

**ФИЗИКА АТОМНЫХ ЯДЕР И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ/PHYSICS OF ATOMIC NUCLEI AND ELEMENTARY PARTICLES, HIGH ENERGY PHYSICS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5>

**РАССЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ ВЬЕТНАМА В КАЧЕСТВЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Научная статья

**Пыльцова Д.О.<sup>1,\*</sup>, Кувшинова Е.В.<sup>2</sup>, Ревякина П.А.<sup>3</sup>, Бессонов И.А.<sup>4</sup>, Ташлыков О.Л.<sup>5</sup>, Та В.Т.<sup>6</sup>, Карем Абделазим Габер М.<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0004-0962-9961;

<sup>2</sup> ORCID : 0009-0006-5385-4132;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-6397-015X;

<sup>6</sup> ORCID : 0000-0002-9086-670X;

<sup>7</sup> ORCID : 0000-0001-5795-4727;

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (pyltsova03[at]bk.ru)

**Аннотация**

Финансовая нагрузка, связанная с радиационной защитой современных АЭС, достигает четверти от общих капиталовложений в проект (20–30%). В этом контексте критически важной задачей становится научно обоснованный подбор композиционных материалов, способных обеспечить требуемый уровень безопасности при сокращении бюджетных расходов.

Перспективным направлением экономии выступает интеграция в строительный процесс природных ископаемых из ближайших месторождений. Подобная регионализация поставок сырья не только снижает транспортные расходы, но и создает предпосылки для формирования устойчивых производственно-технологических цепочек в атомной отрасли.

Современные радиационно-защитные технологии активно используют композитные материалы (РЗМ), состоящие из матричной основы и функциональных наполнителей. Гибкость такого подхода позволяет адаптировать состав композита под конкретный изотопный профиль ионизирующего излучения, характерный для объекта защиты.

Особый интерес представляет включение в состав РЗМ природных минералов и техногенных отходов, что одновременно решает две задачи: повышение эффективности защиты и экологически безопасная утилизация вторичных ресурсов. В данном исследовании проанализированы образцы горных пород из месторождений Северного Вьетнама на предмет их применения в защитных конструкциях ОИАЭ.

Методология исследования включала:

1. Компьютерное моделирование защитных характеристик через базу данных XCOM.

2. Экспериментальное определение плотности методом Архимеда (прибор МН-300А).

3. Рентгенофлуоресцентный анализ (XRF) на оборудовании ядерного центра в Каире.

Полученные данные позволяют оценить перспективность создания гибридных материалов на основе изученных минералов и промышленных отходов для атомной энергетики.

Оценка защитных характеристик исследуемых материалов осуществлялась на автоматизированном гамма-спектрометре «Роботрон» с применением изотопного источника <sup>137</sup>Cs (энергия 662 кэВ). В рамках экспериментальной программы были протестированы восемь различных образцов природного происхождения.

Полученные данные демонстрируют, что образец зеленого гранита (маркировка GG 8.2) обладает выраженными экранирующими свойствами, что делает его перспективным компонентом для тяжелых защитных бетонов. Это открывает возможности для его практического применения при сооружении радиационно-защитных конструкций на объектах атомной инфраструктуры Вьетнама, включая энергетические реакторы и исследовательские установки.

**Ключевые слова:** защита от гамма-излучения, радиационно-защитные материалы, оптимизация радиационной защиты, линейный коэффициент ослабления, минералы.

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF RADIATION-PROTECTIVE PROPERTIES OF NATURAL MINERALS IN VIETNAM**

Research article

**Pyltsova D.O.<sup>1,\*</sup>, Kuvshinova Y.V.<sup>2</sup>, Revyakina P.A.<sup>3</sup>, Bessonov I.A.<sup>4</sup>, Tashlykov O.L.<sup>5</sup>, Ta V.T.<sup>6</sup>, Kareem Abdelazim Gaber M.<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0004-0962-9961;

<sup>2</sup> ORCID : 0009-0006-5385-4132;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-6397-015X;

<sup>6</sup> ORCID : 0000-0002-9086-670X;

<sup>7</sup> ORCID : 0000-0001-5795-4727;

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

\* Corresponding author (pyltsova03[at]bk.ru)

## Abstract

The financial burden associated with radiation protection in modern NPPs accounts for approximately one-quarter of total project capital expenditures (20–30%). In this context, the scientifically grounded selection of composite materials that can ensure required safety levels while reducing budget expenditures becomes critically important.

A promising cost-saving approach involves incorporating locally sourced minerals from nearby deposits into the construction process. Such regionalization of raw material supplies not only reduces transportation costs but also creates prerequisites for establishing sustainable production and technological chains in the nuclear industry.

Modern radiation shielding technologies actively employ composite shielding materials (RSMs) consisting of a matrix base and functional fillers. The flexibility of this approach allows for customization of the composite composition to match the specific isotopic profile of ionizing radiation characteristic of the protected facility.

Particular interest lies in incorporating natural minerals and industrial by-products into RSMs, which simultaneously addresses two objectives: enhancing protection effectiveness and enabling environmentally safe recycling of secondary resources. This study analyzes rock samples from deposits in Northern Vietnam for their potential application in protective structures of nuclear energy facilities.

The research methodology included:

1. Computer modeling of shielding characteristics using the XCOM database.
2. Experimental density determination via Archimedes' method (MH-300A densitometer).
3. X-ray fluorescence (XRF) analysis conducted at the Nuclear Materials Authority laboratory in Cairo.

The obtained data allows for evaluation of hybrid material prospects based on the studied minerals and industrial waste for nuclear energy applications.

The assessment of shielding characteristics was performed using an automated "Robotron" gamma spectrometer with a  $^{137}\text{Cs}$  isotopic source (662 keV energy). Eight different natural samples were tested during the experimental program.

Results demonstrate that the green granite sample (designated GG 8.2) exhibits pronounced shielding properties, making it a promising component for heavy shielding concretes. This finding opens possibilities for its practical application in constructing radiation shielding structures at Vietnamese nuclear infrastructure facilities, including power reactors and research installations.

**Keywords:** rotection from gamma radiation, radiation-protective materials, optimization of radiation protection, linear attenuation coefficient, minerals.

## Введение

Современный этап развития российского атомного комплекса характеризуется динамичной экспансией и стабильным ростом ключевых показателей как на внутреннем, так и глобальном энергетическом рынке. АО «Концерн Росэнергоатом», выступающее системообразующим предприятием отрасли, генерирует свыше 20% от общего объема электроэнергии в России, что существенно усиливает энергетическую безопасность государства.

Однако роль атомной индустрии не ограничивается вопросами электрогенерации. Госкорпорация «Росатом», уверенно удерживающая мировое лидерство по количеству строящихся атомных энергоблоков (текущий портфель заказов включает 35+ проектов в 12 государствах), трансформировалась в многопрофильный технологический холдинг. Компания успешно реализует инновационные разработки в различных сферах:

- медицинский сектор (современные методы радиотерапии и диагностики);
- промышленные технологии (аппаратура для неразрушающего контроля и стерилизационные установки);
- фундаментальные и прикладные научные исследования;
- перспективные направления ядерной медицины и радиационных технологий.

Такая диверсификация деятельности позволяет российскому атомному сектору сохранять конкурентные преимущества на международной арене, одновременно способствуя технологическому суверенитету страны.

Особый интерес вызывает разработка инновационных материалов для радиационной защиты, критически важной задачи как для безопасности работы атомных электростанций, так и для других областей применения ядерных технологий.

В фокусе внимания находятся эффективные средства защиты от гамма-излучения, представляющего наиболее сложную проблему из-за его высокой проникающей способности.

Оптимизация затрат на создание радиационной защиты достигается за счет использования местных природных материалов и промышленных отходов, что не только экономически выгодно, но и способствует снижению экологического следа атомной промышленности. Разработка таких материалов — комплексная задача, требующая глубокого понимания физики взаимодействия излучения с веществом. Основное требование к материалам радиационной защиты — высокая эффективность экранирования как нейтронного, так и гамма-излучения. Для достижения этого используются различные стратегии, включающие изменение химического состава материала путем введения тяжелых элементов, таких как свинец, вольфрам, висмут или уран, поглощающих гамма-кванты за счет фотоэлектрического эффекта и эффекта Комптона [1].

Однако простое добавление тяжелых элементов не всегда оптимально. Например, высокая плотность свинца делает его эффективным, но не всегда удобным в обработке, и имеет высокую стоимость. Поэтому ведутся исследования по использованию композитных материалов на основе цемента, бетона, полимеров, в которые вводятся диспергированные частицы тяжелых металлов или их соединений. Это позволяет создавать материалы с регулируемыми свойствами, оптимизированные для конкретных условий эксплуатации [2], [3], [4].

Важным аспектом является учет не только эффективности экранирования, но и долговечности, стойкости к внешним воздействиям (температура, влажность, агрессивные среды), легкости обработки и экономической

целесообразности. Например, исследуются возможности использования шлаков металлургического производства, богатых тяжелыми металлами, в качестве наполнителя для композитов радиационной защиты.

Такой подход позволяет решать сразу две задачи: утилизацию промышленных отходов и создание эффективных и недорогих материалов. Кроме того, активно развиваются исследования в области функциональных нанокompозитов для радиационной защиты. Включение наночастиц тяжелых металлов или оксидов в матрицу полимера или цемента позволяет значительно повысить эффективность экранирования при меньшем количестве добавки. Это связано с увеличением поверхности взаимодействия излучения с веществом. Однако необходимо учитывать возможные проблемы, связанные с токсичностью некоторых наночастиц и их миграцией в окружающую среду. Поэтому важным направлением исследований является разработка биосовместимых и экологически безопасных нанокompозитов. Все эти направления обеспечивают постоянное усовершенствование материалов радиационной защиты, делая атомную энергетику более безопасной и эффективной.

Современные требования к радиационной защите выявили принципиальную ограниченность природных материалов, ни один из которых в естественном виде не способен обеспечить комплексную защиту от всех видов ионизирующего излучения. Это фундаментальное ограничение стало катализатором для активного развития материаловедения в области создания искусственных композитов с программируемыми свойствами. Современные исследования демонстрируют, что путем комбинации различных материалов в многослойных и гибридных структурах возможно достижение беспрецедентных защитных характеристик, недостижимых для мономатериалов. Особое значение в этом процессе занимает принцип оптимизации радиационной защиты (ALARA), который требует тщательного научного обоснования при проектировании новых композиционных систем [5], [6].

Параллельно с технологическим развитием в области радиационной защиты происходят значительные изменения в энергетических стратегиях различных стран. Ярким примером служит Вьетнам, где в ноябре 2016 года было принято стратегическое решение о пересмотре национальной ядерной программы. Несмотря на отказ от масштабного строительства атомных электростанций по экономическим соображениям, страна демонстрирует взвешенный подход к развитию ядерных технологий. В настоящее время ведется активная проработка проекта создания современного Центра ядерной науки и технологий, ключевым элементом которого станет исследовательский водо-водяной реактор мощностью 15 МВт [7]. Этот проект отражает глобальную тенденцию перехода от энергетического использования атома к его научно-технологическому применению, открывая новые перспективы для разработки и тестирования инновационных радиационно-защитных материалов в контролируемых условиях.

Такая двусторонняя динамика: с одной стороны, постоянное совершенствование защитных материалов, с другой — эволюция подходов к использованию ядерных технологий, — создает уникальную синергию для научно-технического прогресса в этой области. Особую актуальность приобретают исследования, направленные на адаптацию новейших композитных материалов к конкретным условиям эксплуатации в различных типах ядерных установок, что открывает новые горизонты как для фундаментальной науки, так и для практического применения.

#### Методы и принципы исследования

В данной работе приведен обзор и результаты исследований радиационно-защитных свойств природных минералов Вьетнама из нескольких месторождений (рис.1) в северной части страны недалеко от столицы — Ханоя.



Рисунок 1 - Места отбора образцов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.1>

Плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) образцов измеряли с помощью плотномера МН-300А (рис. 2). Погрешность измерения находится в пределах  $\pm 0,01$  г/см<sup>3</sup>. Измерения плотности проводились с использованием принципа Архимеда:  $\rho = \frac{(W_a - W_L)}{W_a} \rho_L$ , где  $W_a$  — вес образца в воздухе,  $W_L$  — вес образца в жидкости,  $\rho_L$  — плотность жидкости.



Рисунок 2 - Плотномер  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.2>

С целью определения радиационно-защитных свойств минералов был исследован химический состав образцов в Управлении по ядерным материалам (г. Каир, Египет) с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (X-ray fluorescence spectrometry (рис. 3)).



Рисунок 3 - X-ray fluorescence spectrometry  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.3>

Метод основан на сборе и анализе спектра, полученного после возбуждения характеристического рентгеновского излучения, которое возникает при переходе атома из возбужденного в основное состояние. Атомы разных элементов испускают фотоны со строго определенными энергиями, измерив которые можно определить качественный элементный состав. Для измерения количества элемента регистрируется интенсивность излучения с определенной энергией. Результаты анализа представлены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1 - Химический состав образцов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.4>

	Химический состав (%)							
	G 7.2	G 9c	GS1	M 3	G 9a	RL 4	GG 8.2	G 9b
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.384	5.826	7.142	0.000	3.420	5.782	0.000	3.804
SiO <sub>2</sub>	32.145	41.764	44.396	1.840	28.965	25.029	17.741	<b>28.294</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.421	0.000
SO <sub>3</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.196
Cl	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.860	0.450
K <sub>2</sub> O	8.306	13.289	15.380	0.141	16.666	18.210	1.067	<b>9.789</b>
CaO	6.049	0.000	1.404	26.945	0.000	0.000	<b>14.949</b>	1.208
TiO <sub>2</sub>	0.488	0.115	0.150	0.134	0.455	0.477	0.866	0.294
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.086	0.055	0.058	0.067	0.089	0.157	0.167	0.156
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.028	0.021	0.028	0.038	0.027	0.035	0.062	0.061
MnO	0.129	0.000	0.024	0.032	0.227	0.434	0.165	0.042
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.734	2.516	1.653	0.239	10.765	6.988	9.582	1.382
NiO	0.010	0.012	0.013	0.008	0.010	0.015	0.022	0.014
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.009	0.004
ZnO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.004	0.000	0.004
ZrO <sub>2</sub>	0.027	0.007	0.012	0.000	0.030	0.019	0.000	0.003
MoO <sub>3</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CdO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
WO <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.5>

Химический состав (%)		
	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

Измерения линейного коэффициента ослабления проводились с помощью спектрометра «Роботрон» (рис. 4). Сцинтилляционный детектор, радиоактивный источник гамма-излучения и тестовый объект были помещены в свинцовую капсулу для защиты от излучения источника, а детекторы от естественного радиационного фона.

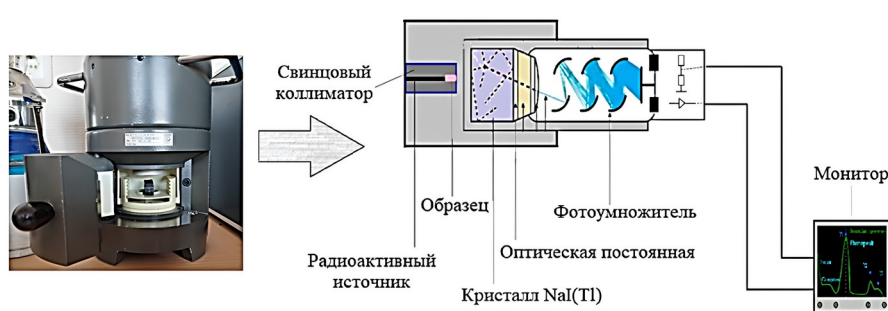


Рисунок 4 - Схема устройства спектрометра  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.6>

Определение линейного коэффициента ослабления происходило в результате измерения интенсивности счета импульсов по следующей формуле:  $\ln \frac{I_0}{I_l} = \mu \cdot l$ , где  $I_0$  — интенсивность счета импульсов без поглотителя;  $I_l$  — интенсивность счета импульсов с поглотителем толщиной  $l$ ;  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления.

Слой половинного ослабления (см) по формуле:  $\Delta_{0,5} = \frac{\ln(2)}{\mu}$ .

Значение интенсивности счета импульсов без поглотителя составила 574,43.

Для проведения измерения требовалась параллельность граней образцов, поэтому был произведен отбор, а также каждый минерал подвергался нескольким измерениям для обеспечения более точных результатов. Данные экземпляры облучались источником излучения Cs-137. Результаты измерений представлены на рисунках 5 и 6.

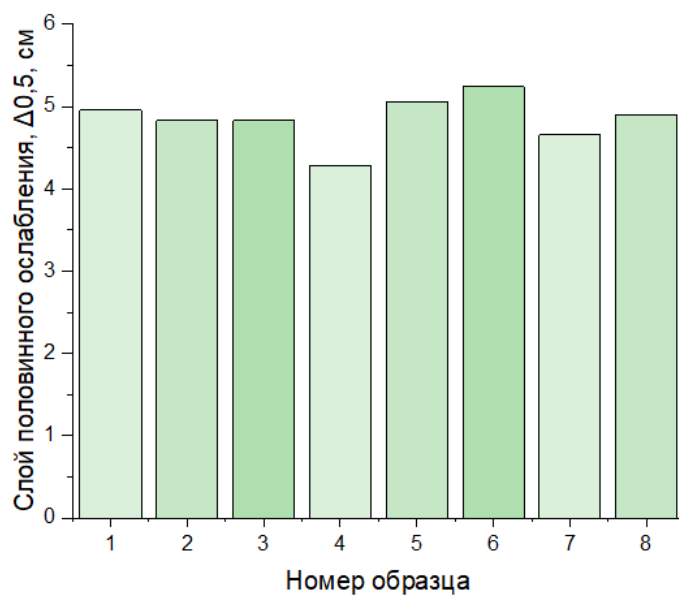


Рисунок 5 - Слой половинного ослабления образцов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.7>



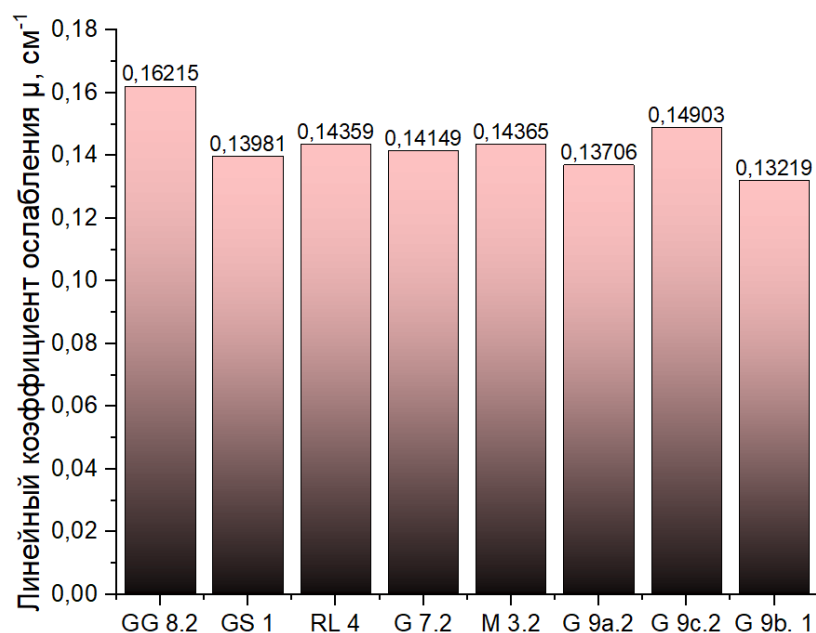


Рисунок 6 - Линейный коэффициент ослабления образцов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.8>

На рис. 7 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, например [8], [9], [10].

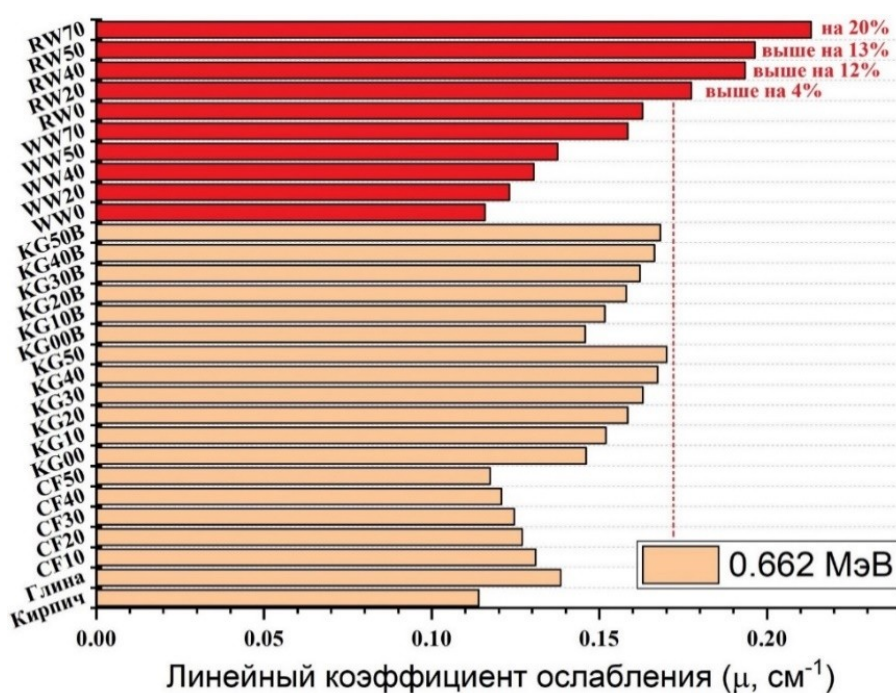


Рисунок 7 - Сравнение линейного коэффициента ослабления образцов радиационно-защитного материала матрицей из глины

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.9>

Используя правило смешивания, массовый коэффициент ослабления определяется по формуле:  $\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ , где  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  — коэффициент массового ослабления  $i$ -го элемента исследуемых образцов,  $w_i$  — массовая доля для каждого элемента.

На основе химического состава при помощи базы данных XCOM так же были определены массовый коэффициент ослабления для данных образцов (рис. 8, 9) [11].



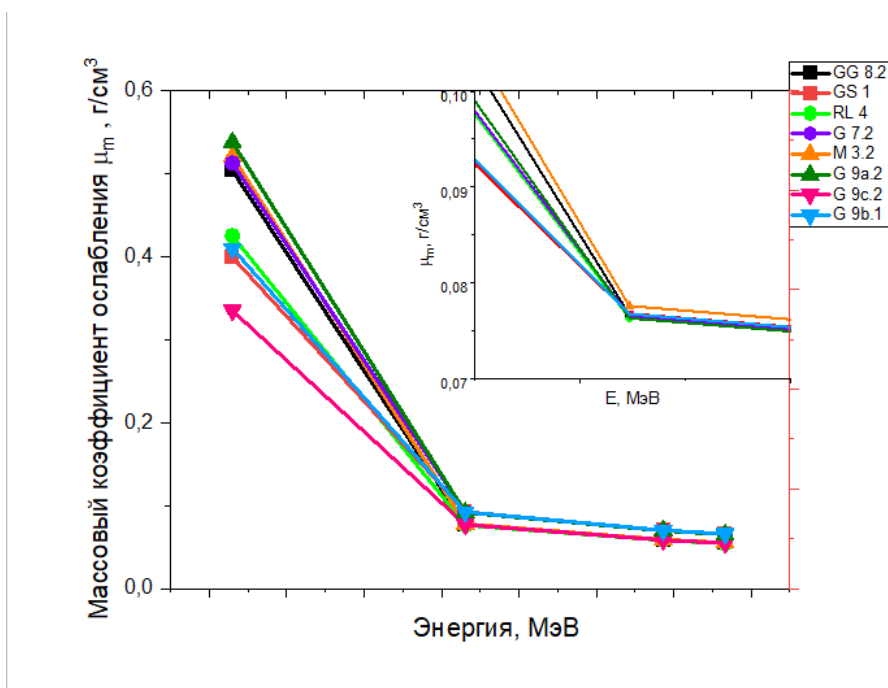


Рисунок 8 - Зависимость массового коэффициента ослабления от энергии гамма-излучения для камней  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.10>

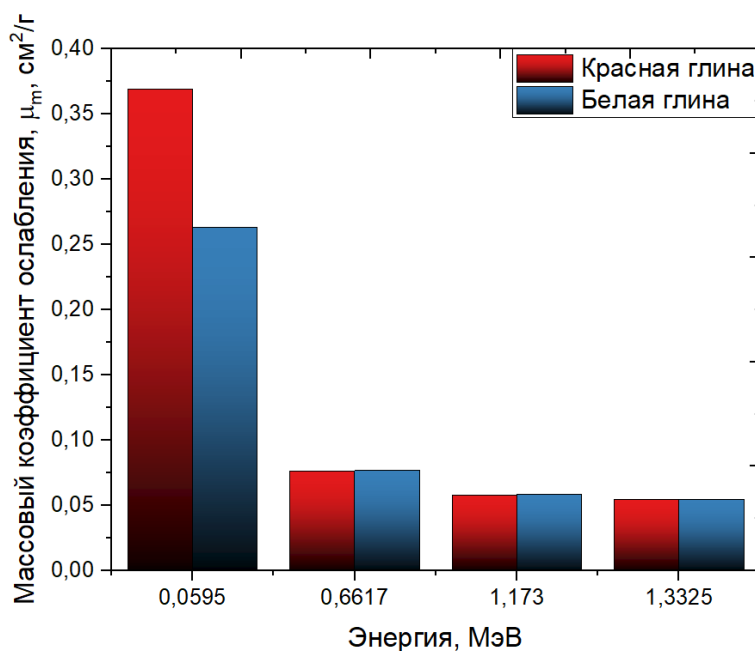


Рисунок 9 - Зависимость массового коэффициента ослабления от энергии гамма-излучения для образцов из глины  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.11>

## Результаты

Проведенные исследования выявили значительные различия в защитных характеристиках изученных образцов. Наибольшей эффективностью экранирования ионизирующего излучения обладает образец GG 8.2 (зеленый гранит), что подтверждается его максимальными значениями линейного и массового коэффициентов ослабления, а также минимальной толщиной слоя половинного ослабления среди всех тестируемых материалов. Эти исключительные свойства обусловлены уникальным элементным составом данного образца, включающим повышенную концентрацию высокоэффективных тяжелых элементов, его высокой объемной плотностью и наличием кристаллических фаз с плотной упаковкой атомов.

В противоположность этому, образец G 9b.1 (обычный гранит) продемонстрировал значительно меньшую эффективность защиты. Полученные данные убедительно свидетельствуют о наличии прямой корреляции между тремя ключевыми факторами: концентрацией тяжелых элементов в составе минерала, плотностью материала и его радиационно-защитной эффективностью. Эти результаты имеют важное практическое значение для разработки новых поколений защитных материалов на основе природных минералов с оптимизированным составом, позволяя целенаправленно подбирать сырьевые компоненты для создания эффективных радиационных экранов.

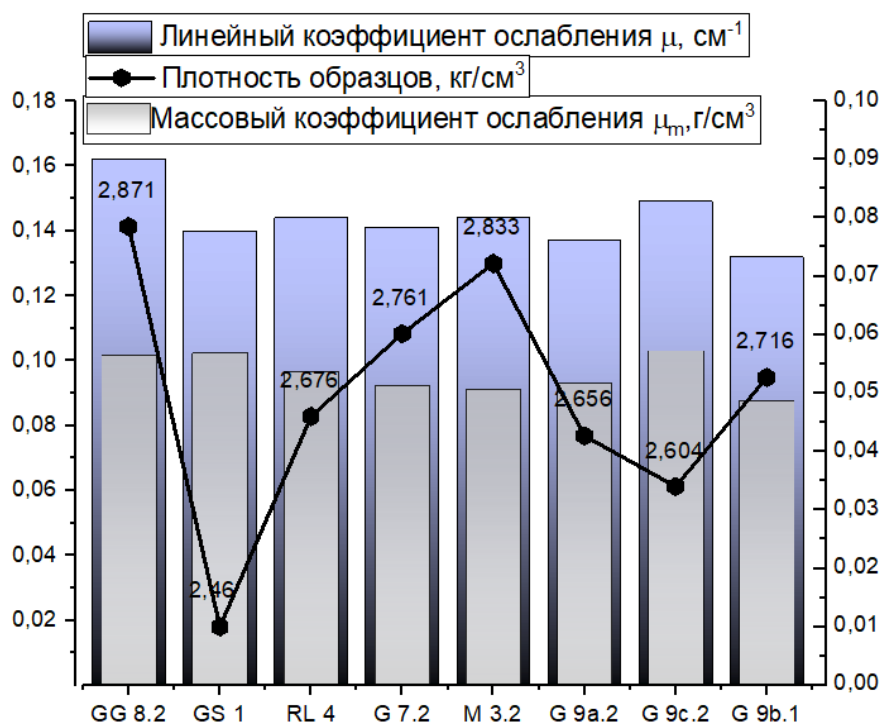


Рисунок 10 - Массовые коэффициенты, линейные коэффициенты и плотности образцов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.5.12>

Экспериментальные исследования продемонстрировали значительное улучшение защитных характеристик вьетнамских глиняных материалов против  $\gamma$ -излучения при применении двух взаимодополняющих подходов. В ходе исследования установлено, что увеличение давления прессования с 7,61 до 114,22 МПа приводит к существенному улучшению радиационной защиты. Для образцов из красной глины (PR серия) линейный коэффициент ослабления увеличился на 32% при энергии  $\gamma$ -квантов 0,66 МэВ и на 36% при 1,33 МэВ, с соответствующим уменьшением слоя половинного ослабления на 24% и 27%. Аналогичные, хотя и менее выраженные изменения наблюдались для белой глины: рост коэффициента ослабления на 14–17% и снижение HVL на 12–15% в том же энергетическом диапазоне.

Параллельно исследовалось влияние введения промышленных металлических отходов (до 70% по массе) на защитные свойства композитов. Композиты на основе красной глины (RW серия) показали увеличение коэффициента ослабления на 24% при 0,66 МэВ и на 16% при 1,33 МэВ, с уменьшением HVL на 24% и 17% соответственно. Для композитов из белой глины (WW серия) эти показатели составили 27% и 21% для коэффициента ослабления, 27% и 20% для HVL при тех же энергиях излучения.

Физический анализ выявил два основных механизма улучшения защитных свойств: механическое уплотнение приводит к уменьшению пористости и увеличению плотности упаковки частиц, в то время как введение металлических добавок повышает эффективный атомный номер материала и создает дополнительные центры рассеяния излучения. Полученные результаты подтверждают перспективность комбинированного подхода, сочетающего механическое уплотнение и модификацию состава, для создания эффективных радиационно-защитных материалов на основе местного сырья. Особенно важно, что оба метода позволяют значительно улучшить защитные свойства при сохранении экологической безопасности и экономической целесообразности производства.

### Заключение

Комплексные исследования подтвердили высокую эффективность применения местных вьетнамских материалов для задач радиационной защиты. Особый интерес представляет зеленый гранит марки GG 8.2 из месторождения Сапа, демонстрирующий исключительные защитные характеристики благодаря уникальному минеральному составу с повышенным содержанием тяжелых элементов (железо, свинец, вольфрам) и оптимальной кристаллической структурой. Данный материал рекомендован в качестве высокоэффективного наполнителя для специальных бетонов при строительстве объектов атомной инфраструктуры, включая энергоблоки АЭС, исследовательские реакторы и хранилища радиоактивных материалов.

Параллельно разработаны инновационные композитные материалы на основе красной глины, превосходящие зарубежные аналоги по ключевым параметрам. Эти композиты особенно перспективны для создания модульных защитных конструкций, мобильных экранов и быстровозводимых сооружений.

Полученные результаты создают научную основу для развития национальной программы радиационной безопасности Вьетнама, эффективно сочетая передовые научные разработки с практическим использованием местных минеральных ресурсов. Это открывает новые перспективы для строительства атомных объектов следующего поколения с оптимизированными характеристиками защиты при значительной экономии средств.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Егоров Ю.А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций: учебное пособие для вузов / под общ. ред. Н. А. Доллежалы / Ю.А. Егоров. — Москва: Энергоатомиздат, 1982. — 272 с.
2. Арбузов В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. — Санкт-Петербург: СПбГУИТМО, 2008. — 284 с.
3. Бормотов А.Н. Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, Ю.М. Баженов и др. — Москва: Палеотип, 2006. — 272 с.
4. Ташлыков О.Л. Оптимизация состава радиационной защиты / О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, А.Ф. Михайлова и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2015. — №4. — С. 36–42. — DOI: 10.26583/npe.2015.4.04
5. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: справочник / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоатомиздат, 1995. — 496 с.
6. Михайлова А.Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А.Ф. Михайлова, О.Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. — 2018. — Т. 9. — №4. — С. 393–401. — DOI: 10.1134/S2079562918040140
7. Тхыонг В.Т. Анализ состояния энергетической структуры и оценка условий для развития атомной энергетики во Вьетнаме / В.Т. Тхыонг, О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин и др. // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). — 2023. — №2. — С. 43–53.
8. Isfahani H.S. Investigation on gamma-ray shielding and permeability of clay-steel slag mixture / H.S. Isfahani, S.M. Abtahi, M.A. Roshanzamir et al. // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2019. — Vol. 78. — P. 4589–4598. — DOI: 10.1007/s10064-018-1391-6
9. Echeweozo E.O. Investigation of kaolin - Granite composite bricks for gamma radiation shielding / E.O. Echeweozo, A.D. Asiegbu, E.L. Efurumibe // International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology. — 2021. — Vol. 3. — P. 194–199. — DOI: 10.1016/j.jandt.2021.09.007
10. Isfahani H.S. Permeability and Gamma-Ray Shielding Efficiency of Clay Modified by Barite Powder / S.H. Isfahani, S.M. Abtahi, M.A. Roshanzamir et al. // Geotechnical and Geological Engineering. — 2019. — Vol. 37. — P. 845–855. — DOI: 10.1007/s10706-018-0654-0
11. Tashlykov O.L. An extensive experimental study on the role of micro-size pozzolana in enhancing the gamma-ray shielding properties of high-density polyethylene / O.L. Tashlykov, V. Yu Yarkov, I.I. Milman et al. // Radiation Physics and Chemistry. — 2023. — №212. — Article 111079. — DOI:10.1016/j.radphyschem.2023.111079

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Egorov Yu.A. Osnovy' radiacionnoj bezopasnosti atomny'x e'lektrostantsij: uchebnoe posobie dlya vuzov / pod obshh. red. N. A. Dollezhal'ya [Fundamentals of radiation safety of nuclear power plants: a textbook for universities / under the general editorship of N.A. Dollezhal'] / Yu.A. Egorov. — Moscow: E'nergoatomizdat, 1982. — 272 p. [in Russian]
2. Arbuzov V.I. Osnovy' radiacionnogo opticheskogo materialovedeniya [Fundamentals of radiation optical materials science] / V.I. Arbuzov. — Saint Petersburg: SPbGUITMO, 2008. — 284 p. [in Russian]
3. Bormotov A.N. Polimerny'e kompozicionny'e materialy' dlya zashchity' ot radiacii [Polymer composite materials for radiation protection] / A.N. Bormotov, A.P. Proshin, Yu.M. Bazhenov et al. — Moscow: Paleotip, 2006. — 272 p. [in Russian]
4. Tashlikov O.L. Optimizatsiya sostava radiatsionnoi zashchiti [Optimization of radiation protection composition] / O.L. Tashlikov, S.E. Shcheklein, A.F. Mikhailova et al. // Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika [Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika]. — 2015. — №4. — P. 36–42. — DOI: 10.26583/npe.2015.4.04 [in Russian]
5. Mashkovich V.P. Zashchita ot ioniziruyushchikh izluchenii: spravochnik [Protection from ionizing radiation: a handbook] / V.P. Mashkovich, A.V. Kudryavtseva. — 4th edition, revised and enlarged — Moscow: Energoatomizdat, 1995. — 496 p. [in Russian]
6. Mikhailova A.F. Puti realizatsii printsipa optimizatsii v radiologicheskoi zashchite personala [Ways to implement the principle of optimization in radiological protection of personnel] / A.F. Mikhailova, O.L. Tashlikov // Yadernaya fizika i

inzhiniring [Nuclear Physics and Engineering]. — 2018. — Vol. 9. — №4. — P. 393–401. — DOI: 10.1134/S2079562918040140 [in Russian]

7. Tkhiong V.T. Analiz sostoyaniya energeticheskoi strukturi i otsenka uslovii dlya razvitiya atomnoi energetiki vo Vetname [Analysis of the state of the energy structure and assessment of conditions for the development of nuclear energy in Vietnam] / V.T. Tkhiong, O.L. Tashlykov, S.E. Shcheklein et al. // Alternativnaya energetika i ekologiya (ISJAEE) [ Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)]. — 2023. — №2. — P. 43–53. [in Russian]

8. Isfahani H.S. Investigation on gamma-ray shielding and permeability of clay-steel slag mixture / H.S. Isfahani, S.M. Abtahi, M.A. Roshanzamir et al. // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2019. — Vol. 78. — P. 4589–4598. — DOI: 10.1007/s10064-018-1391-6

9. Echeweozo E.O. Investigation of kaolin - Granite composite bricks for gamma radiation shielding / E.O. Echeweozo, A.D. Asiegbo, E.L. Efurumibe // International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology. — 2021. — Vol. 3. — P. 194–199. — DOI: 10.1016/j.jandt.2021.09.007

10. Isfahani H.S. Permeability and Gamma-Ray Shielding Efficiency of Clay Modified by Barite Powder / S.H. Isfahani, S.M. Abtahi, M.A. Roshanzamir et al. // Geotechnical and Geological Engineering. — 2019. — Vol. 37. — P. 845–855. — DOI: 10.1007/s10706-018-0654-0

11. Tashlykov O.L. An extensive experimental study on the role of micro-size pozzolana in enhancing the gamma-ray shielding properties of high-density polyethylene / O.L. Tashlykov, V. Yu Yarkov, I.I. Milman et al. // Radiation Physics and Chemistry. — 2023. — №212. — Article 111079. — DOI:10.1016/j.radphyschem.2023.111079