

Оригинальная статья / Original article

УДК 539.166

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-2-118-131>

Ослабление гамма-излучения композиционными материалами с наночастицами Bi_2O_3

А.П. Кузьменко¹✉, В.В. Родионов¹, М.А. Пугачевский², А.В. Кочура¹,
А.И. Колпаков¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
ул. Керченская, д.1 А/1, г. Москва 117303, Российская Федерация

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Резюме

Цель – комплексная характеристика композиционных материалов с Bi_2O_3 , предназначенных для радиационной защиты биологических объектов и компонентов электронного оборудования от гамма-излучения в диапазоне энергий до 662 кэВ.

Методы. Экспериментальные образцы композиционного материала цилиндрической формы изготовлены из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА с добавлением либо порошка Bi_2O_3 , либо со смесью Bi_2O_3 и ZnO в равном молярном соотношении. Характеризация их проводилась методами атомно-силовой и сканирующей (растровой) электронной микроскопии, а также энергодисперсионного и рентгенофазового анализа. Сравнивалось ослабление гамма-излучения лабораторного источника ^{137}Cs мощностью до 10 мкЗв/ч по интенсивности скорости счёта модулей газоразрядных счетчиков Гейгера – Мюллера СБМ20-1, заключенных в оболочку из композиционного материала и без него.

Результаты. С применением наноинструментария и структурного анализа определен гранулометрический состав наполнителей и распределение их в эпоксидной матрице, а также структура наночастиц оксидов висмута и цинка. С помощью источника гамма-излучения определены линейный и массовый коэффициенты ослабления композиционного материала, а также слой половинного ослабления полученных покрытий.

Заключение. В композиционном поглотителе на основе либо порошка Bi_2O_3 , либо со смесью Bi_2O_3 и ZnO в указанном диапазоне гамма-излучения задействованы два механизма взаимодействия: фотоэффект и комптоновское рассеивание. При использовании веб-базы данных XCOM: Photon Cross Sections Database для всех композиционных материалов с учётом их химической формулы и массового содержания оценены спектральные диапазоны основных механизмов ослабления. Поглощение за счёт проявления фотоэффекта для композиционных материалов преобладает вплоть до 400 кэВ. Максимум излучения источника ^{137}Cs приходится на энергию фотонов при 662 кэВ, при котором массовые коэффициенты образцов с наночастицами Bi_2O_3 и со смесью Bi_2O_3 и ZnO равны с точностью до 10% и обусловлены эффектом Комптона.

Ключевые слова: гамма-излучение; наночастицы; массовый коэффициент ослабления; слой половинного ослабления.

Конфликт интересов: Кузьменко А.П. является членом редакционной коллегии журнала «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии» с 2015 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Пугачевский М.А. является членом редакционной коллегии журнала «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии» с 2022 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ *а/з* № FENM2025-0008.

Для цитирования: Ослабление гамма-излучения композиционными материалами с наночастицами Bi_2O_3 / А.П. Кузьменко, В.В. Родионов, М.А. Пугачевский, А.В. Кочура, А.И. Колпаков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2026. Т. 16, № 2. С. 118-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-2-118-131>.

Поступила в редакцию 06.05.2026

Подписана в печать 01.06.2026

Опубликована 30.06.2026

Attenuation of gamma radiation by composite materials with nanoparticles Bi_2O_3

Aleksander P. Kuzmenko^{1✉}, Vladimir V. Rodionov¹, Maxim A. Pugachevsky²,
Aleksey V. Kochura¹, Artem I. Kolpakov¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

1 A/1 Kerchenskaya Str., Moscow, 117303, Russian Federation

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Abstract

Purpose – comprehensive characterization of composite materials with Bi_2O_3 intended for radiation protection of biological objects and electronic equipment components from gamma radiation in the energy range up to 662 keV.

Methods. Experimental cylindrical composite material samples were made from epoxy-diane resin ED-20 with PEPA hardener, supplemented with either Bi_2O_3 powder or a mixture of Bi_2O_3 and ZnO in equal molar ratios. They were characterized using atomic force microscopy and scanning electron microscopy, as well as energy-dispersive analysis and phase analysis. The attenuation of gamma radiation from a laboratory source ^{137}Cs with a power of up to 10 $\mu\text{Sv/h}$ was compared with the count rate intensity of gas-discharge Geiger-Müller counter modules SBM20-1, both encased in a composite material and without it.

Results. Using nano instruments and structural analysis, the particle size distribution of the fillers and their distribution within the epoxy matrix were determined, as well as the structure of bismuth and zinc oxide nanoparticles. Using a gamma ray source, the linear and mass attenuation coefficients of the composite material, as well as the half-value layer of the resulting coatings, were determined.

Conclusion. In a composite absorber based on either Bi_2O_3 powder or a mixture of Bi_2O_3 and ZnO, two interaction mechanisms are involved in the specified gamma-ray range: the photoelectric effect and Compton scattering. Using the XCOM: Photon Cross Sections Database web database, the spectral ranges of the primary attenuation mechanisms were estimated for all composite materials, taking into account their chemical formula and mass content. Absorption due to the photoelectric effect predominates for composite materials up to 400 keV. The maximum emission from the ^{137}Cs source occurs at a photon energy of 662 keV, at which the mass coefficients of the samples with these powders are approximately equal to within 10%, due to the Compton effect.

Keywords: gamma radiation; nanoparticles; mass attenuation coefficient; half-value layer.

Conflict of interest. Kuzmenko A.P. is a member of the editorial board of the journal "Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies" since 2015, but has nothing to do with the decision to publish this article. Pugachevsky M.A. is a member of the editorial board of the journal "Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies" since 2022, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors did not declare any other conflicts of interest.

Funding: This study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, State Contract No. FENM2025-0008.

For citation: Kuzmenko A.P., Rodionov V.V., Pugachevsky M.A., Kochura A.V., Kolpakov A.I. Attenuation of gamma radiation by composite materials with nanoparticles Bi_2O_3 . *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2026;16(2):118-131. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-2-118-131>.

Received 06.05.2026

Accepted 01.06.2026

Published 30.06.2026

Введение

Защита от радиации является критически важным аспектом современной технологической и промышленной безопасности и базируется на трех фундаментальных принципах, один из которых заключается в экранировании физическими преградами. Высокоэнергетические гамма- и рентгеновское излучения, обладающие большой проникающей способностью, активно поглощаются веществами с высокой плотностью, для увеличения которой возможно использование тяжелых элементов и / или снижение уровня аморфности [1]. Было замечено, что материалы, содержащие элементы с высоким атомным номером (такие как Pb, Bi и Ba) в бетоне, сплавах [2], полимерах [3] и т. д., демонстрируют высокую поглощающую способность при ионизирующем излучении. Но при планировании строительства радиационных больниц, медицинских и исследовательских центров необходимо использовать радиационно-защитные строительные материалы, безвредные для работников и пациентов. Материалы, содержащие металлический свинец [4], могут накапливаться в крови и костях, а также во внутренних органах при вдыхании их пыли. В [5] представлены результаты определения ослабления оксидом свинца (II) в эпоксидной смоле гамма-излучения от радиоизотопов ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{60}Co с диапазоном энергий от 80 кэВ до 1,332 МэВ. Однако практическое использование оксидов свинца также затруднено его опасностью для человека, т. к. при вдыхании приводят к серьёзным отравлениям и

смерти. Существуют некоторые соединения свинца, которые могут быть относительно нетоксичными, например, практически нерастворимый в воде и в слабых кислотах сульфид свинца PbS. Но рассчитанный коэффициент пропускания гамма-излучения с помощью программного обеспечения CalcZAF у PbS заметно высокий [6].

Висмут считается одним из самых безопасных тяжелых металлов, поэтому включение его в материалы для защиты от рентгеновского [7] и гамма-излучения [8] представляет собой эффективный и безопасный подход [9]. Но при бесконтрольном приеме высоких доз (особенно в виде лекарств) он токсичен и может вызывать поражение внутренних органов и центральной нервной системы. Наиболее оптимальными порошковыми наноматериалами для создания защитных материалов, обладающими как эффективными защитными противорадиационными свойствами, так и одновременно легкостью, пластичностью и безопасностью для человека, являются оксиды висмута (III) Bi_2O_3 [10], в том числе в смеси с также безопасными оксидами цинка – ZnO [11]. При моделировании в ПО CalcZAF пропускание 10-миллиметрового слоя чистых оксидов свинца PbO и PbO_2 при энергиях до 662 кэВ составляет до 33,5% в сравнении с нетоксичным Bi_2O_3 до 34,3% [6], что показывает его высокий потенциал замены токсичных оксидов свинца.

Желтовато-белый кристаллический оксид висмута является нетоксичным полупроводником p-типа с высокой плотностью ($8,9 \text{ г/см}^3$) [11], широко используе-

мый в качестве наполнителя, защищающего от гамма-излучения в различных матрицах. В [12] показано увеличение более чем на 6,5% коэффициента поглощения тяжелого бетона, легированного наночастицами оксида висмута концентрацией до 6,0%, при облучении его источниками ^{137}Cs и ^{60}Co . Другое исследование [13] сравнивало добавление 40 мас. % нано- и микропорошков Bi_2O_3 к раствору поливинилацетата. После высыхания суспензии наночастицы демонстрировали лучшую дисперсию, чем микрочастицы, что приводило к хорошим свойствам экранирования гамма-излучения, механическим свойствам и самовосстановлению. Увеличение ослабления гамма-излучения полученными нанокompозитами достигало 7% и 5% при энергиях 1,17 МэВ и 1,33 МэВ соответственно. Наночастицы Bi_2O_3 , включенные в состав сверхвысокомолекулярного полиэтилена, в количестве до 2,0 мас.%, показали эффективное ослабление излучения с энергиями 30,8 и 383,9 кэВ [14]. Кроме того, композиты из полиимида при добавлении оксида висмута повышают не только поглощение гамма-излучения, но и свою термическую стабильность [15].

В данной работе в качестве бессвинцовых экологически чистых и устойчивых экранов были изучены полимерные нанокompозиты, изготовленные легированием эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА наночастицами либо Bi_2O_3 концентрацией 64 мас. %, либо смесью Bi_2O_3 и ZnO [16] в соотношении 44,6% и 7,8% соответственно. Измерения параметров экранирования приготовленными образцами с Bi_2O_3 гамма-излучения от лабораторного источника ^{137}Cs с энергией фотонов до 662 кэВ происходило в автоматическом режиме счетчиком Гейгера – Мюллера СБМ20-1, установленным на модуле RadSens.

Материалы и методы

Оксидные порошки Bi_2O_3 и ZnO использовались при создании композиционных материалов (КМ) цилиндрической

формы с внутренней полостью. Синтез КМ происходил на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамин (ПЭПА) при доле наполнителя из гомогенных порошков оксидных наночастиц висмута Bi_2O_3 65 мас. % или Bi_2O_3 и ZnO 52,4 мас. % в соотношении 44,6% и 7,8%. Для формирования изделий из КМ с заданной формой и размерами использовалась полиэтилентерефталатная пленка, которая после полимеризации КМ образовывала гладкие, однородные внешние поверхности.

Характеризация исходных порошков Bi_2O_3 и ZnO и полученных КМ осуществлялась методами атомно-силовой микроскопии (AistNT SmartSPM); рентгенофазового анализа (GBC EMMA, $\text{Cu K}\alpha$, 2θ от 20° до 60°); сканирующей (растровой) электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным энергодисперсионным пространственным анализом (JEOL JSM LV6610 + Oxford Instruments X-Max, 20 мм^2) в пределах площади поверхности скола со стороной 50 мкм.

Диаметр отверстия внутри образцов КМ и их высота позволяли размещать соответственно газоразрядные счетчики Гейгера – Мюллера СБМ20-1 (рис. 1). Использован лабораторный источник гамма-излучения на основе радиоизотопа Цезия-137 с максимальными мощностью излучения до 10 мкЗв/ч, энергией до 662 кэВ и периодом полураспада 30,1 года. Интенсивность прошедшего через коллиматор гамма-излучения поглощенного разработанным материалом, регистрировалась счетчиком СБМ20-1, размещенным на универсальном дозиметре-радиометре модульного форм-фактора RadSens. Регистрация импульсов, алгоритмы расчета и передача данных реализованы платой микроконтроллера в автоматическом режиме. Напряжение между электродами счетчика СБМ20-1 составляет 400 В, а номинальная импульсная его чувствительность к гамма-излучению, нормированная по источнику ^{137}Cs [17], составляет $(67,5 \pm 7,5)$ имп./мкР и, соответственно, мощность дозы излучения до

40 мкР/с. Влияние «мертвого времени», составляющего не более 190 мкс и позволяющего регистрировать без потери импульсов в моменте более 5000 имп./с, на измерения интенсивности гамма-излучения

минимально для всех измерений, поэтому не учитывалось. Фиксация теневого фона (темного значения каждого из счётчиков) происходило перед каждым измерением.

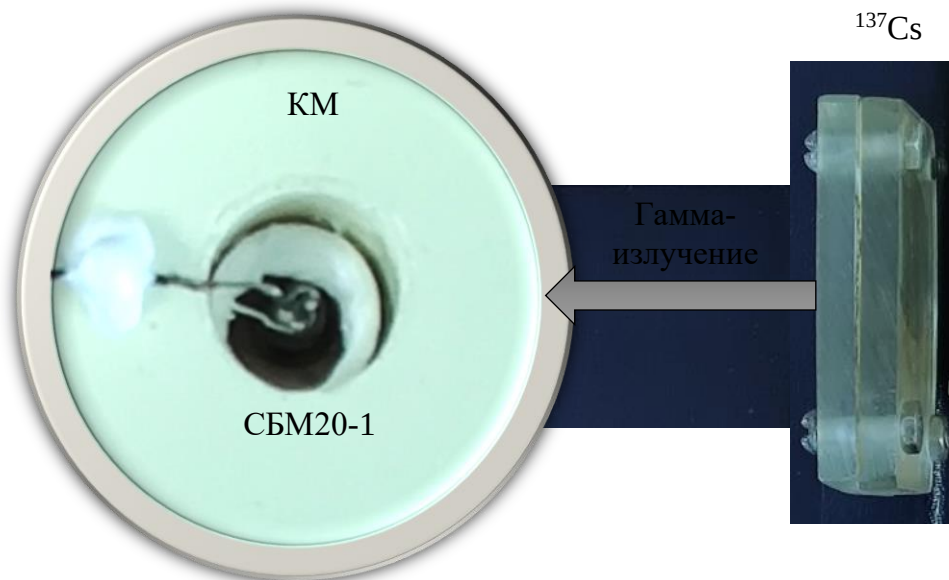


Рис. 1. Схема регистрации гамма-излучения от источника ^{137}Cs счетчиком СБМ20-1 внутри полого цилиндра КМ

Fig.1. Scheme of registration of gamma radiation from a ^{137}Cs source by the counter SBM20-1 inside a hollow cylinder KM

Расчет интенсивности излучения RAD выполнялся автоматизированно с опорой на паспортную среднюю чувствительность $p_{\text{ср}}$ счетчика СБМ20-1 к гамма-излучению от источника ^{226}Ra , спектр энергий гамма-излучения при распаде которого превышает используемый ^{137}Cs :

$$\text{RAD} = N \frac{60 \text{ мин} \cdot 60 \text{ с}}{p_{\text{ср}} \cdot dT}, \quad (1)$$

где dT – временной интервал регистрации импульсов; N – количество импульсов; за-регистрированных за время dT .

Противорадиационные свойства КМ определяются линейным коэффициентом ослабления (ЛКО) $\mu = (\ln I_0 - \ln I)/x$ (см^{-1}) [2] и наиболее применяемым массовым коэффициентом ослабления (МКО) $\mu^* = \mu/\rho$ ($\text{см}^2/\text{г}$). Для расчёта μ^* измеряются величины интенсивности исходного излучения I_0 и излучения I , прошедшего через КМ, его плотности ρ и толщины слоя x . Наибольшая часть поглощения излучения

происходит на внутренних электронах атомов в составе КМ, поэтому не зависит от фазового состава образца. Фактически расчеты проводятся по формуле $\mu^* = \sum \mu_i^* r_i$ с индексом суммирования по всем элементам в составе КМ с соответствующими μ_i^* и их массовым содержанием r_i .

Другие параметры защиты от излучения, такие как средняя длина свободного пробега (СДСП), слой половинного ослабления (СПО) и слой десятикратного ослабления (СДО), также могут быть получены с использованием ЛКО (μ). СДСП – это среднее расстояние между двумя последовательными взаимодействиями. СПО и СДО выражают толщину образца, при которой половина и одна десятая часть излучения, попадающего в материал, должны быть уменьшены в соответствии с ЛКО. Эти параметры были рассчитаны с использованием следующих уравнений:

$$\text{СДСП} = \frac{1}{\mu}; \text{СПО} = \frac{\ln 2}{\mu}; \text{СДО} = \frac{\ln 10}{\mu}. \quad (2)$$

Эффективность радиационной защиты (ЭРЗ) материала в минимизации воздействия ионизирующего излучения измеряет, насколько конкретный материал или устройство могут защитить людей или объекты от ионизирующего излучения [18]:

$$\text{ЭРЗ} = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \cdot 100\%. \quad (3)$$

Эффективность радиационной защиты строится на трех фундаментальных принципах: сокращение времени воздействия, увеличение расстояния до источника и толщины экранирующего препятствия.

Результаты и их обсуждение

Однофазные порошки оксидных наночастиц по данным атомно-силовой микроскопии имели размеры от 30 до 120 нм при среднем 90 нм для Bi_2O_3 (рис. 2, а) и от 40 до 90 нм при среднем размере 55 нм для ZnO (рис. 2, б). После смешивания в вакуумном гомогенизаторе с олигомерной эпоксидной смолой конечная плотность КМ на основе Bi_2O_3 составляла 3130 кг/м^3 и 2250 кг/м^3 для КМ на основе смеси Bi_2O_3 и ZnO .

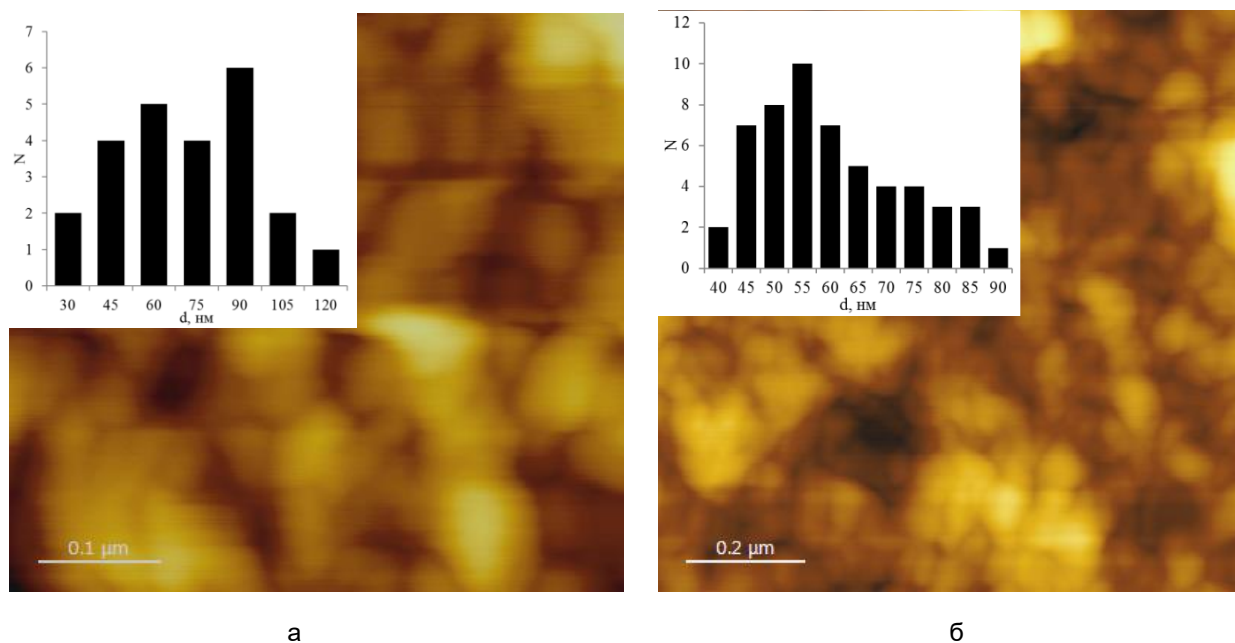


Рис. 2. Атомно-силовые микрофотографии КМ с гистограммами распределения по размерам наночастиц: а – Bi_2O_3 ; б – ZnO

Fig. 2. Atomic force micrographs of CM with histograms of the size distribution: а – Bi_2O_3 ; б – ZnO nanoparticles

Как показано в [19], наполненные наноразмерным оксидом висмута КМ при одинаковом содержании и толщине превосходят вплоть до 7% КМ с таким же по составу микропорошком в способности ослаблять гамма-лучи с сохранением упругих свойств материала.

Рентгеноструктурный фазовый анализ КМ с оксидом висмута (рис. 3, а) и КМ со смесью оксидов висмута и цинка (рис. 3, б) показал наличие аморфного гало на дифрак-

тограммах в диапазоне от 20° до 37° от полимерных фаз и высокую кристалличность минеральных наполнителей. Основные рефлексы $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ наблюдались при 2θ $27,41^\circ$ и $33,20^\circ$ от плоскостей (120) и (200) [20], соответствующие параметрам моноклинной решетки $a = 5,8444 \text{ \AA}$; $b = 8,1574 \text{ \AA}$; $c = 7,5032 \text{ \AA}$ и $\beta = 112,97^\circ$. Для оксида цинка рефлексы при 2θ $31,73^\circ$ и $36,23^\circ$ [16] соответствуют плоскостям (100) и (101) в гексагональной решетке с параметрами $a = 3,2533 \text{ \AA}$ и $c = 5,207 \text{ \AA}$.

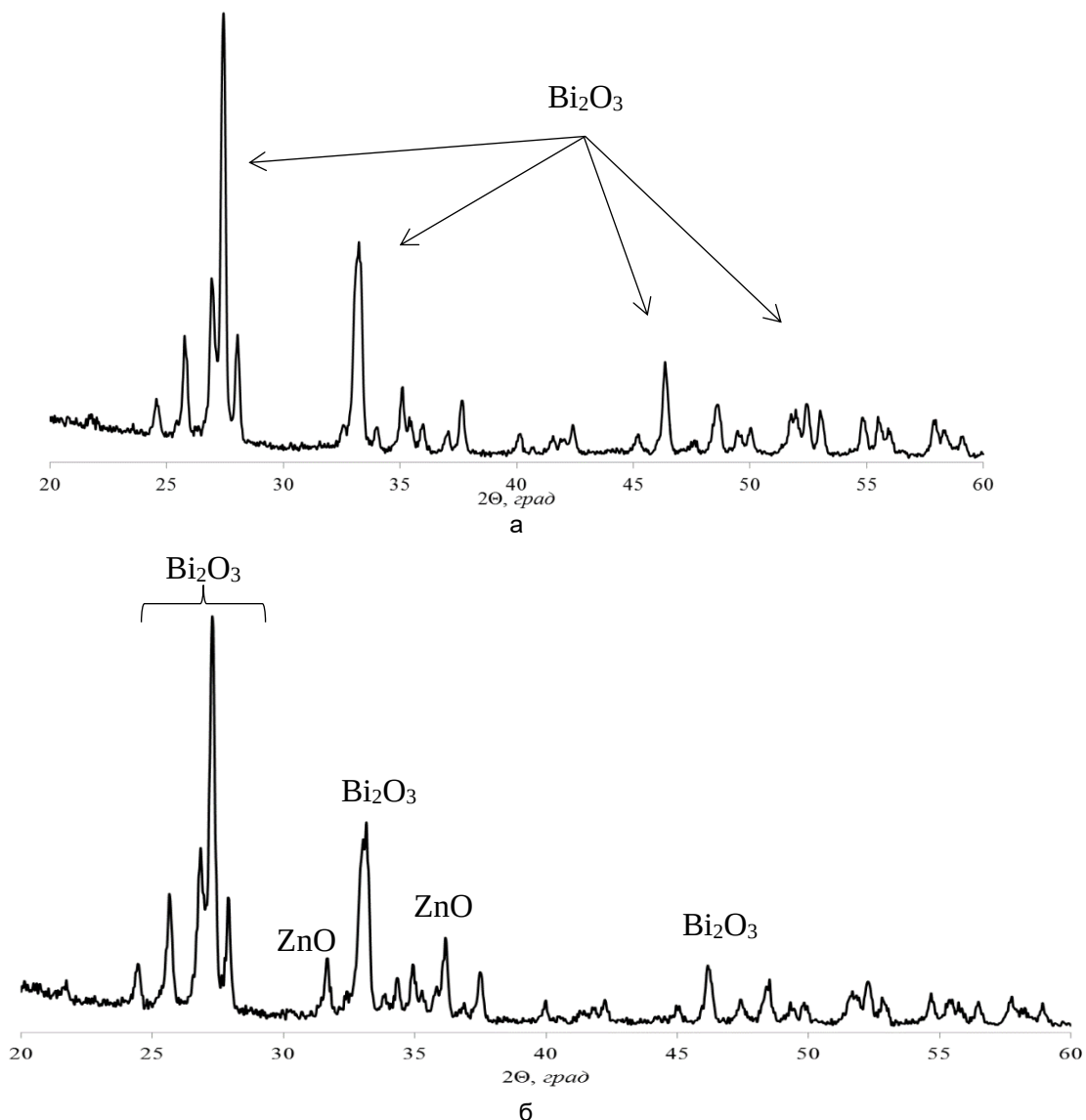


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы КМ с Bi₂O₃ (а) и со смесью Bi₂O₃ и ZnO (б)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of KM with Bi₂O₃ (a) and with a mixture of Bi₂O₃ and ZnO (б)

На основе уширений рефлексов от плоскостей (120) и (100), параллельных ребру c , в решетках α -Bi₂O₃ и ZnO размеры областей когерентного рассеивания (ОКР) d [21] рассчитаны с помощью уравнения Дебая – Шеррера:

$$d = \frac{k\lambda}{b \cos \theta} \text{ при } k_{(120)} = 1,34; k_{(100)} = 1,00,$$

где $\lambda = 0,154$ нм – длина волны линии $K\alpha$ характеристического рентгеновского излучения Cu; b – ширина на половине высоты максимума в радианах. Величины ОКР частиц оксидов висмута $d_{(120)}$ и цинка $d_{(100)}$ равны 48,76 нм и 35,29 нм, что соот-

ветствует размерам гранулометрического анализа по данным атомно-силовой микроскопии и указывают на агломерацию до 2-х или 3-х кристаллитов, содержащих до 70 атомных слоев.

Введение наполнителей с широким гранулометрическим распределением частиц (см. рис. 2) позволило минимизировать значение пористости и газопроницаемости (рис. 4, а и б). В КМ со смесью крупной фракции Bi₂O₃ (рис. 4, в) и мелкой фракции ZnO (рис. 4, г) может привести к значительному повышению физико-механических свойств.

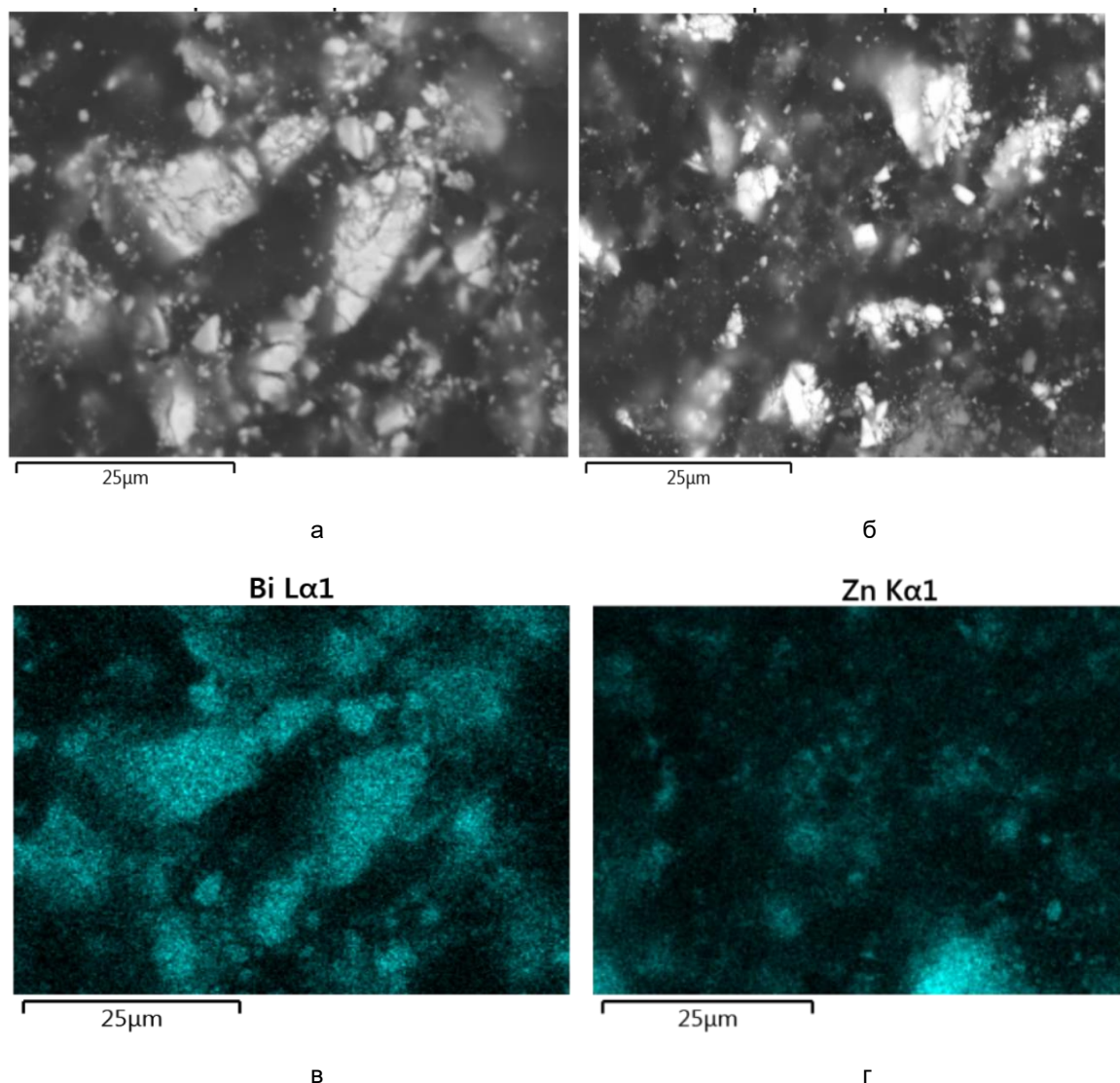


Рис. 4. Микроэлектронные фотографии (а, б) с распределением элементов Bi (в) и Zn (г) на поверхностях КМ

Fig. 4. Microelectronic photographs (a, б) with the distribution of elements Bi (в) and Zn (г) on the KM surfaces

Поглощение гамма-излучения всех КМ определено из величин ЛКО, рассчитанных как натуральный логарифм отношения интенсивностей гамма-излучения, регистрируемого счетчиками Гейгера без покрытия ($d = 0$) и с одним из покрытий. В расчёте на толщину $d = 1$ см КМ с части-

цами Bi_2O_3 и со смесью Bi_2O_3 и ZnO значения ЛКО равны $1,09 \text{ см}^{-1}$ и $1,07 \text{ см}^{-1}$, которые соответствуют МКО $0,35 \text{ см}^2/\text{г}$ и $0,44 \text{ см}^2/\text{г}$. Толщины СПО и СДО гамма-излучения для КМ с Bi_2O_3 равны $6,36 \text{ мм}$ и $2,11 \text{ см}$, а для КМ со смесью Bi_2O_3 с ZnO – $7,06 \text{ мм}$ и $2,35 \text{ см}$ соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики ослабления гамма-излучения КМ с Bi_2O_3 и со смесью Bi_2O_3 и ZnO

Table 1. Gamma-ray attenuation characteristics of KM with Bi_2O_3 and with a mixture of Bi_2O_3 and ZnO

Состав / Structure	ЛКО, см^{-1}	МКО, $\text{см}^2/\text{г}$	СПО, мм	СДО, см	СДСП, см	ЭРЗ, %
КМ с Bi_2O_3	1,09	0,35	6,36	2,11	0,92	66,4
КМ с Bi_2O_3 и ZnO	1,07	0,44	7,06	2,35	1,02	62,5

Для определения экспериментальной погрешности определения ЛКО можно использовать формулу, опирающуюся на значения относительных погрешностей интенсивностей счета без и с КМ (I_0 и I) и d [23]:

$$\Delta\mu = \frac{1}{x} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\ln \frac{I_0}{I}\right)^2 \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}, \quad (4)$$

где ΔI_0 , ΔI и Δd – погрешности экспериментальных измерений I_0 и I и d каждого из образцов КМ. Разброс относительной чувствительности (допустимый процент отклонения) счетчика СБМ20-1 от номинального значения составляет порядка 11%. С учётом $d = 1$ см получаем $\Delta\mu$ для КМ с Bi_2O_3 17,3% и для КМ со смесью Bi_2O_3 и ZnO 18,7%. Величины СПО, СДО и СДСП, характеризующие поглощение КМ гамма-излучения, получены прямыми расчетами из ЛКО, поэтому их относительные погрешности будут равными ЛКО. Относительная погрешность МКО по сравнению с ЛКО возрастает до 30%, т. к. зависит от двух величин, среди которых ρ , определяемая с точностью до 11%. Неопределенности, которые могут влиять на такие факторы, как статистика подсчета и наклон счетчика внутри КМ, не учитывались вследствие высокой механической и пространственной устойчивости применяемой конструкции (см. рис. 1).

Порошковые наполнители Bi_2O_3 и ZnO в диапазоне гамма-излучения от 0,1 МэВ до 0,7 МэВ в соответствии с данными веб-базы (XCOM Photon Cross Sections Database) Национального института стандартов и технологий (NIST), предназначенной для расчета сечений взаимодействия фотонов с веществами, имеют монотонный характер поглощения. Энергетические переходы составляющих КМ химических элементов: водород, углерод, кислород, цинк и висмут – в указанном диапазоне гамма-излучения не наблюдаются. Максимумы поглощения, соответствующие переходам К-серии, имеют энергию висмута: 0,09 МэВ, цинка

0,01 МэВ и соответствуют рентгеновскому излучению. Максимумы поглощения элементов, входящих в состав эпокси-диановой смолы ЭД-20 с химической формулой $\text{R-CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-R}$, где R – органический радикал, наблюдаются при энергиях менее 0,001 МэВ, а для водорода отсутствуют.

К механизмам взаимодействия гамма-излучения с веществом КМ можно отнести фотоэффект, комптоновское рассеяние и образование электрон-позитронных пар [5]. Каждый из трех процессов поглощения происходит независимо от других, поэтому массовый коэффициент поглощения μ^* состоит из трех слагаемых:

$$\mu^* = \tau/\rho + \mu/\rho + e/\rho,$$

где τ , μ , e – линейные коэффициенты поглощения, обусловленные соответственно фотоэффектом, комптоновским рассеянием, образованием электронно-позитронных пар [8]. При энергиях до 662 кэВ величина $e/\rho = 0$.

При фотоэффекте ЛКО определяется выражением

$$\tau = f_1(E_\gamma) \frac{Z^n \rho}{A}, \quad (5)$$

где f_1 – функция, зависящая от энергии фотона E_γ ; Z – атомный номер вещества; A – его атомная масса; ρ – плотность вещества. Расчеты показывают, что если принять $E_\gamma \leq 662$ кэВ одинаковую для элементов Zn и Bi , то $\tau/\rho(\text{Bi})$ в 30,3 раз больше $\tau/\rho(\text{Zn})$. Поглощение фотонов одинаковой энергии при фотоэффекте существенно возрастает с увеличением атомного номера вещества, поэтому композиты, содержащие висмут, имеют более выраженный механизм поглощения в виде фотоэффекта при энергиях несколько сотен килоэлектронвольт. Также вероятность фотоэффекта характеризуется сечением взаимодействия σ_ϕ , которое прямо пропорционально зарядовому числу ядра Z^n и обратно пропорционально энергии фотона E_γ^m , где n изменяется от 4 до 5, а m – от 3 до 4 (в зависимости от диапазона энергий

и оболочки). Поэтому использование материалов для поглощения гамма-излучения, содержащих висмут с $Z(\text{Bi}) = 83$, более выгодно в сравнении со свинцовыми аналогами с $Z(\text{Pb}) = 82$, т. к. $\sigma_{\text{ф}}(\text{Bi})$ выше $\sigma_{\text{ф}}(\text{Pb})$ при одинаковых n на величину до 27%.

При комптоновском рассеянии ЛКО можно представить в виде

$$y = f_2(E_{\text{Г}}) \frac{Z\rho}{A}, \quad (6)$$

где f_2 – функция, зависящая от $E_{\text{Г}}$. Согласно формуле (6) зависимость σ от природы вещества в основном определяется его плотностью, т. к. отношение Z/A мало отличается для элементов Bi и Zn. МКО комптоновского рассеяния y/ρ не зависит от плотности и $y/\rho(\text{Bi}) \approx \tau/\rho(\text{Zn})$. Таким образом, по данным NIST основным механизмом поглощения гамма-излучения всех КМ в диапазоне до примерно 400 кэВ является фотоэффект, а далее до 662 кэВ – эффект Комптона.

Выводы

Таким образом, определено ослабление композиционными материалами, изготовленными из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА с добавлением нанопорошков Bi_2O_3 или смеси Bi_2O_3 и ZnO , гамма-излучения от лабораторного источника ^{137}Cs мощностью до 10 мкЗв/ч по интенсивности скорости счёта модулей газоразрядных счетчиков Гейгера – Мюллера СБМ20-1. Линейный коэффициент ослабления без покрытия и с одним из покрытий в расчёте на толщину $d = 1$ см, эпоксидной смолы с частицами Bi_2O_3 и со смесью Bi_2O_3 и ZnO равны $1,09 \text{ см}^{-1}$ и $1,07 \text{ см}^{-1}$ соответственно. В поглотителях гамма-излучения задействованы два механизма взаимодействия: фотоэффект вплоть до примерно 400 кэВ и далее комптоновское рассеивание в диапазоне до 662 кэВ.

Список литературы

1. Control of structural parameters and thermal conductivity of BeO ceramics using heavy ion irradiation and post-radiation annealing / A.V. Trukhanov, A.L. Kozlovskiy, A.E. Ryskulov, V.V. Uglov, S.B. Kislitsin, M.V. Zdorovets [et al.] // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45, no. 12. P. 15412-15416. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.039>.
2. Gamma-ray attenuation properties of some heavy metal ferroalloys for potential applications / M. Büyükyıldız, S. Thakur, A. Levet, P. Kaur // *Progress in Nuclear Energy*. 2024. Vol. 176. P. 105382. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105382>.
3. Development of polymer composites in radiation shielding applications: a review / C. Zeng, Q. Kang, Z. Duan, B. Qin, X. Feng, H. Lu [et al.] // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2023. Vol. 33. P. 2191-2239. <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02725-6>.
4. Ihsani R.N., Gareso P.L., Tahir D. An overview of gamma radiation shielding: enhancements through polymer-lead (Pb) composite materials // *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. Vol. 218. P. 111619. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111619>.
5. Salawu M.A., Gbolahan J.A., Alabi A.B. Assessment of radiation shielding properties of polymer-lead (II) oxide composites // *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*. 2021. Vol. 3, no. 4. P. 423-428. <https://doi.org/10.46481/jnsps.2021.249>.
6. Armstrong J.T., Donovan J., Carpenter P. CALCZAF, TRYZAF and CITZAF: the use of multi-correction-algorithm programs for estimating uncertainties and improving quantitative X-ray analysis of difficult specimens // *Microscopy and Microanalysis*. 2013. Vol. 19, no. S2. P. 812–813.

7. Aygün H.H., Alma M.H Bismuth (III) oxide/polyethylene terephthalate nanocomposite fiber coated polyester spunbonds for ionizing radiation protection // *Applied Physics A*. 2020. Vol. 126, no. 9. P. 693. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03880-0>.
8. Gamma-ray protection properties of bismuth-silicate glasses against some diagnostic nuclear medicine radioisotopes: a comprehensive study / G. ALMisned, H.M.H. Zakaly, S.A.M. Issa, A. Ene, G. Kilic, O. Bawazeer [et al.] // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 21. P. 6668. <https://doi.org/10.3390/ma14216668>.
9. Bismuth modified gamma radiation shielding properties of titanium vanadium sodium tellurite glasses as a potent transparent radiation-resistant glass applications / M.H.M. Zaid, K.A. Matori, H.A.A. Sidek, I.R. Ibrahim // *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. Vol. 53, no. 4. P. 1323-1330. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.006>.
10. Антибактериальные и физико-химические свойства наночастиц серебра и оксида цинка / Р.И. Довнар, С.М. Смотров, С.С. Ануфрик, Т.Н. Соколова, С.Н. Анучин, Н.Н. Иоскевич // *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*. 2022. Т. 20, №1. С. 98-107. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2022-20-1-98-107>.
11. Validation of a new and cost-effective method for mercury vapor removal based on silver nanoparticles coating on micro glassy balls / H. Shirkhanloo, M. Osanloo, M. Ghazaghi, H. Hassani // *Atmospheric Pollution Research*. 2017. Vol. 8, no. 2. P. 359-365. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.10.004>.
12. An experimental investigation on combined effects of nano-WO₃ and nano-Bi₂O₃ on the radiation shielding properties of magnetite concretes / I.M. Nikbin, M. Shad, G.A. Jafarzadeh, S. Dezhampanah // *Progress in Nuclear Energy*. 2019. Vol. 117. P. 103103. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103103>.
13. Comparative mechanical, self-healing, and gamma attenuation properties of PVA hydrogels containing either nano- or micro-sized Bi₂O₃ for use as gamma-shielding materials / P. Tiamduangtawan, C. Kamkaew, S. Kuntanwatchara, E. Wimolmala, K. Saenboonruang // *Radiation Physics and Chemistry*. 2020. Vol. 177. P. 109164. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109164>.
14. A study of gamma attenuation property of UHMWPE/Bi₂O₃ nanocomposites / A.H. Abdalsalam, M.I. Sayyed, T.A. Hussein, E. Şakar, M.H.A. Mhareb, B.C. Şakar [et al.] // *Chemical Physics*. 2019. Vol. 523. P. 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2019.04.013>.
15. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Yastrebinsky R.N. Synthesis and radiation shielding properties of polyimide/Bi₂O₃ composites // *Heliyon*. 2019. Vol. 5, no. 5. P. e01703. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01703>.
16. Development of BaO–ZnO–B₂O₃ glasses as a radiation shielding material / N. Chanthima, J. Kaewkhao, P. Limkitjaroenporn, S. Tuscharoen, S. Kothan, M. Tungjai [et al.] // *Radiation Physics and Chemistry*. 2017. Vol. 137. P. 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.03.015>.
17. Туласынова Н.Ю., Дьячковский М.Р. Экологическая безопасность строительных материалов в жилых и общественных зданиях поселка Нижний Бестях // *Научно-исследовательские публикации*. 2022. №4. С. 25–27.
18. Investigation of gamma radiation shielding characteristics of bismuth reinforced ternary composites in wide photon energy region / H.G. Özdemir, M.R. Kaçal, F. Akman, H. Polat, O. Agar // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 208. P. 110924. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110924>.
19. Bismuth oxide films for X-ray shielding: effects of particle size and structural morphology / L. Yu, A.L.C. Pereira, D.N.H. Tran, A.M.C. Santos, D. Losic // *Materials Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 260, no.15. P. 124084. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124084>.

20. Structural studies of α - Bi_2O_3 by neutron powder diffraction / S.A. Ivanov, R. Tellgren, H. Rundlöf, V.G. Orlov // *Powder Diffraction*. 2001. Vol. 16, no. 4. P. 227–230. <https://doi.org/10.1154/1.1401200>.
21. Synthesis of bismuth oxide nanoparticles at 100°C / M.M. Patil, V.V. Deshpande, S.R. Dhage, V. Ravi // *Materials Letters*. 2005. Vol. 59, no. 19-20. P. 2523–2525. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.037>.
22. Bismuth oxide nanoparticles (Bi_2O_3 NPs) embedded into recycled- Poly(vinyl chloride) plastic sheets as a promising shielding material for gamma radiation / R.M. El-Sharkawy, F.S. Abdou, M.A. Gizawy, E.A. Allam, M.E. Mahmoud // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 208. P. 110838. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110838>.

References

1. Trukhanov A.V., Kozlovskiy A.L., Ryskulov A.E., Uglov V.V., Kislitsin S.B., Zdorovets M.V., et al. Control of structural parameters and thermal conductivity of BeO ceramics using heavy ion irradiation and post-radiation annealing. *Ceramics International*. 2019;45(12):15412-15416. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.039>.
2. Büyükyıldız M., Thakur S., Levet A., Kaur P. Gamma-ray attenuation properties of some heavy metal ferroalloys for potential applications. *Progress in Nuclear Energy*. 2024;176:105382. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105382>.
3. Zeng C., Kang Q., Duan Z., Qin B., Feng X., Lu H., et al. Development of polymer composites in radiation shielding applications: a review. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2023;33:2191-2239. <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02725-6>.
4. Ihsani R.N., Gareso P.L., Tahir D. An overview of gamma radiation shielding: enhancements through polymer-lead (Pb) composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024;218:111619. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111619>.
5. Salawu M.A., Gbolahan J.A., Alabi A.B. Assessment of radiation shielding properties of polymer-lead (II) oxide composites. *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*. 2021;3(4):423-428. <https://doi.org/10.46481/jnsps.2021.249>.
6. Armstrong J.T., Donovan J., Carpenter P. CALCZAF, TRYZAF and CITZAF: the use of multi-correction-algorithm programs for estimating uncertainties and improving quantitative X-ray analysis of difficult specimens. *Microscopy and Microanalysis*. 2013;19(S2):812-813.
7. Aygün H.H., Alma M.H. Bismuth (III) oxide/polyethylene terephthalate nanocomposite fiber coated polyester spunbonds for ionizing radiation protection. *Applied Physics A*. 2020;126(9):693. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03880-0>.
8. AlMisned G., Zakaly H.M.H., Issa S.A.M., Ene A., Kilic G., Bawazeer O., et al. Gamma-ray protection properties of bismuth-silicate glasses against some diagnostic nuclear medicine radioisotopes: a comprehensive study. *Materials*. 2021;14(21):6668. <https://doi.org/10.3390/ma14216668>.
9. Zaid M.H.M., Matori K.A., Sidek H.A.A., Ibrahim I.R. Bismuth modified gamma radiation shielding properties of titanium vanadium sodium tellurite glasses as a potent transparent radiation-resistant glass applications. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021;53(4):1323-1330. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.006>.
10. Dovnar R.I., Smotrin S.M., Anufrik S.S., Sokolova T.N., Anuchin S.N., Ioskevich N.N. Antibacterial and physicochemical properties of silver and zinc oxide nanoparticles *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* = *Journal of Grodno State Medical University*. 2022;20(1):98-107. (In Russ.) <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2022-20-1-98-107>.

11. Shirkhanloo H., Osanloo M., Ghazaghi M., Hassani H. Validation of a new and cost-effective method for mercury vapor removal based on silver nanoparticles coating on micro glassy balls. *Atmospheric Pollution Research*. 2017;8(2):359-365. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.10.004>.
12. Nikbin I.M., Shad M., Jafarzadeh G.A., Dezhampahan S. An experimental investigation on combined effects of nano-WO₃ and nano-Bi₂O₃ on the radiation shielding properties of magnetite concretes. *Progress in Nuclear Energy*. 2019;117:103103. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103103>.
13. Tiamduangtawan P., Kamkaew C., Kuntanwatchara S., Wimolmala E., Saenboonruang K. Comparative mechanical, self-healing, and gamma attenuation properties of PVA hydrogels containing either nano- or micro-sized Bi₂O₃ for use as gamma-shielding materials. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020;177:109164. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109164>.
14. Abdalsalam A.H., Sayyed M.I., Hussein T.A., Şakar E., Mhareb M.H.A., Şakar B.C., et al. A study of gamma attenuation property of UHMWPE/Bi₂O₃ nanocomposites. *Chemical Physics*. 2019;523:92-98. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2019.04.013>.
15. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Yastrebinsky R.N. Synthesis and radiation shielding properties of polyimide/Bi₂O₃ composites. *Heliyon*. 2019;5(5):e01703. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01703>.
16. Chanthima N., Kaewkhao J., Limkitjaroenporn P., Tuscharoen S., Kothan S., Tungjai M., et al. Development of BaO–ZnO–B₂O₃ glasses as a radiation shielding material. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017;137:72-77. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.03.015>.
17. Tulasynova N.Yu., Dyachkovsky M.R. Environmental safety of building materials in residential and public buildings of the Nizhny Bestyakh settlement *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii = Research publications*. 2022;(4):25–27. (In Russ.)
18. Özdemir H.G., Kaçal M.R., Akman F., Polat H., Agar O. Investigation of gamma radiation shielding characteristics of bismuth reinforced ternary composites in wide photon energy region. *Radiation Physics and Chemistry*. 2023;208:110924. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110924>.
19. Yu L., Pereira A.L.C., Tran D.N.H., Santos A.M.C., Losic D. Bismuth oxide films for X-ray shielding: Effects of particle size and structural morphology. *Materials Chemistry and Physics*. 2021;260(15):124084. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124084>.
20. Ivanov S.A., Tellgren R., Rundlöf H., Orlov V.G. Structural studies of α-Bi₂O₃ by neutron powder diffraction. *Powder Diffraction*. 2001;16(4):227-230. <https://doi.org/10.1154/1.1401200>.
21. Patil M.M., Deshpande V.V., Dhage S.R., Ravi V. Synthesis of bismuth oxide nanoparticles at 100 °C. *Materials Letters*. 2005;59(19-20):2523-2525. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.037>.
22. El-Sharkawy R.M., Abdou F.S., Gizawy M.A., Allam E.A., Mahmoud M.E. Bismuth oxide nanoparticles (Bi₂O₃ NPs) embedded into recycled-Poly(vinyl chloride) plastic sheets as a promising shielding material for gamma radiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2023;208:110838. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110838>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Aleksander P. Kuzmenko, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Родионов Владимир Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

Vladimir V. Rodionov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

Пугачевский Максим Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нанооптики и плазмоники Центра фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823

Maksim A. Pugachevskii, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Research of the Laboratory of Nano-Optics and Plasmonics of Center for Photonics and Two-Dimensional Materials, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823

Кочура Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: akochura@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7941-8404

Aleksey V. Kochura, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Deputy Director of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: akochura@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7941-8404

Колпаков Артём Игоревич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru, ORCID: 0009-0004-8571-8544

Artem I. Kolpakov, Postgraduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru, ORCID: 0009-0004-8571-8544