

Научная статья

УДК 504

DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-3-26-34

Оценка радиационной стойкости барьерных глинистых материалов

Андрей Юрьевич Мишанькин¹, Дмитрий Олегович Чубреев²,
Александр Олегович Павлюк³, Егор Григорьевич Язиков⁴

^{1,2,3,4}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

¹aum13@tpu.ru, ²dimanch@tpu.ru, ³pavlyuk17@tpu.ru, ⁴yazikoveg@tpu.ru

Информация о статье

Статья поступила
в редакцию 11.06.2023

Одобрена после
рецензирования 15.07.2023

Принята к публикации
18.07.2023

Ключевые слова:

барьерный глинистый материал, инженерный барьер безопасности, радиационное облучение, радиационная стойкость, характеристики барьерных глинистых материалов, минеральный состав, глинистые минералы, морфология минеральных частиц, рентгеновская дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия

В статье приводятся данные об опыте исследования барьерных глинистых материалов на базе лаборатории инженерных барьеров безопасности Научно-исследовательского центра по выводу из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов и обзор по теме влияния радиационного облучения на различные характеристики барьерных глинистых материалов. Объектом исследования выступает барьерный глинистый материал на основе бентонитовой глины, добытой на месторождении 10-й Хутор (Усть-Абаканский район Республики Хакасия). Бентониты данного месторождения характеризуются вулканогенно-осадочным генезисом, их главным компонентом является монтмориллонит, который имеет пирокластическое происхождение. Предметом исследования являются такие показатели качества барьерных глинистых материалов при их использовании в инженерных барьерах безопасности, как минеральный и микроминеральный состав до и после облучения. Цель исследования – оценка влияния радиационного облучения на минеральный и микроминеральный состав барьерных глинистых материалов. В ходе работ были проведены исследования методами порошковой рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектрометрией. В задачи научного исследования входила оценка радиационной стойкости барьерного глинистого материала при поглощённой дозе гамма-излучения 45–50 МГр. В ходе работы проанализированы литературные данные на тему влияния радиационного облучения на свойства и характеристики глинистых материалов. По результатам исследований получены и сопоставлены данные о минеральном и микроминеральном составе барьерных глинистых материалов, а также о морфологии минеральных частиц до и после облучения. Сделан вывод об отсутствии минералогической эволюции вещества барьерного глинистого материала в результате радиационного воздействия.

Благодарность: Работа выполнена в рамках реализации программы Приоритет 2030 (проект № Приоритет-2030-НИП/ЭБ-039-375-2023).

Original article

Evaluation of Radiation Resistance of Barrier Clay Materials

Andrey Yu. Mishankin¹, Dmitry O. Chubreev², Alexander O. Pavlyuk³, Egor G. Yazikov⁴

^{1,2,3,4}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹aum13@tpu.ru, ²dimanch@tpu.ru, ³pavlyuk17@tpu.ru, ⁴yazikoveg@tpu.ru

Information about the article

Received 11 June, 2023

Approved after review
15 July, 2023

Accepted for publication
18 July, 2023

The article presents data on the experience of studying barrier clay materials on the basis of the laboratory of engineering safety barriers of the Research Center for the Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities and a review on the topic of the effect of radiation exposure on various characteristics of barrier clay materials. The object of the study is a barrier clay material based on bentonite clay mined at the 10th Khutor deposit (Ust-Abakansky district of the Republic of Khakassia). The bentonites of this deposit are characterized by volcanic-sedimentary genesis, their main component is montmorillonite, which is of pyroclastic origin. The subjects of the study are such indicators of the quality of barrier clay materials when they are used in engineering safety barriers, such as the mineral and micromineral composition before and after irradiation. The purpose of the study is to assess the

Keywords:

barrier clay material, engineering safety barrier, radiation exposure, radiation resistance, characteristics of barrier clay materials, mineral composition, clay minerals, mineral particle morphology, X-ray diffractometry, scanning electron microscopy

effect of radiation exposure on the mineral and micromineral composition of barrier clay materials. In the course of the work, studies were carried out using the methods of powder X-ray diffractometry and scanning electron microscopy with energy-dispersive spectrometry. The objectives of the scientific study included the assessment of the radiation resistance of the barrier clay material at an absorbed dose of gamma radiation of 45–50 MGy. In the course of the work, literature data on the effect of radiation exposure on the properties and characteristics of clay materials were analyzed. Based on the research results, data on the mineral and micromineral composition of barrier clay materials, as well as on the morphology of mineral particles before and after irradiation, were obtained and compared. It is concluded that there is no mineralogical evolution of the substance of the barrier clay material as a result of radiation exposure.

Acknowledgment: The work was carried out as part of the implementation of the Priority 2030 program (project No. Priority -2030-NIP / EB-039-375-2023).

Введение. Согласно Федеральному закону «Об использовании атомной энергии», при хранении или захоронении радиоактивных отходов (РАО) должны быть обеспечены их надёжная изоляция от окружающей среды, защита настоящего и будущих поколений, биологических ресурсов от радиационного воздействия сверх установленных норм.

Для изоляции радионуклидов от окружающей среды создаются дополнительные барьеры безопасности, представленные различными барьерными глинистыми материалами (БГМ) [6], основными из которых на сегодняшний день признаны бентонитовые глины, способные обеспечить требования безопасности на длительный период времени [5; 8; 11].

Реализация Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» связана с увеличением потребности в глинистых материалах для создания инженерных барьеров безопасности (ИББ) на объектах изоляции РАО. БГМ становятся всё более востребованными в связи с ростом количества выводимых из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов (ВЭ ЯРОО), что обуславливает активизацию работ в области развития экспериментальных методов исследований и анализа БГМ, изучения их свойств и методов моделирования химических, миграционных процессов, совершенствования технологических подходов. Согласно существующим концепциям, БГМ должны сохранять стабильными свои свойства в течение десятков тысяч и более лет, поэтому важно иметь представление о факторах, влияющих на изменение их характеристик [2].

Исследования, посвящённые изучению характеристик БГМ, перспективны, что подтверждается реализацией Государственной корпорацией «Росатом» программы научно-

технологического обеспечения работ по обновлению выбора БГМ, применяемых на заключительной стадии жизненного цикла объектов использования атомной энергии.

Исследования свойств БГМ начаты в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в 2022 г. и проводятся Научно-исследовательским центром по выводу из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, созданным в рамках реализации проекта «Приоритет 2030».

В рамках исследований определяются ключевые показатели БГМ, в том числе физические свойства, показатели фильтрации и деформации, минеральный и микроминеральный состав, химический и элементный состав, а также гранулометрический состав. Данные показатели определяются в исходных образцах БГМ, а также планируется определение в образцах, подвергшихся радиационному воздействию, которое является неотъемлемой специфической особенностью применения глинистых материалов в составе ИББ.

Методы исследования. Подготовка БГМ к проведению рентгенофазового анализа (РФА) заключалась в заполнении специальной кюветы из органического стекла диаметром 40 мм. При этом были соблюдены основные правила, выполнение которых необходимо для получения достоверных данных: поверхность образца была ровной, вещество БГМ характеризовалось одинаковым размером частиц и представляло собой тонкий порошок (пудру).

Для исследований применялся метод порошка, при котором используется монохроматическое излучение и при съёмке происходит изменение угла падения пучка рентгеновских лучей. Исследуемый образец БГМ представлял собой неориентированный препарат, что обеспечило максимальную разориентацию частиц, необходимую для получения каче-

ственных дифракционных картин при установлении минерального состава [4].

Качественный и полуколичественный анализ содержания минералов в БГМ проводился методом порошковой рентгеновской дифрактометрии, который заключается в измерении дифракции рентгеновских лучей от исследуемого образца. Процесс съёмки основан на точном детектировании (измерении) интенсивности, направления и углов дифракции рентгеновских лучей от объектов, имеющих кристаллическую структуру, в том числе минеральных фаз [7]. Исследования выполнялись на порошковом рентгеновском дифрактометре D2 Phaser фирмы Bruker.

Микроминеральный состав и морфология минеральных частиц исследовались методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектрометрией на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с приставкой для микроанализа Bruker XFlash 4010/5010.

Анализ осуществлялся в режиме обратно рассеянных электронов (backscattered electrons, BSE), который даёт возможность получать композиционную информацию с высокой чувствительностью.

Исследование элементного состава минеральных частиц проводилось путём рентгеноспектрального микроанализа, представляющего собой метод анализа небольшой области твёрдого образца, в которой рентгеновское излучение возбуждается сфокусированным пучком электронов [9]. Применялось программное обеспечение EDAX Esprit, которое позволяет проводить полуколичественный анализ с относительной точностью 5–15 % в зависимости от обнаруженного химического элемента.

Влияние радиационного облучения на характеристики барьерных глинистых материалов. Радиационное воздействие на глинистые материалы является неотъемлемой особенностью их применения в составе инженерных барьеров безопасности (ИББ) выводимых из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО). Воздействие ионизирующего излучения на свойства конструкционных материалов изучено довольно хорошо, в то время как данные о влиянии излучения на БГМ весьма отрывочны [1].

Радиационная устойчивость минералов определяется совершенством их структуры и снижается по мере перехода от кварца к глинистым минералам в ряду кварц – микроклин – гидрослюда – монтмориллонит [3]. При

радиационном и тепловом воздействии происходят изменения в валентных колебаниях связей Si–O и Al–O и дегидратация глинистых минералов с выделением конституционной и кристаллизационной воды из кристаллической решётки [10].

Важным следствием влияния ионизирующего излучения на БГМ является радиационно-индуцированная аморфизация [13], которая происходит в ИББ в результате альфа-распада долгоживущих актиноидов, а также в случае воздействия излучения РАО на инженерный барьер. Радиационно-индуцированная аморфизация значительно влияет на стабильность глинистых материалов, а именно на такие их свойства, как сорбционная ёмкость и кинетика растворения [15]. Вода под действием излучения образует свободные радикалы, что ведёт к разрыву структурных связей в глинах.

Согласно экспериментальным данным [10], в результате радиационного воздействия на БГМ не выявляется вариаций величин ёмкости катионного обмена (ЕКО) и набухания. Что касается минерального состава, то каких-либо значительных его изменений в результате облучения исследователями также не обнаруживается. Исследование влияния ионизирующего излучения на минералогические и микроструктурные характеристики БГМ приводится в работе [Там же]. Объектом эксперимента был бентонит МХ80. Облучение длилось год с суммарной дозой 30 МГр при 130 °С. В результате не было выявлено минералогических и микроструктурных изменений, а также вариаций величин ЕКО и эволюции набухания. Исследования испанских учёных (проект ВИС) [12] заключались в радиационном воздействии на бентонит гамма-излучением в течение пяти лет. В результате минералогических изменений также не зафиксировано. Эксперименты с бентонитом в условиях температурного градиента, водонасыщенности и воздействия гамма-излучения не показали минералогической эволюции вследствие облучения продолжительностью год при суммарной дозе 3×10^7 Гр [14].

Отсутствие минералогических изменений в результате радиационного воздействия на БГМ, в целом, подтверждается и нашими результатами, полученными на базе Национального исследовательского Томского политехнического университета современными методами изучения минерального вещества: порошковой рентгеновской дифрактометрией

и сканирующей электронной микроскопией, с помощью которых исследовались исходные и облучённые образцы БГМ на основе бентонитовой глины.

Облучение образцов БГМ производилось на протяжении 14 суток в остановленном исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т. Основным источником гамма-излучения являлось отработавшее ядерное топливо. В результате образцами БГМ была накоплена поглощённая доза гамма-излучения 45–50 МГр.

Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа (РФА) образца БГМ, полученные до и после радиационного воздействия, приведены в таблице. Установ-

лено, что набор минералов в исходном и облучённом образце БГМ идентичен с небольшими различиями в величинах содержаний, что коррелирует с литературными данными [10; 12].

В ходе исследования образца БГМ методом сканирующей электронной микроскопии было выделено три участка для оценки морфологии и размеров частиц. Снимки выполнялись при увеличениях от $\times 500$ до $\times 5000$. В результате не выявлено заметных изменений в облике кристаллов и морфологии минеральных частиц после облучения по сравнению с исходным образцом БГМ (рис. 1А, 1Б).

Содержание минералов в образце барьерного глинистого материала до и после облучения по данным рентгенофазового анализа, % / The content of minerals in a sample of barrier clay material before and after irradiation according to X-ray phase analysis, %

Минерал / Mineral	Содержание минерала в БГМ, % / Mineral content in BGM, %		Разница содержаний, % / Content difference, %
	До облучения / Before irradiation	После облучения / After irradiation	
Кварц / Quartz	24,1	18,9	- 5,2
Клинохлор / Clinocllore	21,1	21,5	+ 0,4
Монтмориллонит / Montmorillonite	22,2	17,1	- 5,1
Каолинит / Kaolinite	12,5	15,4	+ 2,9
Погрешность определения, % / Determination error, %			1
Неравномерность распределения минералов в исходном БГМ, % / Uneven distribution of minerals in the original BGM, %			≈ 5

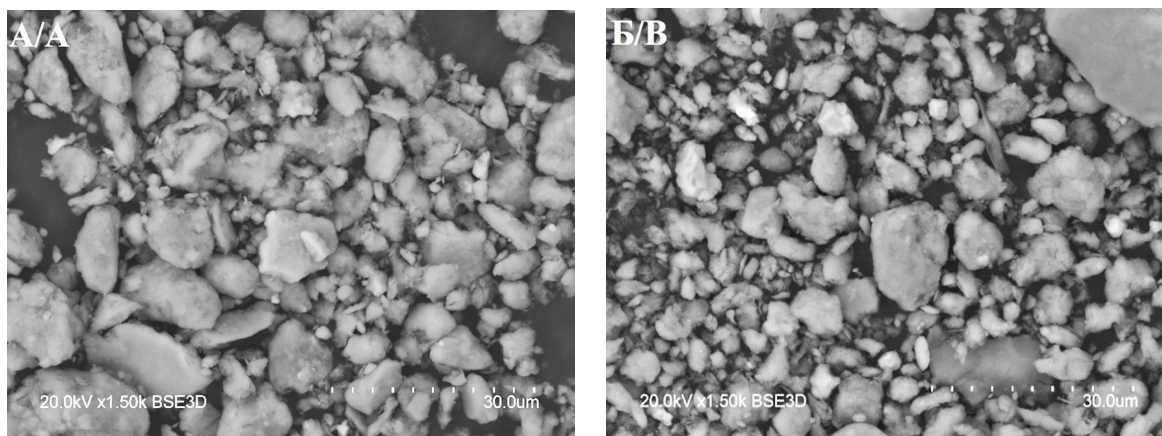


Рис. 1. Морфология микроминералов барьерного глинистого материала: А – до облучения; Б – после облучения / Fig. 1. Morphology of microminerals in barrier clay material: A – before irradiation; B – after irradiation

Как до, так и после облучения зёрна микроминералов характеризуются неокатанностью, угловатостью, иногда сильной корродированностью. Средний размер минеральных частиц составляет 5–20 мкм, что обусловлено мелкодисперсностью общей массы глинистого материала.

Микроминеральный состав является важным показателем БГМ, т. к. влияет на технологические свойства глинистых материалов: текучесть, насыпную плотность, самоуплотняемость и отражает количество обломочных (не глинистых) фракций, определяющих функциональные свойства материала [10].

Данному показателю в ходе исследований было уделено отдельное внимание.

Методом сканирующей электронной микроскопии в исходном образце БГМ обнаружены: кварц, монтмориллонит, каолинит, иллит, хлорит, микроклин, окислы, гидроокислы и алюмосиликаты железа, биотит, сфалерит, барит, целестин, гипс, кальцит. После облучения, помимо минералов, обнаруженных в исходном образце, выявлены: мусковит, альбит, апатит, пирит.

Кварц в образце неокатанный, что указывает на отсутствие транспортировки водным путём и возможную приоритетную роль воздушного переноса в перемещении кварцевых зёрен.

Как в исходном, так и облучённом образце установлено присутствие чешуйчатых

агрегатов каолинита (рис. 2) и монтмориллонита (рис. 3).

Кристаллы полевых шпатов характеризуются неокатанностью и угловатостью зёрен, достигают 60 мкм в длину и не замещаются полностью. Более мелкие частицы часто замещены монтмориллонитом, реже каолинитом.

В облучённом образце БГМ окислы и гидроокислы железа образуют псевдоморфозы по сульфидам, на что указывают формы выделения некоторых кристаллов. В образце встречается пирит (железный колчедан), как в виде хорошо образованных кристаллов куба (рис. 4), так и в виде фрамбоидов – микроморфологической разновидности, которая подразумевает скопление мелких шарообразных кристалликов (рис. 5).

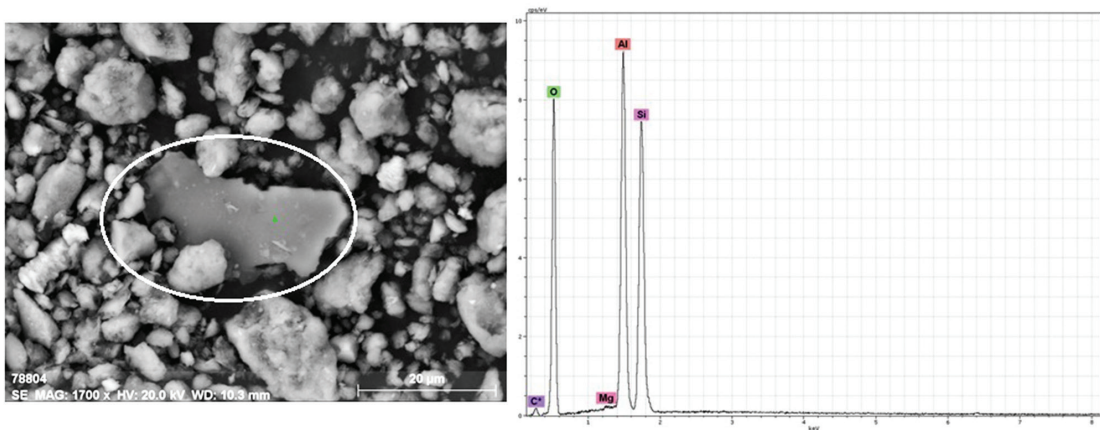


Рис. 2. Снимок в режиме обратно рассеянных электронов и энергодисперсионный спектр каолинита $Al_4 [Si_4 O_{10}] (OH)_8$ (масс. %: O – 54; Al – 24; Si – 22) / **Fig. 2.** Snapshot in the backscattered electron mode and energy-dispersive spectrum of kaolinite $Al_4 [Si_4 O_{10}] (OH)_8$ (wt. %: O – 54; Al – 24; Si – 22)

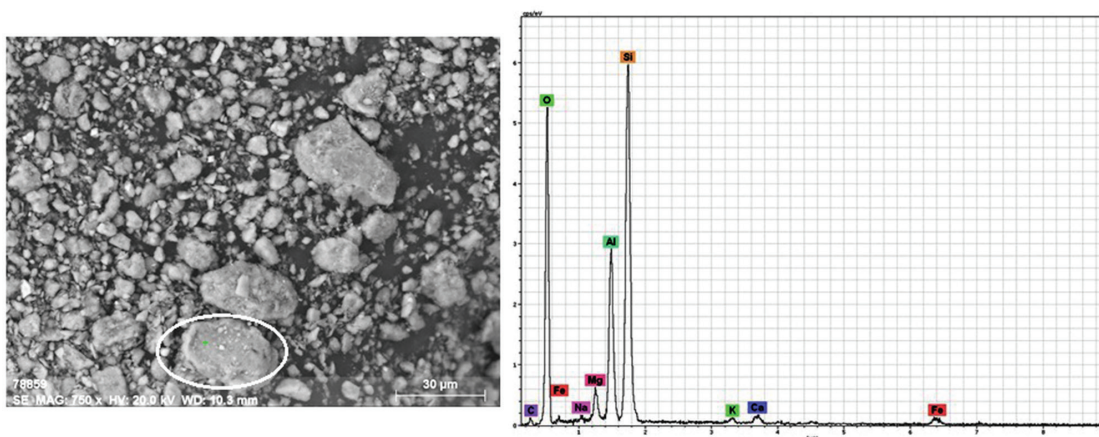


Рис. 3. Снимок в режиме обратно рассеянных электронов и энергодисперсионный спектр монтмориллонита $(Ca, Na \dots) (Mg, Al, Fe)_2 [(Si, Al)_4 O_{10}] (OH)_2 n \times H_2O$ (масс. %: Si – 25; Al – 11; Fe – 3; Mg – 2; Ca – 2; Na – 0,3) / **Fig. 3.** Snapshot in the backscattered electron mode and energy-dispersive spectrum of montmorillonite $(Ca, Na \dots) (Mg, Al, Fe)_2 [(Si, Al)_4 O_{10}] (OH)_2 n \times H_2O$ (wt. %: Si – 25; Al – 11; Fe – 3; Mg – 2; Ca – 2; Na – 0,3)

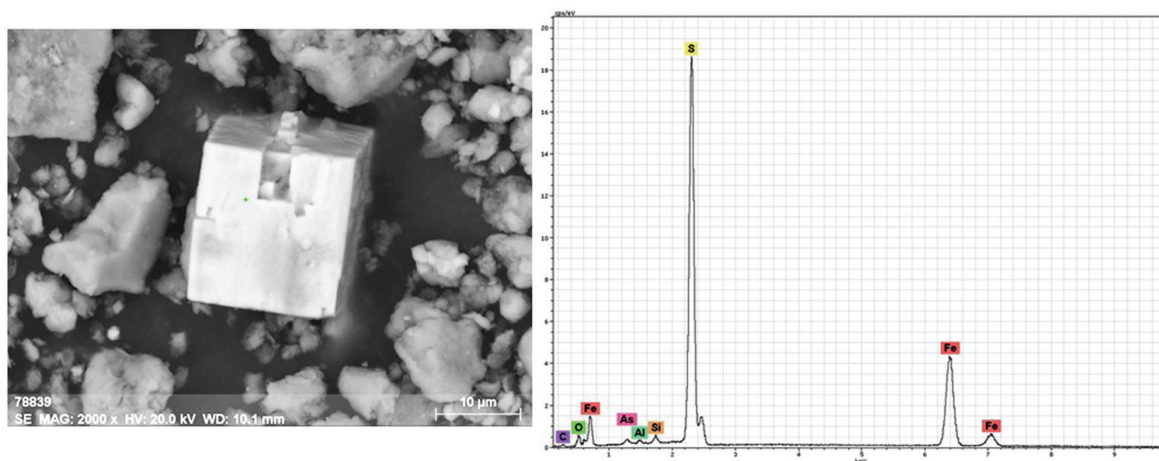


Рис. 4. Снимок в режиме обратно рассеянных электронов и энергодисперсионный спектр кубического кристалла пирита FeS_2 (масс. %: S – 45; Fe – 44) / **Fig. 4.** Snapshot in the backscattered electron mode and the energy-dispersive spectrum of a cubic crystal of pyrite FeS_2 (wt. %: S – 45; Fe – 44)

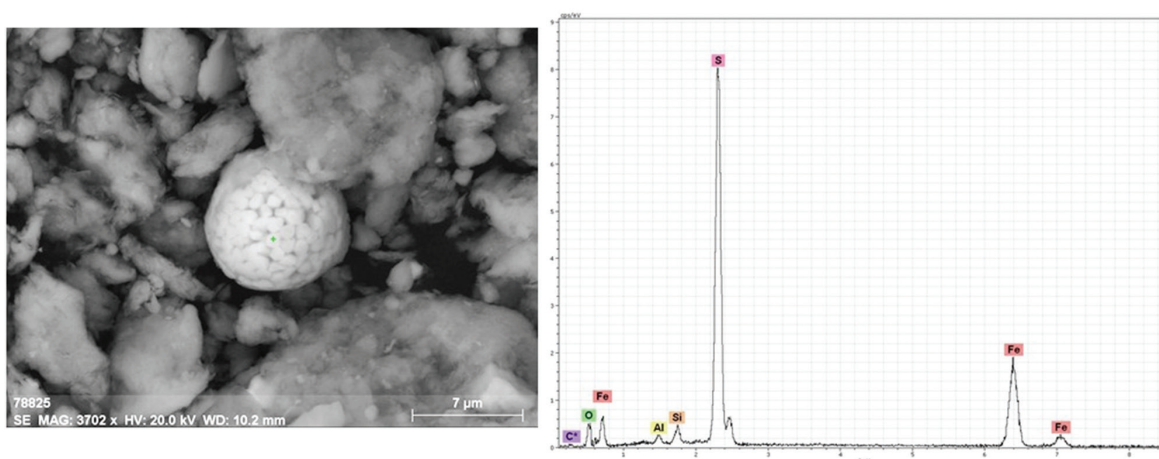


Рис. 5. Снимок в режиме обратно рассеянных электронов и энергодисперсионный спектр фрамбоида пирита FeS_2 (масс. %: Fe – 45; S – 42) / **Fig. 5.** A snapshot in the backscattered electron mode and the energy-dispersive spectrum of pyrite framboid FeS_2 (wt. %: Fe – 45; S – 42)

Полученные с помощью электронной микроскопии данные о минеральном составе коррелируют с результатами РФА.

Выводы. С помощью РФА установлено, что набор минералов в образце БГМ до и после облучения отработавшим ядерным топливом идентичен, изменения содержания минералов незначительны.

В ходе исследования методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектрометрией не выявлено каких-либо заметных различий в облике кри-

сталлов и морфологии минеральных частиц между исходным и облучённым веществом БГМ. Минеральный состав БГМ как до, так и после радиационного воздействия широко представлен различными алюмосиликатами, в том числе с примесными содержаниями Na, Ca, Mg, K, Fe. Результаты показали радиационную стойкость БГМ при поглощённой дозе гамма-излучения 45–50 МГр. Данный вывод целесообразно учитывать для практического применения глинистых материалов в составе инженерных барьеров безопасности.

Список литературы

1. Дашко Р. Э., Еремеева А. А. Анализ и оценка повышения безопасности захоронения низкоактивных отходов в Нижнекембрийских синих глинах Западной части Ленинградской области // Записки Горного института. 2003. Т. 154. С. 131–135.

2. Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е., Калмыков С. Н. Современное состояние в разработке и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4. С. 71–84.
3. Кедровский О. А., Шишиц И. Ю., Гупало Т. А., Леонов Е. А., Савушкина М. К., Косарев И. М. Обоснование условий локализации высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива в геологических формациях // Атомная энергия. 1991. Т. 70, № 5. С. 294–298.
4. Крупская В. В., Закусин С. В. Определение минерального состава грунтов методом рентгеновской дифрактометрии // Лабораторный практикум по грунтоведению / под ред. В. А. Королёва, В. Н. Широкова, В. В. Шаниной. М.: КДУ, Добросвет. 2019. С. 14–46.
5. Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А., Доржиева О. В., Белоусов П. Е., Тюпина Е. А. Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1. С. 35–55.
6. Мартынов К. В., Захарова Е. В., Дорофеев А. Н., Зубков А. А., Прищеп А. А. Использование глинистых материалов для создания защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2020. № 3. С. 39–53.
7. Руководство по рентгеновскому исследованию минералов / под ред. В. А. Франк-Каменского. Л.: Недра, 1983. 359 с.
8. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Линге И. И., Пронь И. А. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в европейских странах. М.: ИБРАЭ РАН, 2017. 35 с.
9. Эгертон Р. Ф. Физические принципы электронной микроскопии. Введение в просвечивающую, растровую и аналитическую электронную микроскопию. М.: Техносфера, 2010. 300 с.
10. Allard T., Calas G. Radiation effects on clay mineral properties // Applied Clay Science. 2009. Vol. 43. P. 143–149.
11. Baborova L., Vopalka D. Migration Behaviour of Strontium in Czech Bentonite Clay // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2016. Vol. 4, no. 3. P. 293–306.
12. Dies J., de las Cuevas C., Tarrasa F., Miralles L., Pueyo J. J. Santiago, J. L. Thermoluminescence response of heavily irradiated calcic bentonite // Radiation Protection Dosimetry. 1999. Vol. 85. P. 481–486.
13. Ewing R. C., Weber W. J., Clinard F. W. J. Radiation effects in nuclear waste forms for high-level radioactive waste // Progress in Nuclear Energy. 1995. Vol. 29, no. 2. P. 63–127.
14. Pusch R. Waste disposal in rock. Developments in Geotechnical Engineering // Elsevier, Amsterdam. 1994. Vol. 76. P. 57–68.
15. Wang S. X., Wang L. M., Ewing R. C. Electron and ion irradiation of zeolites // Journal of Nuclear Materials. 2000. Vol. 278. P. 233–241.

References

1. Dashko R. E., Ereemeeva A. A. Analysis and assessment of improving the safety of low-level waste disposal in the Lower Cambrian blue clays of the Western part of the Leningrad region. Notes of the Mining Institute, vol. 154, pp. 131–135, 2003. (In Rus.).
2. Ilyina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. Current status in the development and use of clay materials as engineering safety barriers at radioactive waste conservation and disposal facilities in Russia. Radioactive Waste, no. 4, pp. 71–84, 2019. (In Rus.).
3. Kedrovsky O. A., Shishits I. Yu., Gupalo T. A., Leonov E. A., Savushkina M. K., Kosarev I. M. Substantiation of conditions for localization of high-level waste and spent nuclear fuel in geological formations. Atomic Energy, vol. 70, no. 5, pp. 294–298, 1991. (In Rus.).
4. Krupskaya V. V., Zakusin S. V. Determination of the mineral composition of soils by X-ray diffractometry. Laboratory workshop on soil science. Ed. V. A. Koroleva, V. N. Shirokov, V. V. Shanina. Moscow: KDU, Dobrosvet, 2019. (In Rus.).
5. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Insulation properties of bentonite barrier systems for radioactive waste disposal in the Nizhnekansky massif. Radioactive Waste, no. 1, pp. 35–55, 2020. (In Rus.).
6. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. The use of clay materials to create protective barriers for radiation-hazardous objects. Radioactive Waste, no. 3, pp. 39–53, 2020. (In Rus.).
7. Guidelines for X-Ray Investigation of Minerals. Ed. V. A. Frank-Kamensky. Leningrad: Nedra, 1983. (In Rus.).
8. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Linge I. I., Pron I. A. Foreign SNF and RW disposal projects. Part I. Current state of projects for the creation of deep geological disposal sites in European countries. Moscow: IBRAE RAN, 2017. (In Rus.).
9. Egerton R. F. Physical principles of electron microscopy. Introduction to transmission, scanning and analytical electron microscopy. Moscow: Technosfera, 2010. (In Rus.).

10. Allard T., Calas G. Radiation effects on clay mineral properties. *Applied Clay Science*, vol. 43, pp. 143–149, 2009. (In Eng.).
11. Baborova L., Vopalka D. Migration Behaviour of Strontium in Czech Bentonite Clay. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 4, pp. 293–306, 2016. (In Eng.).
12. Dies J., de las Cuevas C., Tarrasa F., Miralles L., Pueyo J. J., Santiago J. L. Thermoluminescence response of heavily irradiated calcic bentonite. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 85, pp. 481–486, 1999. (In Eng.).
13. Ewing R. C., Weber W. J., Clinard F. W. J. Radiation effects in nuclear waste forms for high-level radioactive waste. *Progress in Nuclear Energy*, vol. 29, no. 2, pp. 63–127, 1995. (In Eng.).
14. Pusch R. Waste disposal in rock. *Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier, Amsterdam, vol. 76, pp. 57–68, 1994. (In Eng.).
15. Wang S. X., Wang L. M., Ewing R. C. Electron and ion irradiation of zeolites. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 278, pp. 233–241, 2000. (In Eng.).

Информация об авторах

Мишанькин Андрей Юрьевич, инженер лаборатории инженерных барьеров безопасности, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; aym13@tpu.ru. Область научных интересов: геоэкология, геохимия, радиоэкология.

Чубреев Дмитрий Олегович, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией инженерных барьеров безопасности, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; dimanch@tpu.ru. Область научных интересов: вывод из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, инженерные барьеры безопасности.

Павлюк Александр Олегович, канд. физ.-мат. наук, директор Научно-исследовательского центра по выводу из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; pavlyuk17@tpu.ru. Область научных интересов: вывод из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, инженерные барьеры безопасности.

Язиков Егор Григорьевич, д-р геол.-минерал. наук, профессор отделения геологии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; yazikoveg@tpu.ru. Область научных интересов: геология, геоэкология, геохимия.

Information about the authors

Mishankin Andrey Yu., engineer, Laboratory of Engineering Safety Barriers, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; aym13@tpu.ru. Research interests: geoecology, geochemistry, radioecology.

Chubreev Dmitry O., candidate of physical and mathematical sciences, head of the Laboratory of Engineering Safety Barriers, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; dimanch@tpu.ru. Research interests: decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities, engineering safety barriers.

Pavlyuk Alexander O., candidate of physical and mathematical sciences, Director of the Research Center for the Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities, National Research Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russia; pavlyuk17@tpu.ru. Research interests: decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities, engineering safety barriers.

Yazikov Egor G., doctor geological and mineralogical sciences, professor, Geology department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; yazikoveg@tpu.ru. Research interests: geology, geoecology, geochemistry.

Вклад авторов в статью

А. Ю. Мишанькин – обзор по теме влияния радиационного облучения на характеристики барьерных глинистых материалов, проведение исследований и обобщение результатов, написание текста.

Д. О. Чубреев – планирование и контроль экспериментальных работ, руководство написания текста, корректировка текста.

А. О. Павлюк – руководство исследованиями, планирование экспериментальных работ, общие замечания по работе.

Е. Г. Язиков – консультации по теме исследований, корректировка текста.

The authors' contribution to the article

A. Yu. Mishankin – review on the topic of the effect of radiation exposure on the characteristics of barrier clay materials, conducting research and summarizing the results, writing the text.

D. O. Chubreev – planning and control of experimental work, guidance in writing the text, correction of the text.

A. O. Pavlyuk – research leadership, planning of experimental work, general comments on the work.

E. G. Yazikov – research advice, text correction.

Для цитирования

Мишанькин А. Ю., Чубреев Д. О., Павлюк А. О., Языкков Е. Г. Оценка радиационной стойкости барьерных глинистых материалов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 3. С. 26–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-3-26-34.

For citation

Mishankin A. Yu., Chubreev D. O., Pavlyuk A. O., Yazikov E. G. Evaluation of Radiation Resistance of Barrier Clay Materials // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 3. P. 26–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-3-26-34.