

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-03>

EDN MHHSMZ

Оригинальная статья / Original paper



Исследования радиационно-защитных свойств природных минералов Вьетнама

О.Л. Ташлыков¹  , Д.О. Пыльцова¹, Е.В. Кувшинова¹, Т.В. Тхьонг¹ ,
К.А. Махмуд^{1,2} 

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

² Управление ядерных материалов, Эль Маади, Каир, Египет
 o.l.tashlykov@urfu.ru

Аннотация. Затраты на обеспечение защиты современных ядерно-технических установок составляют значительную долю (20-30%) от общей стоимости строительства. Поэтому оптимизация состава радиационно-защитных материалов является важным направлением для минимизации расходов на защиту при сохранении высоких показателей её эффективности. Значительный вклад в снижение затрат на строительство объектов атомной энергетики (ОИАЭ) вносят природные ресурсы, месторождения которых расположены вблизи этих объектов. В современных радиационных технологиях композитные радиационно-защитные материалы (РЗМ) с матрицей из стекла, полимеров, цемента и других материалов играют ключевую роль. Включение различных наполнителей в состав матрицы позволяет проектировать оптимальный состав РЗМ для конкретных условий облучения, определяемых изотопным составом радиоактивных загрязнений. В качестве наполнителей могут быть использованы как природные материалы, так и отходы промышленного производства, что способствует решению проблемы их утилизации. В данной статье представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований образцов природных минералов из северной части Вьетнама. Данное исследование является частью комплексного проекта, который реализуется на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» Уральского федерального университета (УрФУ) уже более 10 лет. Проект направлен на изучение радиационно-защитных свойств природных минералов и промышленных отходов с целью оценки их потенциальной применимости в составе строительных материалов для защиты ОИАЭ. Для исследования расчета радиационно-защитных свойств минералов плотность образцов определялась методом Архимеда с помощью плотномера МН-300А, химический состав — с помощью рентгенофлуоресцентного анализа в лаборатории Управления по ядерным материалам Египта (г. Каир), использовалась база данных ХСОМ. Экспериментальное исследование экранирующих свойств образцов проводилось с помощью спектрометрической установки «Роботрон». Результаты исследования природных материалов выявили образцы камней, которые могут быть использованы в качестве наполнителя бетона при строительстве АЭС и других объектов атомной энергетики во Вьетнаме, а также глины для изготовления радиационно-защитных блоков для быстровозводимой защиты.

Ключевые слова: защита от гамма-излучения, массовый коэффициент ослабления, линейный коэффициент ослабления, база данных ХСОМ, минералы, атомная энергетика, Вьетнам, радиационно-защитные материалы, АЭС.

Для цитирования: Ташлыков О.Л., Пыльцова Д.О., Кувшинова Е.В., Тхьонг Т.В., Махмуд К.А. Исследования радиационно-защитных свойств природных минералов Вьетнама. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):24–32. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-03>

For citation: Tashlykov O.L., Pyltsova D.O., Kuvshinova E.V., Thuong Ta Van, Mahmud K.A. Studies of radiation and protective properties of natural minerals in Vietnam. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):24–32. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-03>

Studies of radiation and protective properties of natural minerals in Vietnam

Oleg L. Tashlykov¹ , Daria O. Pyltsova¹, Elena V. Kuvshinova¹, Ta Van Thuong¹ ,
Karim A. Mahmud^{1,2} 

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russian Federation

² Nuclear Materials Authority, El Maadi, Cairo, Egypt
 o.l.tashlykov@urfu.ru

Abstract. The costs of ensuring the protection of modern nuclear engineering installations account for a significant proportion (20-30%) of the total cost of construction. Therefore, optimization of the composition of radiation protection materials is an important direction for minimizing protection costs while maintaining high performance indicators. Natural resources, the deposits of which are located near these facilities, make a significant contribution to reducing the cost of construction of nuclear power facilities. In modern radiation technologies, composite radiation protective materials (REM) with a matrix of glass, polymers, cement and other materials play a key role. The inclusion of various fillers in the matrix makes it possible to design the optimal composition of REM for specific irradiation conditions determined by the isotopic composition of radioactive contamination. Both natural materials and industrial waste can be used as fillers, which helps to solve the problem of their disposal. This article presents the results of computational and experimental studies of samples of natural minerals from the northern part of Vietnam. This research is part of a comprehensive project that has been implemented at the Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy of the Ural Federal University (UrFU) for more than 10 years. The project is aimed at studying the radiation-protective properties of natural minerals and industrial waste in order to assess their potential applicability as part of building materials for the protection of nuclear power plants. To study the calculation of the radiation-protective properties of minerals, the sample density was determined by the Archimedes method using the MH-300A density meter, the chemical composition was determined using X-ray fluorescence analysis in the laboratory of the Egyptian Nuclear Materials Administration (Cairo), the XCOM database was used. Experimental investigation of the shielding properties of the samples was carried out using the Robotron spectrometric installation. The results of the study of natural materials revealed samples of stones that can be used as a concrete filler in the construction of nuclear power plants and other nuclear power facilities in Vietnam, as well as clay for the manufacture of radiation protection blocks for prefabricated protection.

Keywords: gamma radiation protection, XCOM database, mass attenuation coefficient, linear attenuation coefficient, minerals, nuclear energy, Vietnam, radiation protection materials, nuclear power plants.

Введение

В рамках обеспечения безопасности атомной энергетики радиационная защита должна поддерживать уровни излучения, безопасные для персонала, работающего в зонах контролируемого доступа АЭС^{1,2}. Согласно действующим стандартам, радиационная защита может быть стационарной (используемой как несущая конструкция зданий объекта использования атомной энергии), постоянной (выполняющей роль экранирования без дополнительной нагрузки) или временной (создаваемой на период

проведения радиационно-опасных работ, таких как ремонт и вывод из эксплуатации АЭС).

Для создания стационарных конструкций, обеспечивающих радиационную защиту, часто используют бетон, который не только обладает высокой прочностью, но и служит основой защитных оболочек ядерных реакторов. В некоторых случаях применяются кирпичные элементы, что позволяет строить защитные конструкции с возможностью быстрого монтажа. Защитные кирпичи особенно эффективны при возведении быстровозводимой биологической защиты [1,2], создаваемой вручную без использования специализированной строительной техники, что важно при ограниченных пространствах на объекте.

Глина, как материал для изготовления кирпичей, предоставляет дополнительные преимущества при сооружении таких конструкций, в том числе для обеспечения за-

¹ Егоров Ю.А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций. – Москва: Энергоатомиздат, 1982. 271 с. – Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001074342/?ysclid=m70j0m6i2j43206245 (дата обращения: 21.11.2024).

² Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. – Москва: Энергоатомиздат, 1995. – 494 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01001740227?ysclid=m6z9na01ho523424491>

щиты во время проведения работ по ремонту оборудования или установке дополнительной защиты для контейнеров с радиоактивными отходами. В радиационных полях на объектах атомной энергетики часто используется экранирование источников ионизирующего излучения с соблюдением принципа оптимизации воздействия радиации на окружающих³ [3,4,5].

Современные технологии радиационной защиты включают использование композитных материалов, таких как стекло, полимеры, цемент и другие компоненты, которые играют ключевую роль в защите от различных видов излучений⁴ [6]. Подбор состава и концентрации наполнителей, включаемых в состав матрицы, позволяет подбирать оптимальный состав РЗМ, обеспечивающий их максимальную эффективность для планируемых условий облучения, которые зависят от радиоизотопного состава загрязнений в объеме и на поверхности оборудования и помещений [7].

В России атомная отрасль продолжает активно развиваться, а Госкорпорация «Росатом» занимает ведущие позиции на мировом рынке строительства атомных электростанций. В настоящее время в различных стадиях реализации находятся 26 энергоблоков, а также другие объекты атомной энергетики. В этом контексте особое внимание уделяется исследованию местных природных минералов для их потенциального применения в радиационной защите, что позволяет снижать капитальные затраты, а также разрабатывать новые бессвинцовые композитные материалы для защиты от ионизирующего излучения, особенно гамма-излучения.

Сотрудничество с зарубежными учеными, включая аспирантов из Египта, Иордании, Вьетнама, Саудовской Аравии и Турции,

способствует обмену опытом и расширяет горизонты исследований в области радиационной защиты. Эти усилия активно поддерживаются студентами кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ, создающими научные коллективы для решения глобальных проблем отрасли.

В данной работе представлен обзор результатов расчетно-экспериментальных исследований, проведенных научной группой, изучающей радиационно-защитные свойства природных материалов Вьетнама. Несмотря на остановку в ноябре 2016 г. реализации проекта АЭС «Ниньтхуан» во Вьетнаме, вопрос о сооружении атомной станции окончательно не закрыт, возможен возврат к рассмотрению вопроса о строительстве АЭС [8]. Площадка, выбранная под строительство АЭС «Ниньтхуан», сохранена.

Сейчас во Вьетнаме при помощи Росатома приступили к подготовке к реализации проекта по сооружению Центра ядерной науки и техники атомного научно-исследовательского центра с исследовательским водо-водяным реактором мощностью до 15 МВт [9].

Материалы и методы

Образцы минералов и глины были собраны в северных регионах Вьетнама (провинции Лаокай, Тханьхоа, Лайчау) и доставлены в лабораторию кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского федерального университета для исследований. Для проведения исследований образцы минералов были разрезаны до необходимых размеров и отшлифованы с целью получения параллельных граней для просвечивания гамма-излучением (рис. 1).

Для проведения исследований из красной и белой глины были изготовлены образцы радиационно-защитных материалов с глиняной матрицей. Для их изготовления собранные глины были смешаны с эпоксидной смолой, спрессованы при различных уровнях давления. Было экспериментально исследовано влияние давления на физические, структурные и защитные свойства образцов от γ -излучения (рис. 2).

³ МУ 2.6.5.054–2017. Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий Госкорпорации «Росатом». Методические указания. – Москва: Федеральное медико-биологическое агентство, 2017. – 52 с. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_309073/?ysclid=m70ke0payp983580121 (дата обращения: 21.11.2025)

⁴ Арбузов В.И. Основы радиационного оптического материаловедения. – Санкт-Петербург: СПбГУИТМО, 2008. – 284 с. – Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/361.pdf> (дата обращения: 21.11.2025).

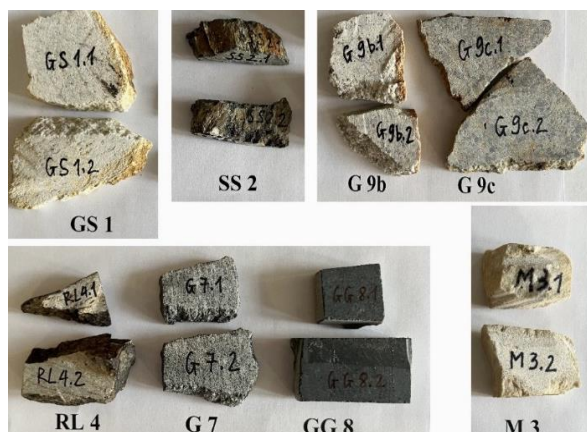


Рисунок 1. Образцы камней
Figure 1. Stone samples



Рисунок 2. Образцы глины
Figure 2. Clay samples

На первом этапе комплекса работ по исследованию минералов был проведен химический анализ образцов, необходимый для расчетного определения их радиационно-защитных свойств. Исследования химического состава образцов были проведены в Управлении по ядерным материалам (г. Каир, Египет) с использованием рентгенофлуоресцентного анализа (X-ray fluorescence spectrometry).

В основе рентгенофлуоресцентного анализа лежит получение и анализ спектра характеристического рентгеновского излучения, возникающего при переходе атома из возбуждённого в основное состояние. Атомы различных химических элементов

испускают фотоны со строго определёнными энергиями, измерив которые можно определить качественный элементный состав. Количественный состав элементов определяется по регистрации интенсивностей излучения с определённой энергией. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа химического состава камней и образцов из глины приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Экспериментальные исследования экран-ирующих свойств образцов проводились с помощью спектрометра «Роботрон» (рис. 3).

Таблица 1. Химический состав исследуемых образцов камней

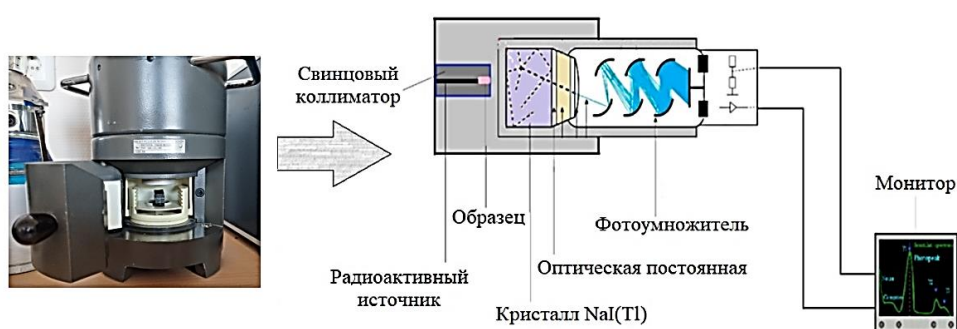
Table 1. Chemical composition of the studied stone samples

[illegible]

Химические соединения	Химический состав (%)							
	G 7.2	G 9c	GS1	M 3	G 9a	RL 4	GG 8.2	G 9b
CdO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb ₂ O ₅	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
WO ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PbO	0.001	0.003	0.004	0.000	0.001	0.001	0.006	0.004
Bi ₂ O ₅	0.005	0.003	0.003	0.000	0.008	0.003	0.012	0.002
Лёгкие элементы	38.608	36.388	29.734	70.555	39.305	42.839	54.070	53.292

Таблица 2. Химический состав исследуемых образцов из глины**Table 2.** Chemical composition of the studied clay samples

Химический состав (%)		
Химический элемент	Красная	Белая
O	48,836	49,776
Na	0,272	1,422
Al	11,61455	11,422
Si	29,73	35,076
K	1,988	1,47
Fe	8,627	0,832

**Рисунок 3.** Схема устройства спектрометра**Figure 3.** Diagram of the spectrometer device

Для этого проводились измерения интенсивностей счета импульсов I_0 (без поглотителя) и I_l (с поглотителем толщиной l). Линейный коэффициент ослабления μ определяется по формуле (1):

$$\ln \frac{I_0}{I_l} = \mu \cdot l, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность счета импульсов без поглотителя;

I_l – интенсивность счета импульсов с поглотителем толщиной l ;

μ – линейный коэффициент ослабления.

Важной величиной, обратной линейному коэффициенту ослабления μ , является слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см), показывающий при какой толщине поглотителя интенсивность излучения уменьшается в два раза. Слой половинного ослабления определяется по формуле (2):

$$\Delta_{0,5} = \frac{\ln(2)}{\mu}. \quad (2)$$

В результате измерения счета импульсов был рассчитан массовый коэффициент ослабления образцов по формуле (3):

$$\mu_m = \frac{\ln \frac{I_0}{I_l}}{l \cdot \rho}, \quad (3)$$

где ρ – плотность образцов.

Для проведения измерения требовалась параллельность граней образцов, поэтому был произведен отбор, а также каждый образец подвергался нескольким измерениям для получения усредненных результатов. Просвечивание образцов производилось гамма-излучением с использованием источников излучения Cs-137 и Co-60.

На основании результатов измерения и определения линейного коэффициента

ослабления и химанализа были определены значения массового коэффициента ослабления.

Используя правило смешивания, массовый коэффициент ослабления вычисляется следующим образом (4):

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i, \quad (4)$$

где $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – коэффициент массового ослабления i -го элемента исследуемых образцов;

w_i – массовая доля для каждого элемента.

Программное обеспечение XCOM используется для теоретической оценки массового коэффициента ослабления [10]. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) составил базу данных сечений фотонов, используемую в программе XCOM. XCOM предоставляет полное сечение, а также парциальное сечение следующих процессов: некогерентного рассеяния, когерентного рассеяния, фотоэлектрического поглощения и образования пар в полях атомного ядра и в поле электронов атомов.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений линейного коэффициента ослабления для образцов камней представлены на рисунке 4. Из графика видно, что наибольшими экранирующими способностями обладают образцы GG 8.2 и G 9с.2.

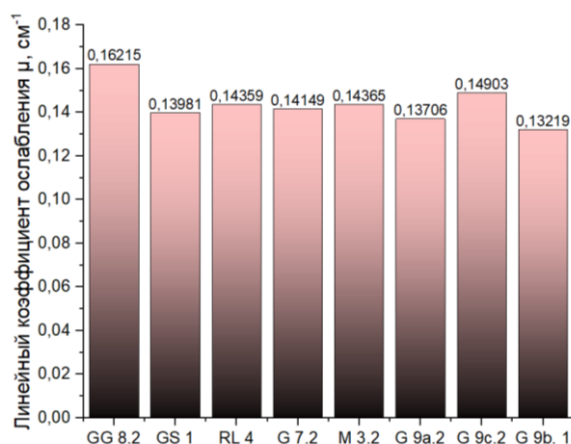


Рисунок 4. Линейный коэффициент ослабления образцов камней

Figure 4. Linear attenuation coefficient of stone samples

Значения массового коэффициента ослабления, определенные при помощи базы данных XCOM на основе химического состава, представлены на рисунке 5.

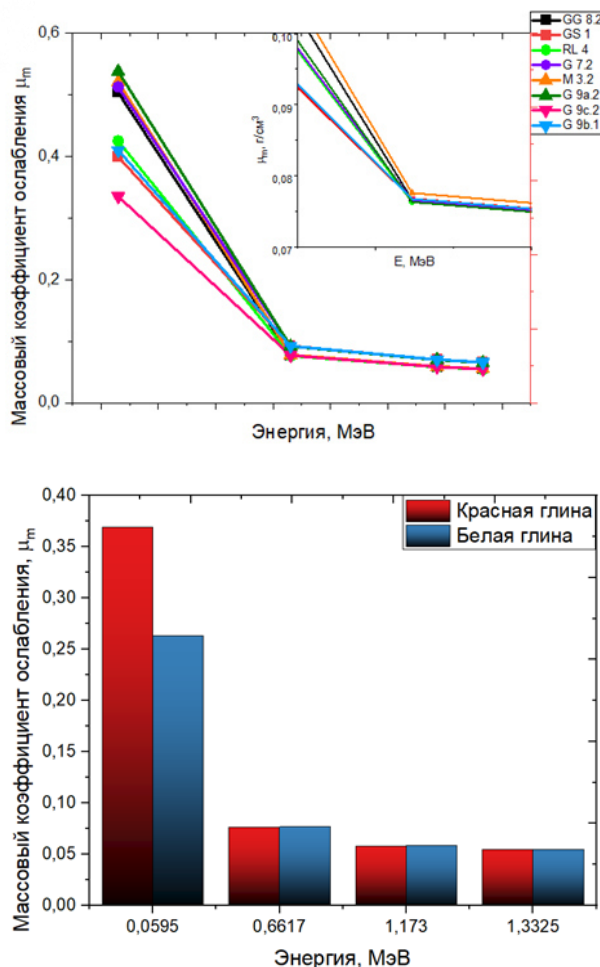


Рисунок 5. Зависимость массового коэффициента ослабления от энергии гамма-излучения для камней (а) и образцов из глины (б)

Figure 5. Dependence of the mass attenuation coefficient on energy for stones from Vietnam (a) the dependence of the mass attenuation coefficient on energy for clay samples (b)

На рисунке 6 представлено сравнение значений линейного коэффициента ослабления изготовленных образцов из глины с наполнителем в виде промышленных отходов с другими образцами радиационно-защитных материалов по данным, приведенным в зарубежных публикациях [11–13].

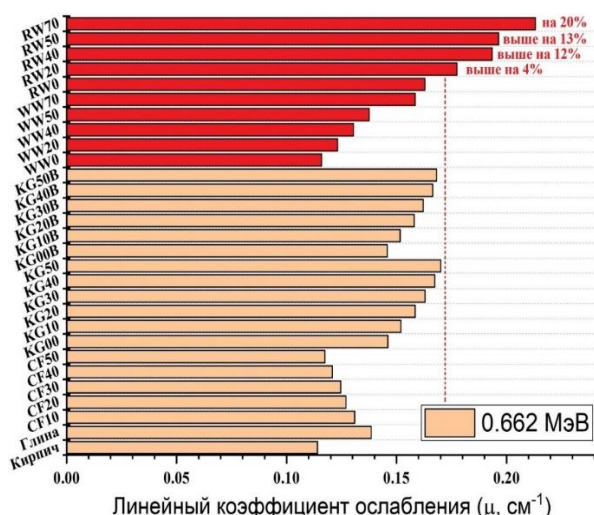


Рисунок 6. Сравнение линейного коэффициента ослабления образцов радиационно-защитного матрицей из глины

Figure 6. Comparison of clay samples with its analogues

Как показали результаты исследования, одним из способов улучшения экранирующих свойств образцов радиационно-защитных материалов из красной и белой глины Вьетнама (серия PR) является использование при их изготовлении гидравлического пресса, создающего давление от 7,61 до 114,22 МПа. Использование прессования позволило повысить плотность образцов, что привело к увеличению линейного коэффициента ослабления образцов на основе красной глины на 32% и 36%, а для образцов из белой глины на 14% и 17% при энергиях гамма-излучения 0,66 и 1,33 МэВ, соответственно. При этом толщина слоя половинного ослабления, обратно пропорциональная коэффициенту линейного ослабления, для образцов из красной глины уменьшилась на 24% и 27%, а для образцов из белой глины на 12% и 15% при энергиях гамма-излучения 0,66 и 1,33 МэВ.

Результаты исследования улучшения экранирующих от γ -излучения свойств композитных образцов радиационно-защитных материалов, созданных на основе матрицы из красной и белой глины Вьетнама (серии RW и WW), при добавлении промышленных металлических отходов в образцах от 0 до 70%, продемонстрировали возрастание линейного коэффициента ослабления образцов,

изготовленных на основе красной глины на 24% и 16%, а для композитов на основе белой глины – на 27% и 21% при энергиях гамма-излучения 0,66 и 1,33 МэВ соответственно. Уменьшение толщины слоя половинного ослабления композитов на основе красной глины составило 24% и 17%, для композитов на основе белой глины – 27% и 20% при тех же значениях энергии гамма-излучения (0,66 и 1,33 МэВ).

Среди исследованных образцов камней из месторождений Вьетнама наибольшее значение линейного и массового коэффициентов ослабления, а соответственно, наименьшую толщину слоя половинного ослабления имеют образцы GG 8.2 (зеленый гранит) и МЗ (мрамор), что говорит о значительном потенциале их использования в качестве природных экранирующих материалов, а также в качестве наполнителя для бетона при сооружении ОИАЭ во Вьетнаме.

Закключение

В ходе исследований были отобраны наиболее эффективные образцы природных камней Вьетнама, обладающие высокой степенью радиационной защиты. Эти материалы могут быть использованы в составе строительных конструкций для обеспечения радиационной безопасности на объектах, связанных с атомной энергетикой. Применение местных природных минералов, обладающих хорошими экранирующими свойствами, значительно снижает затраты на строительство объектов использования атомной энергии. Доступность и распространённость этих материалов на территории Вьетнама делают их наилучшим выбором для реализации проектов сооружения объектов использования атомной энергии на территории Вьетнама.

Радиационно-защитные свойства композитных материалов с матрицей из красной глины имеют лучшие экранирующие свойства по сравнению с зарубежными аналогами и могут быть использованы для изготовления радиационно-защитных блоков для быстровозводимой защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Van Thuong T., Tashlykov O.L., Mahmoud K.A. A unique Vietnam's red clay-based brick reinforced with metallic wastes for γ -ray shielding purposes: Fabrication, characterization, and γ -ray attenuation properties. *Nuclear engineering and technology*. 2024;56(4):1544–1551. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.003>
2. Van Thuong T., Tashlykov O.L., Mahmoud K.A. Lightweight bricks based Vietnamese red clay for radiation protection: A deep look for the impacts of compressive strength on the characterization, and gamma ray shielding evaluation. *Radiation physics and chemistry*. 2024;218:111583. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111583>
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Булатов В.И., Шастин А.Г. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2011;1:55–60. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (дата обращения: 18.11.2024).
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Bulatov V.I., Shastin A.G. Problem of the Lowering of the Nuclear Power Plant Personnel Exposure. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011;1:55–60. (In Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (accessed: 18.11.2024).
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органо-металлических композиций. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;2:49–55. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf (дата обращения: 20.11.2024).
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Chomjakov A.P., Russkikh I.M., Seleznev E.N. Experimental research protection against gamma radiation of organic and metallic compositions. *Global nuclear safety*. 2015;2:49–55. (In Russ.). Available at: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf (accessed: 20.11.2024).
5. Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Балушкин Ф.А. и др. Возможности математических методов моделирования в решении проблемы снижения облучаемости персонала. *Вопросы радиационной безопасности*. 2009;4:47–57. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13017352_21996743.pdf (дата обращения: 18.11.2024).
Tashlykov O.L., Seseikin A.N., Shcheklein S.E., Balushkin F.A. et al. Possibilities of mathematical modeling methods in solving the problem of reducing personnel exposure. *Radiation safety issues*. 2009;4:47–57. (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13017352_21996743.pdf (accessed: 18.11.2024).
6. Бормотов А.Н., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Данилов Ю.М., Соколова Ю.А. Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации: монография. Москва: Издательство «Палеолит», 2006. 272 с. Режим доступа: [Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации](#) (дата обращения: 18.11.2024).
Bormotov A.N., Proshin A.P., Bazhenov Yu.M., Danilov Yu.M., Sokolova Yu.A. Polymer composite materials for radiation protection: monograph. Moscow: Publishing house «Paleolit», 2006. 272 p. (In Russ.). Available at: [Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации](#) (accessed: 18.11.2024).
7. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В. Ю., Михайлова А.Ф. и др. Оптимизация состава радиационной защиты. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2015;4:36–42. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.4.04>
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Lukyanenko V. Yu., Mikhailova A.F. et al. Optimization of radiation protection composition. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2015;4:36–42. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.4.04>
8. Тхьонг Та Ван, Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Фам Кхак Туен, Чан Бао Шон. Анализ состояния энергетической структуры и оценка условий для развития атомной энергетики во Вьетнаме. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2023;2(407):43–53. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.02.043-053>
9. Thuong Ta Van, Tashlykov O.L., Khac Tuyen P. Preparation of guidance on the appraisal of the environmental impact assessment report for the center for nuclear science and technology of Vietnam (2023) E3S Web of Conferences 389, 09057. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338909057>
10. Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen K. XCOM: Photon cross sections database. NIST Standard Reference Database 8 (XGAM). Physical Measurement Laboratory, 2010. <https://dx.doi.org/10.18434/T48G6X>
11. Isfahani H.S., Abtahi S.M., Roshanzamir M.A., Shirani A., Hejazi S.M. Investigation on gamma-ray shielding and permeability of clay-steel slag mixture. *Bulletin of engineering geology and the environment*. 2019;78:4589–4598. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1391-6>
12. Echeweozo E.O., Asiegbu A.D., Efurumibe E.L. Investigation of kaolin – Granite composite bricks for gamma radiation shielding. *International journal of advanced nuclear reactor design and technology*. 2021;3:194–199. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2021.09.007>
13. Share Isfahani H., Abtahi S.M., Roshanzamir M.A., Shirani A., Hejazi S.M. Permeability and Gamma-Ray shielding efficiency of clay modified by barite powder. *Geotechnical and geological engineering*. 2019;37:845–855. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0654-0>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Ташлыков О.Л. – руководство исследованием, разработка методологии исследования, редактирование;

Пыльцова Д.О. – написание первоначального варианта статьи;

Кувшинова Е.В. – подготовка иллюстраций;

Тхьонг Та Ван – подготовка и изготовление образцов, проведение экспериментов, обработка результатов;

Махмуд К.А. – проведение экспериментов, обработка результатов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Олег Леонидович Ташлыков, доктор технических наук, профессор, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-6397-015X>

e-mail: o.l.tashlykov@urfu.ru

Дарья Олеговна Пыльцова, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: dpyltsova@list.ru

Елена Васильевна Кувшинова, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: kuvsinovae793@gmail.com

Та Ван Тхьонг, научный сотрудник, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9086-670X>

e-mail: tavanthuong_tvt@yahoo.com.vn

Карем Абделазим Махмуд, научный сотрудник, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5795-4727>

e-mail: karemabdelazeem@yahoo.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Tashlykov O.L. – research management, development of research methodology, editing;

Pyltsova D. O. – writing an original draft;

Kuvshinova E.V. – production of illustrations;

Thuong Ta Van – preparation and manufacturing of samples, conducting experiments, processing results;

Mahmoud K.A. – conducting experiments, processing results.

FUNDING:

The study has no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Oleg L. Tashlykov, Dr. Sci. (Eng.) Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-6397-015X>

e-mail: o.l.tashlykov@urfu.ru

Daria O. Pyltsova, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

e-mail: dpyltsova@list.ru

Elena V. Kuvshinova, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

e-mail: kuvsinovae793@gmail.com

Ta Van Thuong, Researcher, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-9086-670X>

e-mail: tavanthuong_tvt@yahoo.com.vn

Karem Abdelazim Mahmoud, Researcher Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5795-4727>

e-mail: karemabdelazeem@yahoo.com

Поступила в редакцию / Received 21.11.2024

После доработки / Revision 21.02.2025

Принята к публикации / Accepted 27.02.2025