

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/10.29235/1561-8358-2024-69-3-233-243>
УДК 544.723;544.58;621.039.736



Оригинальная статья

Н. А. Маковская, Т. Г. Леонтьева*, А. А. Баклай, Д. А. Кузьмук

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

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗОВАННОГО РАСТВОРА НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ГЛИН ПРИ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. Изучены минеральный состав, сорбционные и фильтрационные свойства образцов природных глин месторождений «Городное» Брестской области и «Марковское» Гомельской области. Установлено, что глинистый минерал монтмориллонит, входящий в состав глин, имеет в своей структуре иллитовую фазу, содержание которой в исследуемых образцах глин составляет 4,8 мас.% (месторождение «Городное») и 3,6 мас.% (месторождение «Марковское»). Показано, что иллитовая фаза в структуре монтмориллонита содержит высокоселективные центры сорбции ^{137}Cs . Сорбция ^{85}Sr в основном осуществляется на монтмориллоните. Установлено, что минерализованный раствор, моделирующий химический состав поровой влаги в случае проникновения воды и последовательного прохождения через слои бетон – Na-бентонит – бетон пункта захоронения радиоактивных отходов не влияет на сорбцию ^{137}Cs , но оказывает значительное влияние на сорбцию ^{85}Sr . Коэффициент распределения (K_d) ^{137}Cs для исследованных образцов глин из модельного минерализованного раствора составляет более $10^3 \text{ дм}^3/\text{кг}$, что свидетельствует о высоких сорбционных свойствах данных глин по отношению к ^{137}Cs . Значения K_d ^{85}Sr для образцов глин при сорбции из модельного минерализованного раствора в 30 раз ниже K_d ^{137}Cs , что связано в основном с конкуренцией ионов стронция и кальция. Установлено, что значения коэффициентов фильтрации для образцов глин из месторождений «Городное» и «Марковское» после взаимодействия с модельным минерализованным раствором возрастают в 2,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с необработанными образцами данных глин. Это свидетельствует о том, что глина месторождения «Марковское» более устойчива к воздействию модельного минерализованного раствора, чем глина месторождения «Городное». Установлено, что глина месторождения «Марковское» может быть использована в составе подстилающего экрана пункта захоронения низко- и среднеактивных отходов АЭС.

Ключевые слова: глины, иллит, монтмориллонит, сорбция, цезий, стронций, модельный минерализованный раствор, пункт захоронения радиоактивных отходов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Маковская Наталья Александровна – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by; Леонтьева Татьяна Геннадьевна – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны. E-mail: leontieva@sosny.bas-net.by; 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; Кузьмук Дарья Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны. E-mail: kuzmuk@sosny.bas-net.by

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Вклад авторов: *Маковская Наталья Александровна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, анализ и обобщение литературных данных, планирование исследований по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr глинами, проведение сравнительного анализа, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи; *Леонтьева Татьяна Геннадьевна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), анализ и обобщение литературных данных, пробоподготовка образцов глин, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов ^{137}Cs и ^{85}Sr , обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования, формулировка выводов, работа с графическим материалом, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи; *Баклай Анатолий Анатольевич* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), создание модели исследования, планирование исследований по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr глинами, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов ^{137}Cs и ^{85}Sr , применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования; *Кузьмук Дарья Алексеевна* – планирование исследований по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr глинами, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов ^{137}Cs и ^{85}Sr , применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Влияние минерализованного раствора на защитные свойства глин при изоляции радиоактивных отходов / Н. А. Маковская [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 233–243. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-233-243>

Поступила в редакцию: 24.01.2024

Доработанный вариант: 09.08.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article

Natalia A. Makovskaya, Tatiana G. Leontieva*, Anatoly A. Baklay, Darya A. Kuzmuk

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

EFFECT OF MINERALIZED SOLUTION ON PROTECTIVE PROPERTIES OF CLAYS IN RADIOACTIVE WASTE ISOLATION

Abstract. In this paper there were studied the mineral composition and sorption properties as well as filtration properties of natural clay samples from “Gorodnoe” deposit of Brest region and “Markovskoe” deposit of Gomel region. It was determined that clay mineral montmorillonite of the samples contains illite phase in the structure, which is 4,8 wt.% in “Gorodnoe” sample and 3,6 wt.% in “Markovskoe” sample. The illite phase was shown to contain highly selective sorption sites for ^{137}Cs . ^{85}Sr sorption mostly takes place on montmorillonite. It was determined that model mineralized solution (the solution imitating chemical composition of water solution if water penetrates a radioactive waste disposal and consequently passes through concrete, Na-bentonite and again concrete layers) doesn't affect ^{137}Cs sorption, but significantly affects ^{85}Sr sorption. Distribution coefficients (K_d) of ^{137}Cs sorption on studied clay samples are higher than $10^3 \text{ dm}^3/\text{kg}$, indicating high sorption properties of the clays towards ^{137}Cs . K_d ^{85}Sr for sorption on the clay samples in the model mineralized solution is 30 times lower than K_d ^{137}Cs mostly because of competition between strontium and calcium ions. It was determined that filtration coefficient values of clays from “Gorodnoe” and “Markovskoe” deposits are 2,4 and 1,3 times higher after being treated with the model mineralized solution than the filtration coefficient values for raw clay samples. Hence, the clay from “Markovskoe” deposit is more resistant to the influence of the model mineralized solution than the clay from “Gorodnoe” deposit. The overall results of the research state that the clay from “Markovskoe” deposit can be used in the underlying layer of low- and medium-level radioactive waste disposal facility at NPP.

Keywords: clays, illite, montmorillonite, sorption, 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: *Natalia A. Makovskaya* – Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by; *Tatiana G. Leontieva* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: leontieva@sosny.bas-net.by; *Anatoly A. Baklay* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: a.baklay@tut.by; *Darya A. Kuzmuk* – Junior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: kuzmuk@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: *Natalia A. Makovskaya* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), development of the research methodology, collection of literature data, planning research to study sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr on clays, comparative analysis, formulation of conclusions, critical revision of the text of the manuscript (including stages before the publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript; *Tatiana G. Leontieva* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), analysis and generalization of literature data, preparation of clay samples, conducting instrumental studies and measurements of ^{137}Cs and ^{85}Sr activity in solutions, generalization of the results of the research, interpretation of the results of research formulation of conclusions, generalization and interpretation of research results, formulation of conclusions, work with graphic material, critical revision of the text of the manuscript (including stages before publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript; *Anatoly A. Baklay* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), creation of a research model, planning research to study sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr on clays, conducting instrumental studies and measurements of ^{137}Cs and ^{85}Sr activity in solutions, the use of statistical and mathematical methods for data analysis, generalization and interpretation of research results; *Darya A. Kuzmuk* – planning research to study sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr on clays, conducting instrumental studies and measurements of ^{137}Cs and ^{85}Sr activity in solutions, the use of statistical and mathematical methods for data analysis, critical revision of the text of the manuscript (including stages before publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript.

For citation: 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. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = 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>

Received: 24.01.2024

Modified: 09.08.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Развитие атомной энергетики, в том числе и в Республике Беларусь, неразрывно связано с созданием эффективной системы безопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО). В настоящее время введена в эксплуатацию Белорусская АЭС (БелАЭС) с реактором типа ВВЭР-1200, состоящая из двух энергоблоков. При ее работе будут образовываться и накапливаться РАО различного состава. В связи с этим для человека и окружающей среды особую актуальность приобретает проблема их долговременного и безопасного захоронения¹. Для решения данной проблемы в Республике Беларусь разработана концепция приповерхностного пункта захоронения РАО (ПЗРО) БелАЭС с использованием физических барьеров (буферная засыпка, подстилающий и покрывающий экраны) [1]. В этой концепции слой уплотненной глины в составе подстилающего экрана ПЗРО играет важную роль в обеспечении безопасности захоронения очень низко-, низко- и среднеактивных РАО на длительный период времени.

Для создания физических барьеров в составе ПЗРО требуется большое количество глинистых материалов [2]. Согласно рекомендациям МАГАТЭ для стран, эксплуатирующих АЭС, необходимо, по возможности, использовать местные глинистые материалы для снижения стоимости строительства ПЗРО [3]. Применение глин в составе подстилающего экрана позволяет ограничить доступ грунтовых вод к РАО (гидроизоляционная функция); создать условия, при которых массообмен между РАО и грунтовыми водами возможен только посредством диффузии; обеспечить эффективную сорбцию радионуклидов при разгерметизации емкостей с РАО (сорбционная функция) [4]. Исходя из вышеизложенного, основная защитная функция слоя глины в подстилающем экране ПЗРО заключается в предотвращении или снижении до допустимого уровня выхода радионуклидов в окружающую среду. Для выполнения этой функции глина должна иметь определенные защитные свойства – низкий коэффициент фильтрации (K_f , м/сут) и высокую сорбционную способность по отношению к радионуклидам. Согласно [5], при создании подстилающего экрана в ПЗРО применяются уплотненные глины, имеющие K_f не более 10^{-5} м/сут. В [6] установлено, что K_f зависит от минерального состава глин и тем ниже, чем больше содержание в ней монтмориллонита. Кроме того, сорбционные свойства природных глин по отношению к ^{137}Cs и ^{90}Sr значительно различаются и зависят от их минерального состава, содержания и структурных особенностей глинистых минералов, входящих в их состав, а также от условий сорбции радионуклидов [7–12].

¹ Стратегия обращения с радиоактивными отходами: утв. пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 15.02.2023 № 128. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300128&p1=1&p5=0> (дата обращения: 20.01.2024).

По данным [13], в случае проникновения воды (атмосферных осадков, грунтовой воды) в ПЗРО и прохождения через физические барьеры увеличивается ее pH и содержание катионов в ней, что может повлиять на фильтрационные и сорбционные свойства глин в составе подстилающего экрана [11, 14]. Таким образом, исследование закономерностей взаимодействия радионуклидов с глинами при изменении физико-химических условий в ПЗРО является актуальной задачей, решение которой направлено на обеспечение безопасности захоронения РАО на длительный период времени.

Ранее установлено, что образцы глин из месторождений «Городное» Брестской области и «Марковское» Гомельской области обладают наилучшими сорбционными свойствами по отношению к ^{137}Cs среди образцов глин, отобранных из семи белорусских месторождений [15].

Цель данной работы – изучение влияния минерализованного раствора на фильтрационные и сорбционные свойства глин месторождений «Городное» и «Марковское» для оценки возможности их использования в составе подстилающего экрана ПЗРО БелАЭС.

Объекты и методы исследований. В качестве объектов изучения использовались образцы природной глины, отобранные из промышленных месторождений Республики Беларусь: «Городное» Брестской области и «Марковское» Гомельской области.

Минерализованный раствор представляет собой раствор, насыщенный различными катионами и анионами, моделирующий состав поровой влаги при ее последовательном прохождении через слои бетон – буферная засыпка (Na-бентонит) – бетон ПЗРО (далее – модельный минерализованный раствор). Данный раствор готовили в соответствии с рекомендациями, описанными в [16, 17]. В качестве материалов для приготовления модельного минерализованного раствора использовали дистиллированную воду (pH 6,4), бетон (возраст более 50 лет) и образец бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Россия), переведенный в Na-форму согласно [18]. В табл. 1 приведен катионный и анионный составы полученного модельного минерализованного раствора с pH $7,8 \pm 0,2$.

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

Катионный состав	Содержание, мг/дм ³	Анионный состав	Содержание, мг/дм ³
[Na ⁺]	243,4	[NO ₃ ⁻]	2,1
[K ⁺]	13,5	[Cl ⁻]	240,3
[Ca ²⁺]	95,3	[SO ₄ ²⁻]	299,1
[Mg ²⁺]	1,5	[HCO ₃ ⁻]	103,7

Коэффициенты фильтрации для образцов глин до и после взаимодействия с модельным минерализованным раствором определяли по стандартной методике (ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации») на приборе ПФ-1. Минеральный состав образцов глин изучали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Ultima-N (Rigaku, Япония) с использованием CuK_α -излучения: диапазон съемки 2θ (2° – 70°), шаг $0,01$ – $0,02^\circ$, время накопления сигнала – не менее $0,3$ с на точку. Анализ результатов проводили согласно рекомендациям, описанным в [19, 20]. Количественный минеральный анализ осуществляли методом Ритвельда в программном пакете PROFEX GUI для BGMN. Удельную поверхность образцов глин исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ) с использованием прибора ASAP-2010 (Micromeritics, США). Емкость катионного обмена (ЕКО) образцов глин определяли в соответствии с ГОСТ 21283-93 «Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. Методы определения показателя адсорбции и емкости катионного обмена» по адсорбции метиленового голубого.

Эксперименты по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr (аналог ^{90}Sr) из растворов проводили методом ограниченного объема при следующих условиях: температура 20 ± 2 °C, периодическое перемешивание образца с аликвотой раствора. Перед проведением исследований образцы глин высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 ± 5 °C до постоянной массы, затем растирали

в ступке и просеивали через сито с размером ячеек 1 мм. Удельная активность растворов, приготовленных с добавлением радиоактивной метки ^{137}Cs или ^{85}Sr , составляла $1,8 \cdot 10^6$ и $1,7 \cdot 10^6$ Бк/дм³ соответственно. Взаимодействие образца глины с раствором длилось 72 ч, что достаточно для установления сорбционного равновесия в системе глина–раствор [15]. Изотермы сорбции цезия и стронция получали при pH растворов 7,8, изменяя исходную концентрацию цезия в растворе от $4,1 \cdot 10^{-9}$ до 10^{-2} моль/дм³, а концентрацию стронция – от $2,3 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-2} моль/дм³. Для экспериментов с высокой концентрацией цезия (более 10^{-7} моль/дм³) или стронция (более 10^{-9} моль/дм³) к раствору с радиоактивной меткой ^{137}Cs или ^{85}Sr добавляли необходимое количество стабильного CsCl или SrCl₂ · 6H₂O марки х.ч. Изменение значения pH дистиллированной воды от 6,4 до 7,8 осуществляли с помощью раствора NaOH с концентрацией 0,1 моль/дм³. По результатам экспериментов рассчитывали коэффициент распределения (K_d , дм³/кг) цезия или стронция по формуле

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \cdot \frac{V}{m}, \quad (1)$$

где A_0 и A_p – исходная и равновесная удельная активность ^{137}Cs или ^{85}Sr в растворе, Бк/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса образца глины, кг.

Содержание цезия или стронция в растворе (C_p , моль/дм³) и твердой фазе образца глины (C_r , моль/кг) определяли следующим образом:

$$C_p = \frac{C_0}{\left(1 + K_d \cdot \frac{m}{V}\right)}, \quad (2)$$

$$C_r = K_d \cdot C_p, \quad (3)$$

где C_0 и C_p – исходная и равновесная концентрации цезия или стронция в растворе, моль/дм³.

Отношение твердой и жидкой фаз во всех экспериментах составляло 10 г/дм³. Жидкую и твердую фазу разделяли центрифугированием при 10 000 об/мин в течение 15 мин. В полученном фильтрате определяли удельную активность ^{137}Cs или ^{85}Sr прямым спектрометрическим методом по линиям $E_\gamma = 662$ кэВ и 514 кэВ соответственно с использованием универсального спектрометрического комплекса РУС-91М.

Результаты исследований. Глины в составе подстилающего экрана должны сохранять стабильные фильтрационные и сорбционные свойства (то есть защитные свойства) в течение не менее 500 лет [1], поэтому минерализованная влага – это один из факторов агрессивного воздействия на физические барьеры, в состав которых входит глина. В рамках выполнения данной работы определена глина, наиболее устойчивая к воздействию модельного минерализованного раствора.

Исследования минерального состава образцов природных глин месторождений «Городное» (далее ГГ) и «Марковское» (далее ГМ) методом РФА показали, что в валовых образцах присутствуют глинистые минералы монтмориллонит и каолинит (рис. 1, *a* и *c*). Минерал иллит в образцах глин не обнаружен.

По данным [21], монтмориллонит проявляет высокие сорбционные свойства по отношению к ^{137}Cs , если в его структуре присутствует иллитовая фаза. Из рис. 1, *a* и *c* видно, что рефлексы $d_{(001)}$ монтмориллонита, входящего в состав образцов ГГ и ГМ, равные 14,52 и 14,57 Å соответственно, не симметричны, так как их левое крыло начинается выше, чем правое, что свидетельствует о присутствии в структуре монтмориллонита иллитовой фазы [22]. Дополнительные исследования методом РФА ориентированных препаратов глинистой фракции с размером частиц < 2 мкм, выделенной из образцов ГГ и ГМ, позволили установить присутствие иллитовой фазы в структуре монтмориллонита (см. рис. 1, *b* и *d*), содержание которой в образцах глин составляет 4,8 и 3,6 мас.% соответственно. По результатам исследований установлен минеральный состав образцов ГГ и ГМ, который приведен в табл. 2.

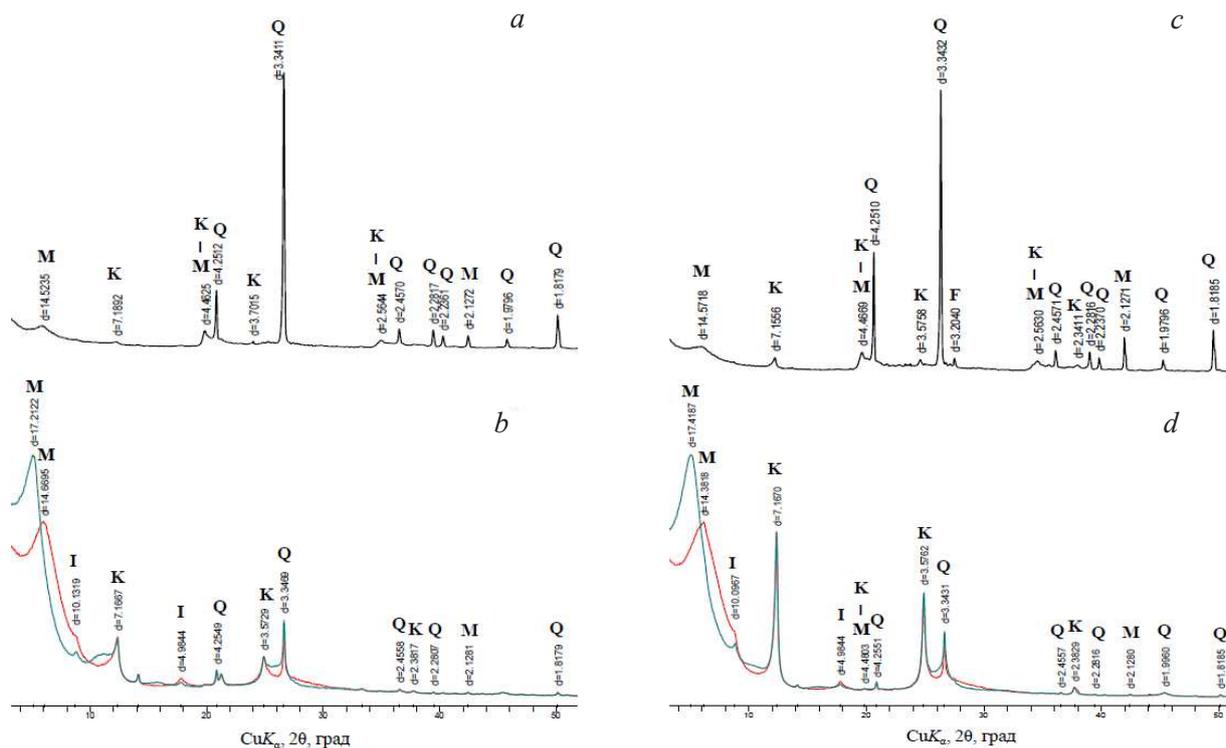


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы глин месторождений «Городное» (a, b) и «Марковское» (c, d): валовый образец (a и c) и глинистая фракция размером < 2 мкм (b и d). Красная линия – воздушно-сухой препарат, зеленая линия – препарат, насыщенный этиленгликолем. Индикаторы рефлексов отдельных минеральных фаз: М – монтмориллонит, I – иллит, К – каолинит, Q – кварц, F – калиевый полевой шпат.

Межплоскостное расстояние дано в ангстремах

Fig. 1. X-ray diffractograms of clays from Gorodnoe (a, b) and Markovskoe (c, d) deposits: a bulk sample (a and c) and its clay fraction < 2 μm in size (b and d). The red line is an air-dry preparation, the green line is a preparation saturated with ethylene glycol. Indicators of reflections of individual mineral phases: M – montmorillonite, I – illite, K – kaolinite, Q – quartz, F – potassium feldspar. Interplanar spacing is given in angstroms

Т а б л и ц а 2. Минеральный состав образцов глин

T a b l e 2. Mineral composition of clay samples

Шифр образца	Содержание минерала, мас.%								
	монтмориллонит	иллит	каолинит	кварц	альбит	микроклин	хлорит	амфиболы	анатаз
ГГ	36,3	4,8	7,0	43,9	1,8	2,8	1,1	1,2	1,1
ГМ	37,6	3,6	14,7	34,3	2,3	6,7	< 0,1	< 0,1	0,8

Наиболее устойчивый к воздействию модельного минерализованного раствора образец глины определяли по коэффициенту фильтрации (K_f , м/сут) как для исходных природных образцов глин, так и для образцов глин после 75 дней взаимодействия с данным раствором. Значения K_f для образцов ГГ и ГМ до и после взаимодействия с модельным минерализованным раствором приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициентов фильтрации для образцов глин

T a b l e 3. Filtration coefficient values of clay samples

Шифр образца	Коэффициент фильтрации (K_f), м/сут	
	Исходный образец глины	Образец глины после взаимодействия с модельным минерализованным раствором
ГГ	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$
ГМ	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$

Как видно из результатов, представленных в табл. 3, наиболее устойчивым к воздействию модельного минерализованного раствора оказался образец ГМ. После взаимодействия с модельным минерализованным раствором значения K_f для образцов ГГ и ГМ увеличились в 2,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с исходными образцами глин.

Одним из основных требований к глине в составе подстилающего экрана ПЗРО является эффективная сорбция радионуклидов [9]. Анализ литературных данных показал, что сорбция различных радионуклидов происходит на определенных природных минералах. Так, радионуклид ^{137}Cs предпочтительно сорбируется на иллите [7], а ^{90}Sr – на монтмориллоните [23]. Согласно данным [7, 9], сорбция ^{137}Cs в системе глинистый материал – раствор зависит в основном от содержания иллита и концентрации калия в растворе [7], а ^{90}Sr – от емкости катионного обмена (ЕКО), удельной поверхности и концентрации кальция в растворе [9]. Значения удельной поверхности и ЕКО для образцов глин приведены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-химические свойства образцов глин

Table 4. Physical-chemical properties of clay samples

Шифр образца	Удельная поверхность, м ² /г	ЕКО, мг-экв/100 г
ГГ	41,1 ± 3,2	20,3 ± 1,6
ГМ	42,7 ± 2,4	24,5 ± 2,1

Согласно данным табл. 2 и 4, а также [9–11], различия в сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr из растворов образцами ГГ и ГМ должны быть незначительными, так как данные глины имеют схожий минеральный состав и близкие значения удельной поверхности и ЕКО.

Основными радионуклидами, вносящими вклад в активность очень низко-, низко- и средне-активных РАО, являются ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{90}Sr [1]. Радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr образуются на АЭС при делении топлива на основе урана и являются основными компонентами очень низко-, низко- и короткоживущих среднеактивных РАО, удельная активность которых составляет соответственно менее 10^6 , 10^6 – 10^7 и 10^7 – 10^{10} Бк/кг, что эквивалентно концентрациям данных радионуклидов менее 10^{-9} , 10^{-9} – 10^{-8} , 10^{-8} – 10^{-5} моль/кг. Влияние модельного минерализованного раствора на сорбционные свойства образцов ГГ и ГМ описывают полученные изотермы сорбции цезия (Cs) и стронция (Sr) из бессолевого раствора (дистиллированная вода) и из модельного минерализованного раствора (pH 7,8). Исходные концентрации Cs или Sr в растворе подобраны таким образом, чтобы охватить весь диапазон активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в составе РАО, указанный выше.

Коэффициент распределения (K_d , дм³/кг) радионуклидов для материалов физического барьера является одним из основных показателей, определяющих возможность их использования в качестве компонента подстилающего экрана ПЗРО [9]. Поэтому для удобства сравнения значений K_d при сорбции цезия и стронция из различных растворов образцами ГГ и ГМ на рис. 2 и 3 показаны изотермы сорбции в виде зависимостей K_d от равновесных концентраций цезия и стронция в растворе (C_p , моль/дм³) в билигарифмических координатах.

В [12, 24] показано, что Cs в природных водах присутствует в виде катиона Cs^+ , а Sr – в виде катиона Sr^{2+} при pH < 9 (при pH > 9 он может находиться в виде карбонатных форм), что обуславливает высокую миграционную подвижность Cs и Sr.

Как видно из рис. 2 и 3, изотермы сорбции Cs и Sr для образцов ГГ и ГМ из различных растворов имеют схожий характер, а значения K_d для Cs и Sr практически не отличаются в пределах погрешности эксперимента. Перегибы на изотермах сорбции Cs (см. рис. 2) свидетельствуют о существовании в образцах ГГ и ГМ двух типов сорбционных центров – T_1 (высокоселективные центры) и T_2 (низкоселективные центры), которые различаются не только значениями K_d , но и сорбционной емкостью по отношению к Cs. Появление высокоселективного центра T_1 в образцах ГГ и ГМ связано с наличием иллитовой фазы в структуре монтмориллонита [21], входящего в состав образцов глин. При низких концентрациях Cs^+ в растворе его сорбция проходит на центрах T_1 , которые по мере роста концентрации Cs^+ в растворе насыщаются, и в сорбции начинают участвовать центры T_2 . Для двух исследованных образцов глин рассчитанные значения K_d цезия центров T_1 и T_2 различаются на порядок и составляют $1,9 \cdot 10^4$ и $1,8 \cdot 10^3$ дм³/кг соответственно,

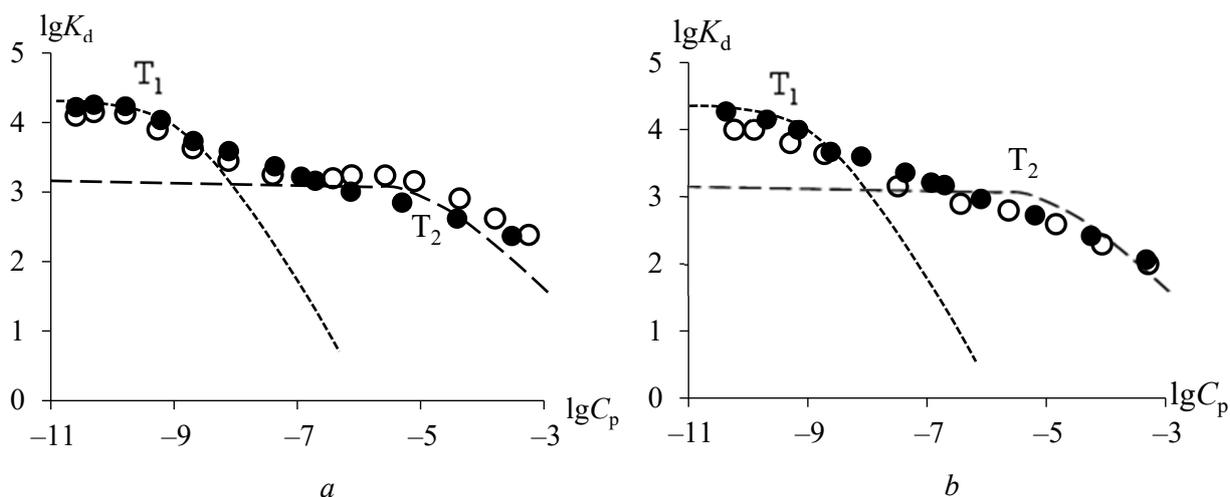


Рис. 2. Зависимость $\lg K_d(\text{Cs})$ от равновесной концентрации Cs в растворе для образцов глин месторождений «Городное» (а) и «Марковское» (b), $\text{pH } 7,8 \pm 0,1$, $[\text{глина}] = 10 \text{ г/дм}^3$; ● – изотерма сорбции Cs из дистиллированной воды, ○ – изотерма сорбции Cs из модельного минерализованного раствора

Fig. 2. Relation of $\lg K_d(\text{Cs})$ and equilibrium concentration of Cs in solution for clay samples from deposits “Gorodnoe” (a) and “Markovskoe” (b), $\text{pH } 7.8 \pm 0.1$, $[\text{clay}] = 10 \text{ g/dm}^3$; ● – Cs sorption isotherm in distilled water, ○ – Cs sorption isotherm in the model mineralized solution

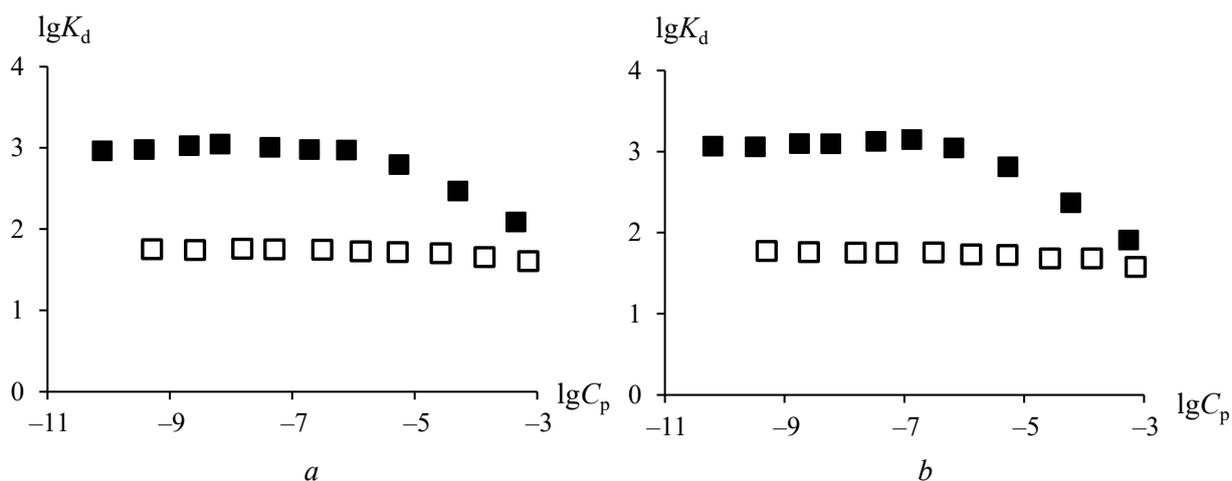


Рис. 3. Зависимость $\lg K_d(\text{Sr})$ от равновесной концентрации Sr в растворе для образцов глин месторождений «Городное» (а) и «Марковское» (b), $\text{pH } 7,8 \pm 0,1$, $[\text{глина}] = 10 \text{ г/дм}^3$; ■ – изотерма сорбции Sr из дистиллированной воды, □ – изотерма сорбции Sr из модельного минерализованного раствора

Fig. 3. Relation of $\lg K_d(\text{Sr})$ and equilibrium concentration of Sr in solution for clay samples deposits “Gorodnoe” (a) and “Markovskoe” (b), $\text{pH } = 7.8 \pm 0.1$, $[\text{clay}] = 10 \text{ g/dm}^3$; ■ – Sr sorption isotherm from distilled water, □ – Sr sorption isotherm from the model mineralized solution

а сорбционные емкости по Cs, определенные на участках постоянного значения K_d по формуле (3), составляют $3,2 \cdot 10^{-5}$ и $2,0 \cdot 10^{-2}$ моль/кг соответственно.

По способности снижать сорбцию ^{137}Cs на иллите катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} можно расположить в следующем порядке: $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ [21]. Сопоставление значений K_d Cs для образцов ГГ и ГМ из растворов (см. рис. 2) показывает, что модельный минерализованный раствор практически не оказывает влияния на сорбционные свойства глин в отношении цезия. Полученный результат можно объяснить низкой конкурентной борьбой Cs^+ с катионами модельного минерализованного раствора за места сорбции на иллите образцов ГГ и ГМ.

В [24] показано, что по способности снижать сорбцию ^{90}Sr на монтмориллоните катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} располагаются в следующем порядке: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Значения K_d Sr для образцов ГГ и ГМ из растворов на один-два порядка ниже соответствующих значений K_d Cs

(см. рис. 2 и 3). Это связано с относительно низкой селективностью сорбции стронция в присутствии конкурирующего катиона Ca^{2+} (химический аналог стронция), содержащегося в модельном минерализованном растворе в количестве $2,4 \text{ моль/дм}^3$, что достаточно для значительного снижения сорбции стронция на монтмориллоните образцов ГГ и ГМ [23]. Для двух исследованных образцов глин значение $K_d \text{ Sr}$ из дистиллированной воды (бессолевой раствор) и модельного минерализованного раствора составляет 1 000 и $60 \text{ дм}^3/\text{кг}$ соответственно, то есть снижается в 16,7 раза (см. рис. 3). Сорбционная емкость по стронцию для двух образцов глин, определенная на участках постоянного значения $K_d \text{ Sr}$ по формуле (3), составляет около $0,01 \text{ моль/кг}$ (см. рис. 3).

Установлено, что при исходной концентрации Cs^+ и Sr^{2+} в модельном минерализованном растворе не более $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ моль/дм}^3$ (эквивалентно удельной активности ^{137}Cs или ^{90}Sr в растворе 10^{10} Бк/дм^3) значения $K_d \text{ Cs}$ для образцов ГГ и ГМ составляют около $1,8 \cdot 10^3 \text{ дм}^3/\text{кг}$ (см. рис. 3). Значения $K_d \text{ Cs}$ более $10^3 \text{ дм}^3/\text{кг}$ для глин в модельном минерализованном растворе свидетельствуют о высоких сорбционных свойствах образцов ГГ и ГМ по отношению к цезию. В отличие от цезия $K_d \text{ Sr}$ для образцов ГГ и ГМ в модельном растворе в 30 раз ниже (см. рис. 3) и составляют примерно $60 \text{ дм}^3/\text{кг}$.

Заключение. Проведенный рентгенофазовый анализ образцов глин месторождений «Городное» (ГГ) и «Марковское» (ГМ) и их глинистых фракций с размером частиц менее 2 мкм позволил установить наличие иллитовой фазы в структуре монтмориллонита, входящего в состав данных образцов глин. Содержание иллитовой фазы в образцах ГГ и ГМ составляет 4,8 и 3,6 мас.% соответственно. В результате проведенных исследований определено, что иллитовая фаза в структуре монтмориллонита содержит высокоселективные центры сорбции ^{137}Cs , в то время как сорбция ^{85}Sr в основном осуществляется на монтмориллоните.

Показано, что модельный минерализованный раствор практически не влияет на сорбцию ^{137}Cs образцами глин, но оказывает значительное влияние на сорбцию ^{85}Sr . Коэффициенты распределения (K_d) ^{137}Cs для образцов глин из модельного минерализованного раствора составляют более $10^3 \text{ дм}^3/\text{кг}$, что свидетельствует о высоких сорбционных свойствах образцов ГГ и ГМ по отношению к ^{137}Cs . Значения $K_d \text{ }^{85}\text{Sr}$ для образцов глин при сорбции из модельного минерализованного раствора в 30 раз ниже по сравнению с $K_d \text{ }^{137}\text{Cs}$, что связано с конкуренцией стронция с ионами кальция, являющегося его аналогом. Установлено, что коэффициенты фильтрации для образцов глин ГГ и ГМ после взаимодействия с модельным минерализованным раствором возрастают в 2,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с исходными образцами данных глин. Наиболее устойчивой к воздействию модельного минерализованного раствора является глина месторождения «Марковское».

Таким образом, глина месторождения «Марковское» Гомельской области может быть использована в составе подстилающего экрана при строительстве пункта захоронения очень низко-, низко- и среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС, так как способна существенно снизить миграцию ^{137}Cs за пределы ПЗРО. Однако для снижения миграции радиоактивного стронция она менее эффективна.

Список использованных источников

1. Жемжуров, М. Л. Техническая концепция захоронения очень низкоактивных, низкоактивных и короткоживущих среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров, Н. Д. Кузьмина // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 105–118. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>
2. Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites / S. Kaufhold [et al.] // Clay Minerals. – 2018. – Vol. 53, Iss. 4. – P. 745–763. <http://doi.org/10.1180/clm.2018.54>
3. Procedures and Techniques for Closure of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste: IAEA-TECDOC-1260. – Vienna: IAEA, 2001. – 96 p.
4. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной безопасности объектов ядерного наследия / В. В. Крупская [и др.] // Радиоактив. отходы. – 2018. – № 2 (3). – С. 30–43.
5. Шарафутдинов, Р. Б. Моделирование диффузии радионуклидов из приповерхностных хранилищ жидких РАО / Р. Б. Шарафутдинов, О. Н. Уманова, В. И. Корж // Ядер. и радиац. безопасность. – 2008. – № 1. – С. 18–25.

6. Мартынов, К. В. Деформация и фильтрация в глинистых материалах для защитных барьеров радиационно опасных объектов / К. В. Мартынов, В. О. Жаркова, Е. В. Захарова // Радиоактив. отходы. – 2021. – № 4 (17). – С. 78–88.
7. Ionic strength and pH dependent multi-site sorption of Cs onto a micaceous aquifer sediment / A. J. Fuller [et al.] // Appl. Geochem. – 2014. – Vol. 40. – P. 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.10.017>
8. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite / C. B. Durrant [et al.] // Sci. Total Environ. – 2018. – Vols. 610–611. – P. 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.122>
9. Сорбция радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{238}U на различных природных сорбентах / В. В. Милютин [и др.] // Радиохимия. – 2021. – Т. 63, № 6. – С. 510–516. <https://doi.org/10.31857/S0033831121060022>
10. Mayordomo, N. Effects of γ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach / N. Mayordomo, U. Alonso, T. Missana // Appl. Geochem. – 2019. – Vol. 100. – P. 121–130. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.012>
11. Adsorption of Cs(I) and Sr(II) on Bentonites with Different Compositions at Different pH Minerals / Yu. Izosimova [et al.] // Minerals. – 2022. – Vol. 12, № 7. – Art. ID 862. <https://doi.org/10.3390/min12070862>
12. Modeling of Cs sorption in natural mixed-clay and the effects of ion competition / T. Missana [et al.] // Appl. Geochem. – 2014. – Vol. 49. – P. 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.011>
13. Мартынов, К. В. Взаимодействие надземной воды с барьерным бентонитом и фосфатным стеклом, содержащим имитаторы РАО / К. В. Мартынов, Е. В. Захарова // Вопр. радиац. безопасности. – 2019. – № 3. – С. 23–29.
14. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чуряев, В. М. Муллер. – М.: Наука, 1987. – 398 с.
15. Маковская, Н. А. Исследование сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr перспективными белорусскими глинами и суглинками для их использования в составе инженерных барьеров пункта захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС / Н. А. Маковская, А. А. Баклай, Т. Г. Леонтьева // Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: докл. VIII Междунар. конф., 23–26 июня 2020 г., г. Минск / Научное учреждение «ОИЭЯИ – Сосны». – Минск: Право и экономика, 2020. – С. 165–169.
16. I-129 Test and Research to Support Disposal Decisions / D. Kaplan [et al.]. – Westinghouse, 2000. – 55 p.
17. Dubina, E. The Phenomenon of Cement Ageing on Moist Air: Surface Chemistry, Mechanisms and Effects on Admixture Performance: dissertation / E. Dubina. – München, 2013. – 225 p.
18. Uptake of lead by Na-exchanged and Al-pillared bentonite in the presence of organic acids with different functional group / L. Perelomov [et al.] // Appl. Clay Sci. – 2016. – Vol. 119. – P. 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.004>
19. Post, J. E. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data / J. E. Post, D. L. Bish // Rev. Mineral. Geochem. – 1989. – Vol. 20, № 1. – P. 277–308. <https://doi.org/10.1201/9781482277616-24>
20. Doebelin, N. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN / N. Doebelin, R. Kleeberg // J. Appl. Crystallogr. – 2015. – Vol. 48, part 5. – P. 1573–1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
21. Modeling cesium retention onto Na-, K- and Ca-smectite: Effects of ionic strength, exchange and competing cations on the determination of selectivity coefficients / T. Missana [et al.] // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2014. – Vol. 128. – P. 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.007>
22. Белоусов, П. Е. Аналитические методы диагностики минерального состава бентонитовых глин / П. Е. Белоусов, Ю. И. Бочарникова, Н. М. Боева // Вестн. РУДН. Сер.: Инженер. исследования. – 2015. – № 4 – С. 94–101.
23. Inorganic Sorbents for Wastewater Treatment from Radioactive Contaminants / N. A. Nekrasova [et al.] // Inorganics. – 2023. – Vol. 11, № 3. – Art. ID 126. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030126>.
24. Путилина, В. С. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Стронций: аналит. обзор / В. С. Путилина. И. В. Галицкая, Т. И. Юганова. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2013. – 95 с.

References

1. 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 Natsyonal'noi 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>
2. Kaufhold S., Dohrmann R., Ufer K., Kober F. Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites *Clay Minerals*, 2018, vol. 53, iss. 4, pp. 745–763. <http://doi.org/10.1180/clm.2018.54>
3. *Procedures and Techniques for Closure of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste: IAEA-TECDOC-1260*. Vienna: IAEA, 2001. 96 p.
4. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43 (in Russian).
5. Sharafutdinov R. B., Umanova O. N., Korzh V. I. Radionuclide diffusion modelling in near-surface liquid radioactive waste storages. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety*, 2008, no. 1, pp. 18–25 (in Russian).
6. Martynov K. V., Zharkova V. O., Zakharova E. V. Deformation and filtration in clay materials constituting to the safety barriers of radiation hazardous facilities. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2021, no. 4 (17), pp. 78–88 (in Russian).
7. Fuller A. J., Shaw S., Peacock C. L., Trivedi D., Small J. S., Abrahamsen L. G., Burke I. T. Ionic strength and pH dependent multi-site sorption of Cs onto a micaceous aquifer sediment. *Applied Geochemistry*, 2014, vol. 40, pp. 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.10.017>

8. Durrant C. B., Begg J. D., Kersting A. B. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite. *Science of the Total Environment*, 2018, vols. 610–611, pp. 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.122>
9. Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Belousov P. E., Krupskaya V. V. Sorption of Radionuclides ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, and ²³³U on Various Natural Sorbents. *Radiochemistry*, 2021, vol. 63, no. 6, pp. 741–746. <https://doi.org/10.1134/S106636221060059>
10. Mayordomo, N., Alonso U., Missana T. Effects of γ-alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 100, pp. 121–130. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.012>
11. Izosimova Yu., Gurova I., Tolpeshta I., Karpukhin M., Zakusin S., Zakusina O., Samburskiy A., Krupskaya V. Adsorption of Cs(I) and Sr(II) on Bentonites with Different Compositions at Different pH. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 7, art. ID 862. <https://doi.org/10.3390/min12070862>
12. Missana T., García-Gutierrez M., Benedicto A., Ayora C., De-Pourcq K. Modeling of Cs sorption in natural mixed-clay and the effects of ion competition *Applied Geochemistry*, 2014, vol. 49, pp. 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.011>
13. Martynov K.V., Zakharova E. V. Interaction of surface water with barrier bentonite and phosphate glass containing radioactive waste imitators. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*, 2019, no. 3, pp. 23–29 (in Russian).
14. Deryagin, B. V., Churaev N. V., Muller V. M. *Surface Forces*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 398 p. (in Russian).
15. Makovskaya N. A., Baklay A. A., Leont'eva T. G. Investigation of ¹³⁷Cs and ⁸⁵Sr sorption on Belarusian clays and loams for their utilization as a part of engineering barriers in radioactive waste disposal of the Belarusian NPP. *Atomnaya energetika, yadernye i radiatsionnye tekhnologii XXI veka: doklady VIII Mezhdunarodnoi konferentsii, 23–26 iyunya 2020 g., g. Minsk* [Atomic Energy, Nuclear and Radiation Technologies of 21st Century: Reports of 8th International Conference, 23–26 June 2020, Minsk]. Minsk, The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National of the Academy of Sciences of Belarus, 2020, pp. 165–169 (in Russian).
16. Kaplan D., Mattigod S., Parker K., Iversen D. *I-129 Test and Research to Support Disposal Decisions*. Westinghouse, 2000. 55 p.
17. Dubina E. *The Phenomenon of Cement Ageing on Moist Air: Surface Chemistry, Mechanisms and Effects on Admixture Performance*. München, 2013. 225 p.
18. Perelomov L., Sarkar B., Rahman M. M., Goryacheva A., Naidu R. Uptake of lead by Na-exchanged and Al-pillared bentonite in the presence of organic acids with different functional. *Applied Clay Science*, 2016, vol. 119, pp. 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.004>
19. Post J. E., Bish D. L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 1989, vol. 20, no. 1, pp. 277–308. <https://doi.org/10.1201/9781482277616-24>
20. Doebelin N., Kleeberg R. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. *Journal of Applied Crystallography*, 2015, vol. 48, part 5, pp. 1573–1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
21. Missana T., Benedicto A., García-Gutierrez M., Alonso U. Modeling cesium retention onto Na-, K- and Ca-smectite: Effects of ionic strength, exchange and competing cations on the determination of selectivity coefficients. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 128, pp. 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.007>
22. Belousov P. E., Bocharnikova Yu. I., Boeva N. M. Analytical methods for diagnostic of mineral composition in bentonite clay. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*, 2015, no. 4, pp. 94–101 (in Russian).
23. Nekrasova N. A., Milyutin V. V., Kaptakov V. O., Kozlitin E. A. Inorganic Sorbents for Wastewater Treatment from Radioactive Contaminants. *Inorganics*, 2023, vol. 11, no. 3. art. ID 126. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030126>
24. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. *Sorption Processes in Heavy Metal and Radioactive Elements Groundwater Pollution. Strontium: an Analytical Review*. Novosibirsk, State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2013. 95 p. (in Russian).