeberg // *Journal of Applied Crystallography*. – 2015. – Vol. 48, part 5. – P. 1573–1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
18. Румынин, В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО / В. Г. Румынин // *Радиоактивные отходы*. – 2017. – № 1 (1). – С. 42–53.
19. Diffusion of Na (I), Ca (II), Cs (I), Sr (II) and Eu (III) in smectite rich natural clay / Sharayu Karas, Sumit Kumar, R. K. Bajpai, B. S. Tomar // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – Vol. 151, part 1. – P. 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.10.012>

## References

1. Gautschi A., Gaus I., Gimmi T., Mazurek M., Wersin P., Cathelineau M., Bath A. Applied geochemistry special issue on “Geochemistry of clays and clay rocks in the context of radioactive waste disposal”. *Applied Chemistry*, 2019, vol. 105, pp. 127–129. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.05.001>
2. Severin A. V., Gopun A. V., Vasil'ev A. N., Enikeev K. I. Diffusion and sorption of radioactivity and strontium in a porous sorbent based on hydroxyapatite. *Radiochemistry*, 2021, vol. 63, no. 1, pp. 51–55. <https://doi.org/10.1134/s1066362221010082>
3. Crovisier J. L., Advocat T., Dussoray J. Nature and role of natural alteration gels formed on the surface of ancient volcanic glasses. (Natural analogs of waste containment glasses). *Journal of Nuclear Materials*, 2003, vol. 321, pp. 91–109. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(03\)00206-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(03)00206-X)
4. Schwyn B., Wersin P., Rüedi J., Schneider J., Altmann S., Missana T., Noseck U. FUNMIG Integrated Project results and conclusions from a safety case perspective. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, pp. 501–525. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.018>
5. Zhemzhurov M. L., Kuzmina N. D. Technical concept of disposal for very low-level, low-level and short-lived intermediate-level radioactive waste of the Belarusian NPP. *Vesti Natsyynal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 105–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>
6. Anisimov N. A., Kyvaev A. A. Numerical modeling of moisture transfer in structures of a near-surface radioactive waste disposal facility. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), 97–106 (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-3-97-106>
7. Varlakova G. A., Ostashkina E. E., Golybeva Z. E. Evaluation of the antimigration properties of materials for buffer filling of a near-surface radioactive waste repository. *Radiochemistry*, 2013, vol. 56, pp. 109–113. <https://doi.org/10.1134/s1066362214010214>
8. Sharafutdinov R. B., Umanova O. N., Korzh V. I. Modeling of radionuclide diffusion from near-surface liquid RW storage facilities. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety*, 2008, no. 1, pp. 18–25 (in Russian).
9. Makovskaya N. A., Leontieva T. G., Baklay A. A. Clays of the Republic of Belarus as engineering barriers for disposal of radioactive waste. *Vesti Natsyynal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 3, pp. 252–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-252-264>
10. Suskin V. V., Kapyrin I. V., Baldyrev K. A. Approaches to geomigration modeling for safety assessment of RAW disposal site in the GERA calculation complex. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2023, no. 3 (24), pp. 117–125 (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2023-3-117-125>
11. Garcia-Gutiérrez M., Cormenzana J. L., Missana T., Mingarro M., Molinero J. Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite. *Journal of Iberian Geology*, 2006, vol. 32, no. 1, pp. 37–53.
12. Baborová L., Viglošová D., Vopálka D. Comparison of Sr transport in compacted homoionous Na and Ca bentonite using a planar source method evaluated at ideal and non-ideal boundary condition. *Water*, 2021, vol. 13, pp. 37–53. <https://doi.org/10.3390/w13111520>
13. Bogatov S. A., Neuvazhaev G. D., Konovalov V. Yu. The issue of selection of engineering barriers of near-surface RW disposal facility on the example of overflow scenario. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Radiation Safety Issues*, 2019, no. 3, pp. 3–14 (in Russian).
14. Makovskaya N. A., Leontieva T. G., Baklay A. A., Kuzmuk D. A. Effect of mineralized solution on protective properties of clays in radioactive waste isolation. *Vesti Natsyynal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 233–243 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-233-243>
15. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. Use of clay materials to create protective barriers for radiation hazardous facilities *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 39–53 (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-3-39-53>
16. Post J. E., Bish D. L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, vol. 20, no. 1, pp. 277–308.
17. Doebelin N., Kleeberg R. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGM. *Journal of Applied Chemistry*, 2015, vol. 48, part 5, pp. 1573–1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
18. Rumynin V. G. Experience in studying clay strata and crystalline massifs as geologic media for final isolation of RWs. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2017, no. 1 (1), pp. 42–53 (in Russian).
19. Karas Sharayu, Kumar Sumit, Bajpai P. K., Tomar B. S. Diffusion of Na (I), Ca (II), Cs (I), Sr (II) and Eu (III) in smectite rich natural clay. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151, part 1, pp. 218–233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.10.012>