

*На правах рукописи*



**РОМАНИЮК ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**ПОЛИМЕРНЫЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ,  
НАПОЛНЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯМИ ВИСМУТА И БОРА**

**Специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Белгород – 2026**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»

Научный руководитель:	<b>Черкашина Наталья Игоревна</b> доктор технических наук, доцент
Официальные оппоненты:	<b>Варлачев Валерий Александрович</b> доктор технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», и.о. заведующего лабораторией №33 Ядерного реактора  <b>Нещименко Виталий Владимирович</b> доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Амурский государственный университет», и.о. директор института компьютерных и инженерных наук
Ведущая организация:	ФГБУ Н «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе» Российской академии наук

Защита состоится «19» марта 2026 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.06 при ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ им. В. Г. Шухова и на сайте [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Romanyuk](https://gos_att.bstu.ru/dis/Romanyuk)

Автореферат разослан «21» января 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Н.И. Бондаренко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Радиационная опасность является одной из ключевых проблем длительных космических миссий. При проектировании Российской орбитальной станции (РОС), которая будет функционировать на высокоширотной орбите, особое внимание уделяется повышенному уровню радиации, характерному для полярных областей. В этих регионах интенсивность потоков заряженных частиц и вторичных нейтронов значительно выше, чем на орбите Международной космической станции (МКС), что приводит к увеличению дозовых нагрузок на экипаж и оборудование. Как показывает практика полетов на МКС в среднем мощность эквивалентной дозы в жилом отсеке составляет 0,3–0,8 мЗв/сут. При среднем значении 0,5 мЗв/сут для годового полета это дает практически десятикратное превышение соответствующего норматива персонала атомных предприятий. При средней массе модуля космической станции, составляющей порядка 20 т., не представляется практически возможным уменьшать радиационные нагрузки на космонавта увеличением толщины защиты стенок модулей. В настоящее время применяемые защитные материалы эффективно снижают дозы от электронов и протонов, однако узким местом остаётся защита от нейтронного и вторичного гамма-излучения, которое формируется при взаимодействии высокоэнергетических заряженных частиц с материалами станции. Наименее защищенным отсеком на российском сегменте МКС является каюта, предназначенная для отдыха космонавтов.

Используемые в настоящее время материалы защиты на российском сегменте МКС представлены в виде водосодержащих целлюлозных материалов. Они защищают от нейтронного излучения, но малоэффективны для защиты от гамма-излучения.

В связи с этим актуальна разработка новых радиационно-защитных композитов на основе полимерной матрицы, которые будут обладать не только нейтронно-защитными характеристиками, но и защитой от гамма-излучения.

**Работа выполнена** в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект № FZWN-2024-0001), программы «Приоритет 2030» и целевого задания НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина (ГК «Роскосмос»; гос. рег. ТЗ №007-39/2021).

**Степень разработанности темы.** Вопросы защиты от ионизирующего излучения, в том числе нейтронного и гамма-излучения в космическом пространстве, имеют особое значение. На данный момент этот вопрос недостаточно полно изучен, исходя из современных источников литературы, как российских, так и зарубежных.

Недостаточно данных о взаимодействии тяжелых минеральных наполнителей с полимерной матрицей, что затрудняет прогнозирование механических и радиационных характеристик получаемых композитов. Это

создает необходимость дополнительных исследований по оптимизации состава и методик получения радиационно-защитных материалов для космических аппаратов.

Применяемые на МКС водосодержащие целлюлозные материалы по типу салфеток, мало эффективны в защите от гамма-излучения, что требует их замены. Разрабатываемая в настоящее время РОС должна стать национальной альтернативой МКС после завершения её эксплуатации. Согласно официальным заявлениям Роскосмоса, первый модуль РОС планируется запустить не ранее 2028. В связи с этим необходима разработка новых композиционных материалов для защиты от космической радиации, в том числе нейтронного излучения, обеспечивающих оптимальное сочетание защитных свойств, механической прочности, массогабаритных характеристик и устойчивости в условиях космоса.

Совокупность данных проблем требует пересмотра методов создания, а также использования радиационно-защитных материалов на орбитальной станции.

**Цель работы:** Разработка и физико-химическое обоснование путей повышения радиационно-защитных характеристик полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена, наполненных карбидом бора и оксидом висмута, для комплексной защиты от нейтронного и гамма-излучения

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Разработка технологии получения радиационно-защитных композитов на основе полиэтилена высокого давления (ПВД) с добавлением карбида бора и оксида висмута, обеспечивающей равномерное распределение наполнителей и однородность структуры за счёт криогенной механоактивации.

2. Изучение физико-химических и микроструктурных изменений композитов, включая формирование межфазной границы, механизма структурной стабилизации и влияние механоактивации на радиационно-защитные и механические свойства материала.

3. Исследование механизмов взаимодействия разработанных композитов с нейтронным и гамма-излучением при помощи математического моделирования на базе физических формул библиотеки GEANT4. Определение энергетических распределений потоков, полных и пороговых сечений, а также определение вклада замедляющих, поглощающих и рассеивающих механизмов.

4. Верификация результатов численного моделирования на основе результатов экспериментальных исследований радиационно-защитных характеристик композитов в диапазоне энергий нейтронов 0,025 эВ – 16 МэВ и гамма-излучения 0,2 – 9,0 МэВ.

5. Проведение оценки радиационной деградации и установление механизмов структурных и химических изменений композитов после облучения.

**Научная новизна.** Впервые предложен и обоснован механизм гомогенизации компонентов смеси ПВД, оксида висмута и карбида бора в криогенной мельнице, заключающийся в их механоактивации, обеспечивающей равномерное распределение частиц наполнителей в полимерной матрице и формирование активных поверхностей взаимодействия, что способствует повышению радиационно-защитных и механических характеристик композита.

Выявлены различия в механизмах ослабления нейтронов композитом оптимального состава (ПВД – 55 масс. %,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  – 40 масс. %,  $\text{B}_4\text{C}$  – 5 масс. %). Тепловые нейтроны эффективно поглощаются за счёт ( $n, \alpha$ )-реакций в  $\text{B}_4\text{C}$ , тогда как в области быстрых нейтронов основной вклад в ослабление вносит неупругое рассеяние и частичное поглощение нейтронов ядрами висмута по каналам ( $n, n'\gamma$ ) и ( $n, 2n$ ), что приводит к снижению интенсивности потока и генерации вторичных  $\gamma$ -квантов. Показано, что введение оксида висмута в состав композита обеспечивает значительное преимущество перед борированным ПВД при защите от  $\gamma$ -излучения за счёт возрастания вклада фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электронно-позитронных пар, что приводит к снижению плотности потока  $\gamma$ -квантов на 30–80 % по сравнению с борированным полиэтиленом.

Обоснована эффективность введения оксида висмута в состав полимерного композита благодаря повышению радиационной стойкости материала: тяжёлые ядра Bi, обладающие высоким атомным номером и эффективным сечением комптоновского рассеяния, частично поглощают энергию ионизирующего излучения, снижая плотность радиационно-индуцированных дефектов в полиэтиленовой матрице, что уменьшает вероятность разрыва связей C–H и C–C. В результате, после облучения композита нейтронами до флюенса  $2,6 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> (0,7–0,8 кГр) прочность на изгиб снижается незначительно: (с 5,5 МПа исходного оптимального состава до 5,1 МПа), а при  $\gamma$ -облучении ( $E_\gamma = 1,25$  МэВ,  $D = 1$  кГр) до 5,3 МПа.

**Теоретическая и практическая значимость.** Сформулированы научные основы разработки технологии полимерных радиационно-защитных композитов на основе ПВД, оксида висмута и карбида бора, обеспечивающие оптимальные физико-механические свойства и комплексную защиту от нейтронного и  $\gamma$ -излучения.

Разработаны состав и технология получения композита оптимального состава (ПВД – 55 масс. %,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  – 40 масс. %,  $\text{B}_4\text{C}$  – 5 масс. %), подтверждённые патентом РФ № 2799773.

Математическое моделирование и экспериментальные исследования (GEANT4) подтвердили высокую эффективность комбинированного наполнителя, обеспечивающего значительное снижение потока нейтронного и  $\gamma$ -излучения в широком диапазоне энергий.

Полученные результаты использованы при выполнении государственного контракта ГК «Роскосмос» (ТЗ № 007-39/2021) в рамках реализации Целевой работы «Защитный композит» на РС МКС.

Полученные результаты использованы в учебном процессе – при подготовке аспирантов, обучающихся по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

**Методология и методы исследования.** Для разработанных радиационно-защитных композитов применены следующие современные методы исследования: рентгенофазовый анализ (РФА), ИК-Фурье спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), гранулометрический анализ. Испытания на изгиб проводились с помощью испытательной машины РЕМ-100. Для ультразвукового исследования применяли прибор ПУЛЬСАР-2.

Проведены экспериментальные измерения ослабления нейтронного и гамма-излучений композитом на предприятии ООО «ЦЕНТР АЦП» (г. Москва). Источником быстрых нейтронов и  $\gamma$ -квантов являлся точечный изотропный источник  $^{252}\text{Cf}$  с энергетическим спектром близким к спектру деления  $^{235}\text{U}$ . В качестве детектора использовали спектрометр-дозиметр типа SDMF-1608SN. Оценка радиационно-защитных свойств от гамма-излучения представлена теоретическими расчетами и практическими испытаниями, включая испытания материалов на гамма-источниках  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , с энергиями 0,570; 0,662; 1,252 МэВ соответственно в лаборатории радиационного контроля «Спектр» БГТУ им. В.Г. Шухова.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности влияния криогенной механоактивации полимерной матрицы на механические свойства радиационно-защитных композитов.
2. Разработанные составы и технология получения полимерных композиционных материалов на основе ПВД, наполненных оксидом висмута и карбидом бора для обеспечения комплексной защиты от нейтронного и гамма-излучений.
3. Выявление, с использованием математического моделирования, оптимальных составов полимерных композитов, обеспечивающих эффективное ослабление нейтронного и  $\gamma$ -излучения.
4. Результаты исследования механизмов радиационной деградации структуры и свойств разработанных композитов под воздействием нейтронного и гамма-излучений.

**Достоверность результатов работы.** Достоверность полученных результатов обусловлена широким комплексом проведенных экспериментальных исследований с использованием современного сертифицированного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, использованием аттестованных методик и методов моделирования. Полученные автором результаты не противоречат известным литературным

данным, опубликованным в российских и зарубежных источниках.

**Внедрение результатов исследований.** Разработаны ТУ «Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора» (ТУ 22.21.42.140-333-02066339-25). Дата введения в действие 23.07.2025.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты использованы при выполнении государственного контракта ГК «Роскосмос» (ТЗ № 007-39/2021) в рамках реализации Целевой работы «Защитный композит» на РС МКС. Совместно с НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, ПАО «РКК Энергия» им. С.П. Королева и ИМБП РАН.

Результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики». Утверждено 23.07.2025.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: на Всероссийской конференции «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2021); Международном научно-техническом форуме XIV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2022); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 300-летию Российской академии наук» (Белгород, 2022); Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2023 г); IV International Scientific and Practical Conference «The Future of Knowledge: Issues of Development of Science, Technology and Society» Melbourne, (Australia 2025); IX Международной научно-практической конференции «Наука. Образование. Инновации: новые подходы и актуальные исследования» (Анапа, 2025); Международной научно-практической конференции «Научный поиск: Проблемы, Векторы, Перспективы» (Петрозаводск, 2025).

**Публикации.** Основные положения изложены в 19 научных публикациях, в том числе: 6 работ – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в зарубежных изданиях, индексируемых международными библиографическими базами Scopus и Web of Science (Q1). Получен патент на изобретение РФ № 2799773.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. При выполнении диссертационной работы автор принимал участие в постановке задач, выполнении всех экспериментов и анализе полученных экспериментальных результатов, в том числе в разработке программ экспериментов по радиационному облучению и исследованию образцов из полимерных композитов. За достижение особых успехов в научно-исследовательской деятельности в области пилотируемой космонавтики ракетно-космической отрасли РФ награжден персональной стипендией им. Ю.А.

Гагарина по итогам всероссийского конкурса НИИ Центра подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина (ГК «Роскосмос») на 2023/2024 уч. г.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка и приложений. Диссертация содержит 203 страницы машинописного текста, включающего 55 рисунков, 17 таблиц, список литературы из 111 наименований и 5 приложений.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проведения исследований в области создания полимерных композиционных материалов, обладающих высокими защитными характеристиками от нейтронного и гамма-излучения, которые могут найти применение в радиационной защите космических аппаратов. Сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

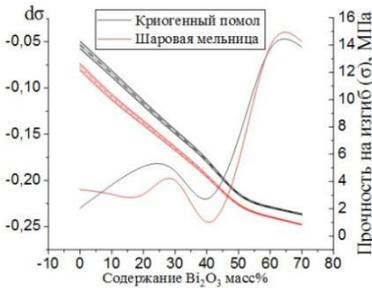
**В первой главе** рассмотрены особенности радиационной обстановки в космосе, а также существующие методы защиты от нейтронного и гамма-излучения. Показано, что используемые решения не обеспечивают достаточной эффективности в условиях смешанных полей и требуют замены на более технологичные материалы. Обоснована перспективность применения многокомпонентных композиционных материалов на основе полиэтилена, обладающего водородной насыщенностью, в сочетании с наполнителями, поглощающими нейтронное и гамма-излучение. Выделены основные проблемы: неоднородность распределения компонентов, трудности технологического подбора режимов прессования, а также недостаточная изученность процессов криогенного измельчения при получении таких композитов. В связи с этим **научная гипотеза** заключается в том, что введение в полиэтиленовую матрицу наполнителей оксида висмута и карбида бора с использованием криогенной обработки инициирует механизм механоактивации, который позволяет получить эффективный радиационно-защитный материал в условиях космического излучения.

**Во второй главе** представлена характеристика применяемых материалов, используемых в разработке композиционных радиационно-защитных материалов. В качестве полимерной матрицы использован ПВД. Наполнителями выбраны оксид висмута и карбид бора. Описаны используемые физико-химические и радиационные методы исследования, включая СЭМ, ИК-Фурье спектроскопию, рентгенофазовый анализ, термогравиметрию, а также оборудование для гамма и нейтронного облучения радиационно-защитных композитов.

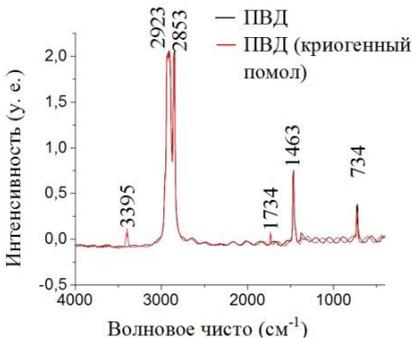
**В третьей главе** представлены результаты разработки технологии получения радиационно-защитных полимерных композиционных материалов. Основное внимание уделено подбору оптимального состава и режимов переработки, включая температуру, давление и длительность прессования.

По зависимости прохождения скорости ультразвука (22 кГц) в материале от давления, а также температуры формования опытных образцов выявлено, что оптимальными параметрами прессования являются давление 20 МПа и температура 150 °С.

Проведены исследования по подбору оптимального содержания  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  в композитных материалах и выявлению преимущества криогенного помола перед стандартным методом смешивания компонентов в шаровой мельнице, которое отображается в прочности композита при испытании на изгиб (рисунок 1). Установлено, что при содержании 40 масс. %  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  достигается допустимое значение прочности для конструкционного материала. Поэтому оптимальным выбрали содержание  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  40 масс. %. При использовании криогенного помола, прочность на изгиб на  $17 \pm 2$  % выше, чем при смешивании в шаровой мельнице.



**Рисунок 1** – Зависимость прочности на изгиб от содержания наполнителя



**Рисунок 2** – ИК-Фурье спектр ПВД до и после криогенного помола

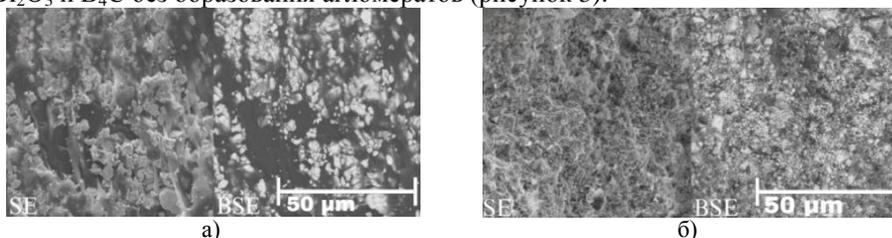
Установлено, что криогенный помол полиэтиленовой матрицы сопровождается механоактивацией, что подтверждается изменениями в ИК-Фурье спектрах до и после обработки (рисунок 2).

Одним из наиболее показательных признаков является появление полосы поглощения в области  $3395 \text{ см}^{-1}$ , которая соответствует валентным колебаниям гидроксильных групп (O–H). Так же на спектре появляется новая полоса в области  $1734 \text{ см}^{-1}$ , соответствующая карбонильным группам (C=O). Установлено, что механоактивация сопровождается ростом свободной поверхностной энергии и образованием активных центров, что повышает адгезию к наполнителям ( $\text{Vi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_4\text{C}$ ) и усиливает межфазное связывание. Повышенная дисперсность и активированная поверхность полиэтилена обеспечивают равномерное распределение твёрдых фаз наполнителей в объёме композита.

По литературным данным, такие изменения также повышают радиационную стойкость материала за счёт увеличения числа рекомбинационных центров,

компенсирующих радиационно-индуцированные дефекты.

Микроструктурные исследования композита с содержанием наполнителя  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  40 масс. % подтверждают его однородность и отсутствие дефектов. Установлено, что использование криогенного помола позволяет получить частицы ПВД с размером 5–6 мкм и обеспечить равномерное распределение  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{V}_4\text{C}$  без образования агломератов (рисунок 3).



**Рисунок 3** – СЭМ-изображения излома композита с содержанием 40 масс. %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  при различном увеличении и способе смешивания компонентов: *а* – шаровая мельница; *б* – криогенная мельница

**В четвёртой главе** представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования нейтронозащитных свойств полимерных композитов (таблица 1). Для расчётов использовался программный пакет Geant4, позволивший проследить взаимодействие нейтронного излучения с материалами в диапазоне энергий от 0,025 до 16 МэВ. В модели использовался образец с размерами  $1 \times 8 \times 8$  см, что соответствует толщине защитного слоя 1 см.

**Таблица 1** – Доля прошедших нейтронов (Ratio, %) в зависимости от энергии и состава материала

Энергия	ПВД Чистый	$\text{V}_4\text{C}$ 1 масс. %	$\text{V}_4\text{C}$ 3 масс. %	$\text{V}_4\text{C}$ 5 масс. %	$\text{V}_4\text{C}$ 10 масс. %
0,025 эВ	58,98	36,37	16,19	7,72	1,310
0,4 эВ	73,92	60,21	44,46	34,34	19,32
2 МэВ	95,54	95,38	95,32	95,31	95,14
16 МэВ	97,41	97,43	97,36	97,31	97,20

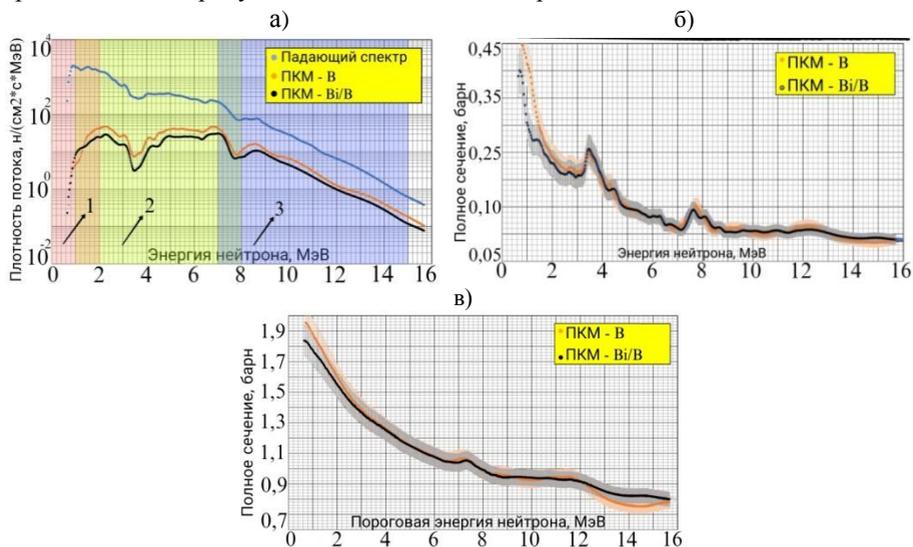
Моделирование показало, что эффективность ослабления нейтронного потока определяется как энергетическим диапазоном, так и содержанием карбида бора ( $\text{V}_4\text{C}$ ) в полиэтиленовой матрице. В области тепловых нейтронов (0,025 эВ) чистый полиэтилен пропускает около 59 % частиц, тогда как введение 5 масс. %  $\text{V}_4\text{C}$  снижает этот показатель до 7,7 %, а при 10 масс. % – до 1,3 %, что связано с высокой эффективностью изотопа  $^{10}\text{B}$ , обладающего сечением захвата тепловых нейтронов порядка 3800 барн. При энергии 0,4 эВ

наблюдается аналогичная тенденция: доля прошедших нейтронов уменьшается с 74 % у чистого полиэтилена до 34 % при 5 % наполнителя и 19 % при 10 %. Это свидетельствует о том, что даже небольшое увеличение концентрации  $V_4C$  значительно повышает эффективность композита в эпитепловом диапазоне.

В отличие от этого, в области быстрых нейтронов (2–16 МэВ) различия между составами минимальны: через материалы проходит более 95 % нейтронов независимо от содержания наполнителя. Данный эффект объясняется резким снижением сечений взаимодействия на высоких энергиях, когда вероятность захвата частиц мала, и ключевым фактором становится толщина материала и наличие замедляющих слоёв.

Сопоставление полученных данных позволило установить, что оптимальным является состав с 5 масс. %  $V_4C$ . Такой материал обеспечивает выраженное ослабление тепловых и эпитепловых нейтронов при сохранении технологичности, механической прочности и однородности структуры.

Экспериментально изучены нейтронно-защитные характеристики образца борированного (5 масс. %  $V_4C$ ) полиэтилена (ПКМ-В) и композита оптимального состава, содержащего 40 масс. %  $Bi_2O_3$  и 5 масс. %  $V_4C$  (ПКМ-В/Вi). Результаты измерений энергетических спектров быстрых нейтронов представлены на рисунке 4. Толщина обоих образцов составляла 15 см.



**Рисунок 4** – Нейтронозащитные характеристики ПКМ-В/Вi и ПКМ-В; синий – падающий спектр, коричневый – ПКМ-В/Вi, черный – ПКМ-В: *а* – плотности потока нейтронов: (1) – упругое рассеяние, (2) – неупругое рассеяние, (3) – зона ядерных реакций; *б* – полные сечения нейтронов; *в* – полные сечения от пороговой энергии нейтронов

Анализ энергетических распределений плотности потока нейтронов, а также полных и пороговых сечений взаимодействия для композитов ПКМ-В и ПКМ-Вi/В выполнен на основе экспериментальных данных, полученных при толщине образцов 15 см. Исследование позволило установить особенности ослабления нейтронного потока материалами различного состава.

Анализ энергетических распределений плотности потока нейтронов показал, что композит ПКМ-Вi/В обеспечивает более выраженное ослабление потока нейтронов во всём диапазоне энергий (0,025–16 МэВ) по сравнению с борированным полиэтиленом. Это обусловлено наличием тяжёлых ядер  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , способных эффективно рассеивать и частично поглощать быстрые нейтроны, что снижает их выходной поток. Полиэтиленовая матрица и борсодержащая добавка в составе ПКМ-В способствуют замедлению и захвату низкоэнергетических нейтронов, однако при энергиях выше 3 МэВ эффективность такого механизма ограничена. Введение оксида висмута обеспечивает дополнительный вклад за счёт неупругого рассеяния и формирования более сглаженного спектра взаимодействия.

На рисунке 4в представлены зависимости полных сечений взаимодействия нейтронов от их пороговой энергии. С ростом энергии наблюдается снижение полных сечений для обоих материалов, при этом кривая ПКМ-В расположена ниже из-за меньшей вероятности взаимодействия быстрых нейтронов с лёгкими ядрами полиэтилена и бора.

На основании экспериментальных данных, полученных при облучении образцов толщиной 15 см спектром нейтронов источника  $^{252}\text{Cf}$ , составлена таблица кратности ослабления нейтронного излучения (табл. 2). В расчётах использовались интегральные значения плотности потока по диапазонам энергий, что позволило корректно оценить эффективность исследуемых композитов в условиях реального спектра нейтронного излучения.

**Таблица 2** – Данные о кратности ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами

Материал	Кратность ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами при энергии нейтронов E, МэВ							
	0,81	1,1	2,0	4,0	7,0	10,0	13,0	16,0
<b>ПКМ-В</b>	1183,8 ±118,3	428,1 ±42,8	73,3 ±7,3	37,7 ±3,3	6,7 ±0,6	5,6 ±0,4	4,7 ±0,3	4,6 ±0,3
<b>ПКМ-В/i</b>	833,5 ±83,5	376,2 ±37,6	61,5 ±6,5	32,8 ±3,1	6,3 ±0,6	5,1 ±0,4	4,4 ±0,3	4,2 ±0,3

Получены ИК-Фурье спектры ПКМ-В/i до и после облучения нейтронами до флюенса  $2,6 \cdot 10^{11}$  н/см<sup>2</sup>. Анализ ИК-Фурье спектров показал, что после облучения нейтронами в композитном материале ПКМ-В/i произошли

следующие изменения: наблюдается незначительное разрушение углерод-водородных связей (C–H) и изменение химической структуры полиэтилена. Происходило образование гидроксильных групп ( $3569, 3305 \text{ см}^{-1}$ ) и карбонильных соединений ( $1724 \text{ см}^{-1}$ ), что указывает на радиационно-индуцированное окисление ПВД. Установлено изменение кристалличности полиэтилена, подтверждённое смещением полос поглощения при  $1466$  и  $718 \text{ см}^{-1}$ . Изменения в области  $500\text{--}400 \text{ см}^{-1}$  связаны с формированием радиационно-индуцированных дефектов на поверхности частиц  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  и  $\text{V}_4\text{C}$ .

**В пятой главе** рассматривается радиационная стойкость и радиационно-защитные характеристики разработанного композитного материала к гамма-облучению.

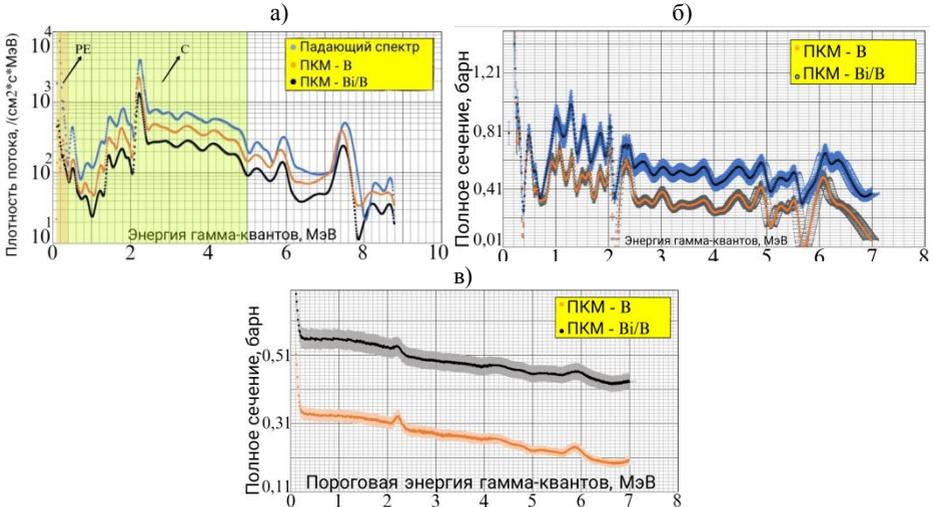
Представлены практические испытания композитного материала оптимального состава к гамма-излучению с использованием источников  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , с энергиями  $0,570$ ;  $0,662$ ;  $1,252 \text{ МэВ}$  соответственно и сравнение с борированным полиэтиленом, приготовленным по аналогичной технологии методом криогенного помола (таблица 3).

**Таблица 3** – Сравнительная характеристика защитных свойств композитов

Состав	Энергия, МэВ	$\mu$ , 1/см	$d_{1/2}$ , см	$\mu/\rho$ , $\text{см}^2/\text{г}$	Ослабление при 1 см, %
ПКМ-В/Vi	0,570	0,151	4,588	0,060	14,02
	0,662	0,134	5,157	0,053	12,57
	1,252	0,088	7,869	0,035	8,43
ПКМ-В	0,570	0,063	11,002	0,066	6,10
	0,662	0,058	11,951	0,061	5,63
	1,252	0,040	17,329	0,042	3,92

Сравнительный анализ линейных и массовых коэффициентов ослабления показал, что композит с оксидом висмута значительно эффективнее композита с карбидом бора при защите от гамма-излучения. Для энергии  $0,570 \text{ МэВ}$  коэффициент ослабления составил  $0,151 \text{ см}^{-1}$  для ПКМ-В/Vi и  $0,063 \text{ см}^{-1}$  для ПКМ-В. При энергиях  $0,662 \text{ МэВ}$  и  $1,252 \text{ МэВ}$  эта разница сохраняется. Толщина слоя половинного ослабления при  $1,252 \text{ МэВ}$  –  $7,87 \text{ см}$  для ПКМ-В/Vi против  $17,33 \text{ см}$  для ПКМ-В. При фиксированной толщине  $1 \text{ см}$  ПКМ-В/Vi снижает интенсивность гамма-излучения до  $8,43 \%$  ( $E=1,252 \text{ МэВ}$ ), тогда как ПКМ-В только до  $3,92\%$ . Приведённые данные демонстрируют более высокую радиационно-защитную эффективность композита ПКМ-В/Vi в области гамма-излучения в сравнении с ПКМ-В, что делает его предпочтительным для применения в условиях смешанных радиационных полей, где требуется защита, как от нейтронов, так и от гамма-излучения.

Анализ спектров  $\gamma$ -излучения до и после прохождения через композиты ПКМ-В и ПКМ-Вi/В (рисунок 5) показал, что добавление оксида висмута приводит к повышению эффективности  $\gamma$ -защиты по сравнению с борированным полиэтиленом. При энергии 0,570 МэВ линейный коэффициент ослабления для ПКМ-Вi/В составил  $0,151 \text{ см}^{-1}$  против  $0,063 \text{ см}^{-1}$  для ПКМ-В, что соответствует слоям половинного ослабления 4,59 и 11,0 см соответственно. Таким образом, при одинаковой толщине экрана композит с висмутом снижает поток  $\gamma$ -квантов более чем в два раза эффективнее.



**Рисунок 5** – Гамма-защитные характеристики ПКМ-В/Ви и ПКМ-В; синий – падающий спектр, коричневый – ПКМ-В/Ви, черный – ПКМ-В:

*а* – плотности потока нейтронов; (РЕ)-фотоэффект, (С)-Комптона эффект;  
*б* – полные сечения нейтронов; *в* – полные сечения от пороговой энергии нейтронов

В диапазоне энергий  $\gamma$ -квантов до 0,5 МэВ основным механизмом взаимодействия является фотоэффект. Благодаря этому ПКМ-Вi/В демонстрирует значения линейного коэффициента ослабления до  $0,56 \text{ см}^{-1}$ , что почти в два раза выше, чем у ПКМ-В ( $0,30 \text{ см}^{-1}$ ). В области 0,5–5 МэВ доминирует комптоновское рассеяние, где преимущество композита с висмутом сохраняется, хотя разница по величинам  $\mu$  снижается. При энергиях выше 4 МэВ начинает возрастать вклад процессов образования пар, и ПКМ-Вi/В также удерживает преимущество, демонстрируя значения  $\mu$  на уровне  $0,38\text{--}0,40 \text{ см}^{-1}$ , тогда как для ПКМ-В они составляют  $0,20\text{--}0,25 \text{ см}^{-1}$ .

Интегральный анализ показал, что полные сечения взаимодействия  $\gamma$ -излучения с ПКМ-Вi/В на 30–80 % выше, чем у ПКМ-В, во всём диапазоне энергий от 0,2 до 9,0 МэВ. Это обеспечивает более эффективное ослабление

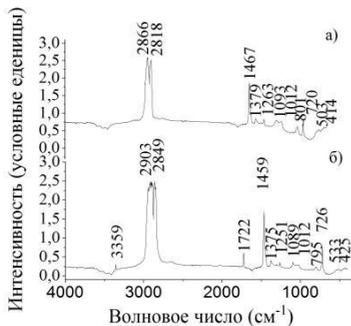
потока  $\gamma$ -квантов и формирует сглаженный спектр вторичного излучения, уменьшая вероятность локальных энергетических пиков. Таким образом, использование оксида висмута в составе полиэтиленовой матрицы позволяет обеспечить равномерную и стабильную  $\gamma$ -защиту в широком энергетическом диапазоне.

По результатам исследования эффективности ослабления  $\gamma$ -квантов композитами различного состава и толщиной 15 см составлена таблица 4, где приведены значения кратности ослабления потока излучения в диапазоне энергий от 0,2 до 9,0 МэВ.

**Таблица 4.** Данные о кратности ослабления потока гамма-квантов исследуемыми композитами

Материал	Кратность ослабления гамма-квантов исследуемыми материалами при энергии гамма-квантов E, МэВ							
	0,2	0,6	0,8	1,6	2,5	4,0	6,0	9,0
ПКМ-В	15,8 ±1,4	9,3 ±0,8	8,7 ±0,7	6,2 ±0,4	5,4 ±0,4	4,8 ±0,3	4,2 ±0,3	3,6 ±0,2
ПКМ-В/Вi	22,4 ±2,1	13,8 ±1,2	12,7 ±1,1	9,1 ±0,7	7,5 ±0,6	6,4 ±0,5	5,6 ±0,4	4,7 ±0,3

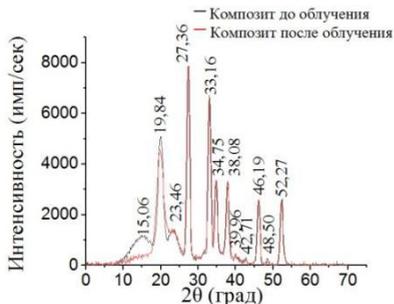
Сравнительный анализ ослабления  $\gamma$ -излучения показал, что композит ПКМ-В/Вi превосходит борированный полиэтилен (ПКМ-В) по эффективности защиты в диапазоне энергий от 0,2 до 9,0 МэВ. ПКМ-В/Вi показывает значительно более высокую кратность ослабления потока гамма-квантов по сравнению с ПКМ-В во всём исследованном диапазоне энергий. Так, при энергии 0,2 МэВ кратность ослабления для ПКМ-В/Вi составляет 22,4 тогда как для ПКМ-В лишь 15,8. При энергии 0,8 МэВ этот разрыв остается большим: 12,7 против 8,7 соответственно. Даже при энергиях 6–9 МэВ ПКМ-В/Вi сохраняет преимущество, что указывает на его высокую эффективность при защите от гамма-излучения средней и высокой энергии.



**Рисунок 6** – ИК-Фурье спектры композита ПКМ-В/Вi: а – до облучения; б – после гамма облучения

В облученном композите появляется новая полоса поглощения при  $3359 \text{ см}^{-1}$ . (рисунок 6). Это свидетельствует об образовании гидроксильных групп ( $-\text{OH}$ ), что характерно для радиационно-индуцированного окисления полиэтилена при наличии кислорода. Также в облученном композите появляется новая полоса

при  $1722\text{ см}^{-1}$ , которая отсутствовала в необлученном материале. Гамма-облучение привело к химическим и структурным изменениям композитного материала.



**Рисунок 7** – Рентгеновская дифрактограмма композита до и после гамма-облучения

радиационным разрушением кристаллитов полимерной матрицы. Это объясняется тем, что гамма-излучение инициирует процессы радиолитического разрыва макромолекулярных цепей, образование свободных радикалов и локальное увеличение аморфной составляющей.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

### Итоги выполненного исследования.

1. На основе экспериментальных и численных исследований выявлены закономерности формирования структуры и физико-химических свойств полимерных радиационно-защитных композитов на основе ПВД, оксида висмута и карбида бора. Разработаны принципы подбора технологических параметров смешивания, нагрева и формования, обеспечивающие достижение высоких физико-механических характеристик.

2. Установлено, что использование криогенного измельчения приводит к механоактивации полиэтиленовой матрицы, что, в свою очередь, активирует её поверхность, повышает химическую совместимость с наполнителями и сопровождается появлением полос гидроксильных ( $3395\text{ см}^{-1}$ ) и карбонильных ( $1734\text{ см}^{-1}$ ) групп, свидетельствующих о частичной деструкции цепей и образовании реакционно-активных центров. Эти изменения носят обратимый характер и нивелируются при термообработке, однако вносят вклад в повышение совместимости органической и неорганической фаз композита на стадии формования.

3. Определены физико-технологические параметры горячего прессования ( $T = 150\text{ °C}$ ,  $P = 20\text{ МПа}$ ), обеспечивающие структурную однородность и

После облучения ПКМ-В/Vi гамма-излучением изменений в дифрактограмме практически не наблюдается (рисунок 7). Основные дифракционные пики сохраняют своё положение, форму и интенсивность, что свидетельствует о сохранении кристаллической структуры как органической (ПВД), так и неорганической ( $\text{Vi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_4\text{C}$ ) фаз. Незначительное снижение интенсивности пиков полиэтилена, в частности в районе  $19,84^\circ$ , может быть связано с частичным

стабильность свойств композитов. Оптимальный состав включает 55 масс. % ПВД, 40 масс. %  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  и 5 масс. %  $\text{B}_4\text{C}$  (патент РФ № 2799773).

4. Экспериментально установлено ослабление нейтронного ( $E = 0,8\text{--}16,0$  МэВ) и гамма ( $E = 0,2\text{--}9,0$  МэВ) излучений при прохождении через композит оптимального состава: линейный коэффициент ослабления ПКМ-В/Ви при  $E_\gamma = 0,570$  МэВ составил  $0,151 \text{ см}^{-1}$ , в то время как у ПКМ-В – лишь  $0,063 \text{ см}^{-1}$ .

5. Показано, что композит ПКМ-Ви/В обладает структурным и физическим преимуществом по ослаблению  $\gamma$ -излучения (слой половинного ослабления 4,59 см против 11,0 см для ПКМ-В), а также обеспечивает более эффективное рассеяние и замедление нейтронов при энергиях выше 3–4 МэВ. При низких энергиях ( $< 2$  МэВ) преимущество сохраняет борированный полиэтилен, что подтверждает комплементарность защитных механизмов и перспективность их сочетания в многослойных системах.

6. На основе анализа энергетических спектров нейтронов ( $E \leq 16$  МэВ) установлено, что ПКМ-В/Ви обеспечивает более эффективное ослабление потока излучений в диапазоне энергий выше 3–4 МэВ по сравнению с борсодержащим материалом, демонстрируя лучшие значения полного сечения при высоких порогах, а ПКМ-В эффективен в тепловом и эпитепловом диапазоне ( $< 2$  МэВ), что делает их сочетание перспективным для многослойных конструкций.

Полученные результаты могут быть **рекомендованы** для использования: в производстве – при создании конструктивных элементов радиационной защиты в различных отраслях – от ядерной энергетики до медицины и космической техники; в учебном процессе – при подготовке аспирантов, обучающихся по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

**Перспективы дальнейших исследований** целесообразно рассматривать в направлении расширения областей применения полученных радиационно-защитных полимерных композиционных материалов в атомной отрасли.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий и международных реферативных баз данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ*

1. Павленко В.И., Романюк Д.С., Кашибадзе В.В., Куприева О.В. Воздействие давления прессования на характеристики радиационно-защитных композитов // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 65 №, (3). С. 107-115.

2. Черкашина Н.И., Павленко В.И., Романюк Д.С., Денисова Л.В., Ручий А.Ю., Носков А.В., Баринов Р.А. Исследование радиационно-защитных свойств полимерных композитов с оксидом висмута к гамма излучению // Поверхность, Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2025. № 7, С. 49-58.

3. Черкашина Н.И., Павленко В.И., Романюк Д.С., Сидельников Р.В.,

Руднев П.И., Чешигин И.В. Экспериментальное облучение полиэтиленовых композитов нейтронами и гамма-квантами // Физика твердого тела. 2025. Т. 67. вып. 3. С. 578-586.

4. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И., **Романюк Д.С.**, Синтез и свойства композиционного материала на основе полиэтилена // Перспективные материалы. 2025. №9. С. 22-31.

5. Noskov A.V., Shurshakov V.A., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., and **Romanyuk D.S.** Transport of Neutrons and  $\gamma$ -Quanta through a Highly Filled Polymer Composite // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. Vol. 16, No. 6. P. 1248–1252.

6. Павленко В.И., **Романюк Д.С.**, Кашибадзе В.В., Ручий А.Ю., Форова Е.В. Исследования радиационно-защитных свойств многокомпонентного композиционного материала с использованием источников  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  // Известия вузов. Физика. 2024. Т. 67. № 2. С. 60-70.

#### *Web of Science u Scopus*

7. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V., **Romanyuk D.S.**, Gavrish V.M., Chayka T.V. Synthesis of polymer composites using cryogenic grinding and study of their mechanical characteristics and theoretical calculations for neutron-protective parameters // Progress in Nuclear Energy. 2024. Vol. 177. 10544. (Web of Science Q1, Scopus Q1).

8. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Rudnev P.I., Cheshigin I.V., **Romanyuk D.S.**, Ruchiy A.Y. Study of radiation-protective characteristics of polyethylene composites with  $\text{B}_4\text{C}$  and  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  to neutron and gamma radiation // Nuclear Engineering and Design. 2025. Vol. 432. 113732. ISSN 0029-5493. (Web of Science Q1, Scopus Q1).

#### *В сборниках трудов конференций*

9. **Романюк Д.С.**, Сидельников Р.В., Домарев С.Н. Проблема защиты от радиации в экстремальных условиях // Образование. Наука. Производство: Материалы XIV Международного молодежного форума. 2022 г. с. 212-218.

10. **Романюк Д.С.**, Сидельников Р.В., Кашибадзе В.В. Выбор матрицы для радиационно-защитных композиционных материалов // Образование. Наука. Производство: Материалы XIV Международного молодежного форума. 2022. С. 218-221.

11. Павленко В. И., Черкашина Н.И., Куприева О.В., Сидельников Р.В., **Романюк Д.С.** Гидрофобизация гидроксида циркония // Перспективные технологии и материалы: Материалы Международной научно-практической конференции. 2022. С. 232-234.

12. **Романюк Д.С.**, Сидельников Р.В., Кашибадзе Н.В. Композиционные материалы для защиты от нейтронного излучения // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник докладов

Национальной конференции с международным участием. 2022. С.290-294.

13. **Романюк Д.С.**, Сидельников Р.В., Кашибадзе Н.В. Проблема защиты от нейтронного излучения // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник докладов Национальной конференции с международным участием. 2022. С. 322-327.

14. **Романюк Д.С.**, Сидельников Р.В., Кашибадзе Н.В. Использование вольфрамсодержащего компонента в качестве наполнителя для радиационно-защитных композитов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник докладов Национальной конференции с международным участием. 2021. С. 1508-1511.

15. Ручий А.Ю., Кашибадзе Н.В., **Романюк Д.С.**, Сидельников Р.В. Композиционные материалы для защиты от радиации // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума. 2023. с. 199-203.

16. Machukaev D., **Romanyuk D.** Study of the shielding properties of a polymer composite materia // IV International Scientific and Practical Conference "Future Knowledge: Issues of Development of Science, Technology and Society". 2025. P. 1-15.

17. Черкашина Н.И., **Романюк Д.С.**, Сильченко Д.В., Баринов Р.А. Полиэтиленовый композит для радиационной защиты от нейтронного и гамма-излучения // Научный Поиск: Проблемы, Векторы, Перспективы: Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2025. С. 132-139.

18. **Романюк Д.С.**, Сильченко Д.В., Черкашина Н.И. Воздействие гамма-излучения на конструкционную прочность радиационно-защитного полимерного композита // Наука. Образование. Инновации: новые подходы и актуальные исследования: Сборник научных трудов по материалам IX Международной научно-практической конференции. 2025. С. 82-87.

#### ***Объекты интеллектуальной собственности***

19. Патент на изобретение РФ № 2799773, RU 2799773 Композиционный материал для защиты от ионизирующего излучения и способ его получения; Павленко В.И., Черкашина Н.И., **Романюк Д.С.**, Шуршаков В.А., Сидельников Р.В., Домарев С.Н. Заявитель и правообладатель Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, заявка №2022133844, заявлено: 22.12.2022; опубликовано: 11.07.2023; Бюл. № 20

**РОМАНИЮК ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**ПОЛИМЕРНЫЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ,  
НАПОЛНЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯМИ ВИСМУТА И БОРА**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 15.01.26  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,07 Тираж 100 экз. Заказ № 3

Отпечатано в БГТУ им. В. Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46