

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НИЗКОФОНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

© 2024 г. А. В. Вересникова^{1),2)}, Ю. М. Гаврилюк¹⁾, А. М. Гангапшев^{1),2)}, В. В. Казалов^{1),2),3),*},
М. М. Кочкаров^{1),2)}, Д. С. Калашников²⁾, Э. Л. Бербеков²⁾

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.; после доработки 06.09.2024 г.; принята к публикации 06.09.2024 г.

Для создания прототипа детектора на основе неодимсодержащего жидкого органического сцинтиллятора для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{150}Nd выполнены измерения спектров от радиоактивных примесей различных материалов с помощью низкофоновых полупроводниковых гамма-спектрометров в Бакансской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, используемых для изготовления детектора. Рассмотрена возможность использования технологии 3D-печати в низкофоновых условиях. Это потенциально позволит создать конструкционные элементы детекторов с рекордно низким содержанием радиоактивных примесей для экспериментов в области нейтринной астрофизики, поиска темной материи, безнейтринного двойного бета-распада и других низкофоновых экспериментов. Измерены активности радиоактивных примесей в деталях, изготовленных из пластика на 3D-принтере, которые предполагается использовать при создании прототипа детектора и его низкофоновой защиты.

DOI: 10.31857/S0044002724060129, EDN: HOUJRM

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из важнейших направлений в физике является поиск двойного безнейтринного бета-распада ($0\nu 2\beta$ -распад). Для проведения таких исследований необходимо минимизировать уровень радиоактивного фона. Отбор наиболее чистых конструктивных материалов является необходимым, поскольку достигнутый уровень фона определяет конечную чувствительность эксперимента к исследуемым физическим процессам. Это достигается различными способами: размещением установок в подземных лабораториях, тщательным отбором конструкционных материалов, использованием методик активного подавления фона.

Однако для проектов нового поколения требуется еще большее снижение уровня естественного радиоактивного фона. Конструкционные материалы как самого детектора, так и окружающих его элементов защиты являются неустранимыми источниками фона. Поэтому важно не только искать новые, все более низкофоновые материалы, но и обеспечивать отсутствие радиоактивных загрязнений при обработке и производстве деталей [1].

В качестве прототипа крупномасштабного детектора создается детектор в рамках проекта “Новые методы исследования безнейтринного двойного бета-

распада”, направленного на создание нового сцинтилляционного детектора для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{150}Nd [2].

При $0\nu 2\beta$ -распаде изотопа ^{150}Nd образуются два электрона с суммарной энергией 3.368 МэВ. Высокая энергия $0\nu 2\beta$ -распада ^{150}Nd повышает вероятность его наблюдения при значительном улучшении фоновых условий эксперимента и повышении энергетического разрешения детектора.

В область исследования также попадают распады от естественных долгоживущих радиоактивных элементов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . Излучения от этих распадов создают радиоактивный фон для основных измерений. Поскольку указанные выше элементы присутствуют в различных количествах в любых материалах, единственным методом снижения естественного радиационного фона является использование материалов с минимальным содержанием радиоактивных примесей. Данный прототип позволит также изучить влияние радиоактивного загрязнения используемых материалов, а также влияние материалов низкофоновой защиты: меди, свинца, и др. на фон экспериментальной установки.

К настоящему времени накоплена обширная информация о содержании радиоактивных элементов в различных конструкционных материалах (металлы, пластмассы, диэлектрики и др.), жидкостях и промышленных изделиях (радиодетали, разъемы, кабели и др.). Она позволяет выбирать тип низкофонового материала. Однако отклонение уровня радиоактивной загрязненности конкретного материала может существенно отличаться от среднего. Поэтому каждый

¹⁾ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

²⁾ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия.

³⁾ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

* E-mail: vvk1982@mail.ru

раз необходимо проводить дополнительный отбор.

На данный момент широкое распространение получили аддитивные технологии 3D-печати. Использование технологий 3D-печати может позволить избежать механической обработки изготавливаемых деталей, что предотвращает потенциальное дополнительное загрязнение элементов в процессе производства, сокращает его длительность и уменьшает количество этапов при финальной очистке деталей перед монтажом детекторов. Современный 3D-принтер — это компактное устройство, которое можно разместить в “чистой комнате”, соблюдая все требования, применимые при “чистых” работах, включая контроль доступа к нему. Если использовать подобный принтер исключительно для изготовления деталей, необходимых в данном эксперименте, то возможность внесения загрязнений на этапе производства сводится к минимуму. Возможности 3D-печати позволяют создавать конструкционные элементы любой сложности, допустимой механической прочности при малом количестве используемого вещества, изготовления деталей в сжатые сроки.

Поэтому применение 3D-печати представляется интересным и перспективным методом изготовления различных конструкционных элементов низкофоновых детекторов и узлов низкофоновой защиты для планируемых экспериментов по поиску темной материи, безнейтринного двойного бета-распада и др.

Материалы, которые используются при 3D-печати в основном представлены пластиками (полиэтилен, нейлон и др.) или компаундами из пластика и органических соединений или/и металлов (например, медь, титан). Они могут содержать малое количество ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в силу искусственного происхождения. Так же можно предположить, что красители и различные добавки, применяемые при изготовлении филаментов для 3D-печати, могут загрязнять исходные пластики изотопами из рядов ^{238}U , ^{232}Th или же изотопами искусственного происхождения, например, ^{137}Cs .

Для определения содержания и/или активности радиоактивных изотопов (р.и.) используются разные методы: измерение гамма-квантов от распадов р.и. с помощью гамма-спектрометров на основе сцинтилляционных кристаллов [3] или полупроводниковых детекторов [4, 5], методы ICP-MS-спектрометрии [6], нейтронно-активационный анализ [7]. Наибольшей чувствительностью для таких измерений обладают низкофоновые подземные спектрометры на основе полупроводниковых гамма-детекторов из особо чистого германия (ОЧГ).

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВОК

Полупроводниковые детекторы (ППД) ионизирующего излучения представляют собой детекторы ядерного излучения с рабочим веществом из полупроводника, обычно кремния или германия [8]. В гамма-спектрометрии наибольшее распространение получи-

ли ППД на основе ОЧГ. Данные детекторы представляют собой PiN-диоды цилиндрической формы с полукосиальным отверстием из ОЧГ, размещенные в специальном криостате и охлаждаемые до температуры жидкого азота. Охлаждение детектора позволяет снизить количество свободных зарядов в основном объеме детектора и, соответственно, обеспечить малый темновой ток в кристалле [8, 9].

ППД обладают рядом принципиальных преимуществ перед другими детекторами ионизирующего излучения [8]:

1. Небольшая энергия, расходуемая на образование электронно-дырочной пары, ~3 эВ для германия, обеспечивает, при прочих условиях, хорошее энергетическое разрешение полупроводниковых детекторов по сравнению с газонаполненными или сцинтилляционными детекторами.
2. Высокая плотность полупроводникового материала, для германия $\rho = 5.323 \text{ г/см}^3$, обеспечивает высокую эффективность регистрации ионизирующего излучения.
3. Так как носители заряда (электроны и дырки) имеют сравнимые по величине подвижности, то время сортирования зарядов на электродах не сильно различается, в результате чего не возникает серьезных трудностей с регистрацией частиц, проникающих на неодинаковую глубину в детектор.

В низкофоновой лаборатории глубокого заложения БНО ИЯИ РАН [10, 11] на разных глубинах в метрах водного эквивалента (м в.э.) расположены несколько низкофоновых гамма-спектрометров на основе ОЧГ-детекторов, используемых для прецизионного исследования радиоактивности различных материалов.

Для контроля радиационной чистоты исходных материалов, используемых для изготовления прототипа детектора для регистрации безнейтринного двойного бета-распада ^{150}Nd , и приготовления пластика, деталей, напечатанных на 3D-принтере, подготовлена аппаратура для измерения радиоактивных примесей на предельно низком уровне (<1 мБк/кг).

2.1. Низкофоновый гамма-спектрометр “СНЕГ”

Для измерения удельной активности радиоактивных примесей в исследуемом образце используется низкофоновая установка “СНЕГ”, основанная на одном низкофоновом ОЧГ-спектрометре [12]. Он расположен в низкофоновой лаборатории глубокого заложения на глубине 4900 м в.э. в одном из боксов. Общий вид низкофоновой установки приведен на рис. 1.

Сосуд Дьюара объемом 80 л стоит на подставке, в который погружен вертикальный участок хладопровода детектора на основе чистого германия (ОЧГ-детектора). Ge-кристалл ($d = 65 \text{ мм}$, $h = 67 \text{ мм}$)

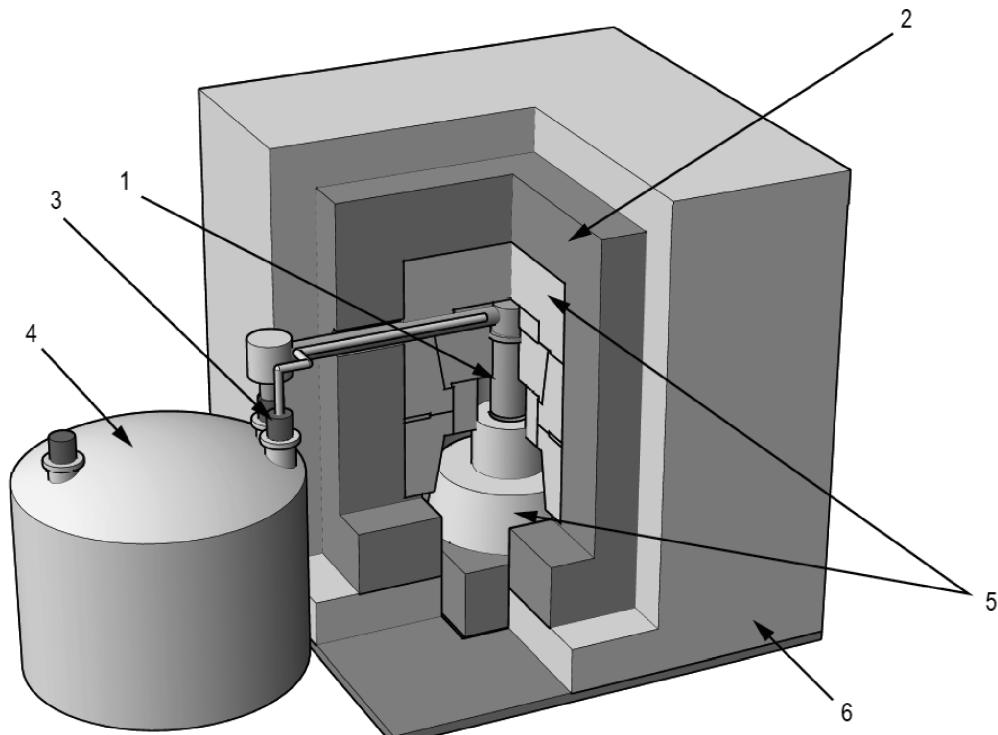


Рис. 1. Общий вид подземной измерительной установки “СНЕГ” с низкофоновым ОЧГ-спектрометром: 1 – ОЧГ-детектор, 2 – свинец, 3 – продувочная труба, 4 – сосуд Дьюара с жидким азотом, 5 – медь, 6 – полиэтилен.

расположен на дне вертикального медного вакуумированного цилиндрического ($d = 80$ мм) кожуха, присоединенного к торцу горизонтального участка хладопровода, проложенного в канале низкофоновой защиты. Головная часть детектора находится внутри защиты, состоящей из 50–80 мм полизтилена, 1 мм кадмия, 150 мм свинца, 180 мм меди. Вокруг головки детектора имеется полость для размещения образцов. Геометрия полости может изменяться путем заполнения части объема цилиндром из высокочистой меди. Образцы в рабочий объем загружаются снизу. Для этого часть дна защиты сделана выдвижной и смонтирована на платформе лифтового подъемника. Образец строго заданных предельных размеров размещается в специальном углублении верхней медной части перемещаемого блока защиты.

С целью удаления из рабочей полости радиоактивного газа ^{222}Rn , присутствующего в воздухе, внутренний объем защиты продувается парами жидкого азота, выходящими из сосуда Дьюара. Пары заводятся по медной трубке через верхний канал с хладопроводом и свободно выходят через щели в дне защиты. Верхняя часть медной слоя защиты герметизирована с помощью полиэтиленовой пленки и герметика.

2.2. Низкофоновый гамма-спектрометр “НИКА-1”

Экспериментальная установка представляет собой низкофоновую защиту, состоящую из 8 см борированного полизтилена, 23 см свинца и 12 см меди [4].

В центре медного блока защиты имеется прямоугольная полость размерами $30 \times 30 \times 30$ см 3 , в которой располагается головная часть сверхнизкофонового полупроводникового детектора из сверхчистого герmania. Масса детектора около 1 кг. Защитный кожух сделан из высокочистой электролитической меди. Детектор охлаждается через хладопровод, выведенный наружу защиты и опущенный в сосуд Дьюара с жидким азотом. Выходящие из сосуда пары жидкого азота используются для продувки рабочей полости. Детектор изготовлен из герmania, обогащенного изотопом ^{76}Ge . Геометрия расположения детектора в рабочей полости показана на рис. 2.

2.3. Спектрометрическая электроника спектрометров “СНЕГ” и “НИКА-1”

Спектрометры “СНЕГ” и “НИКА-1” оснащены одинаковым комплектом электроники. Для подачи высоковольтного и низковольтного напряжения на детектор используется двухканальная настольная система фирма CAEN DT5780 [13]. Данная система представляет собой многоканальный 16К-анализатор (МКА), включающий в себя 14-битный 100 МГц оцифровщик импульсов. Данный анализатор позволяет подавать высокое и низкое напряжение для питания ОЧГ-детектора и одновременно снимать сигналы с этого детектора. С помощью данного МКА можно производить запись информации с гамма-спектрометра в двух вариантах: сохранение спектра

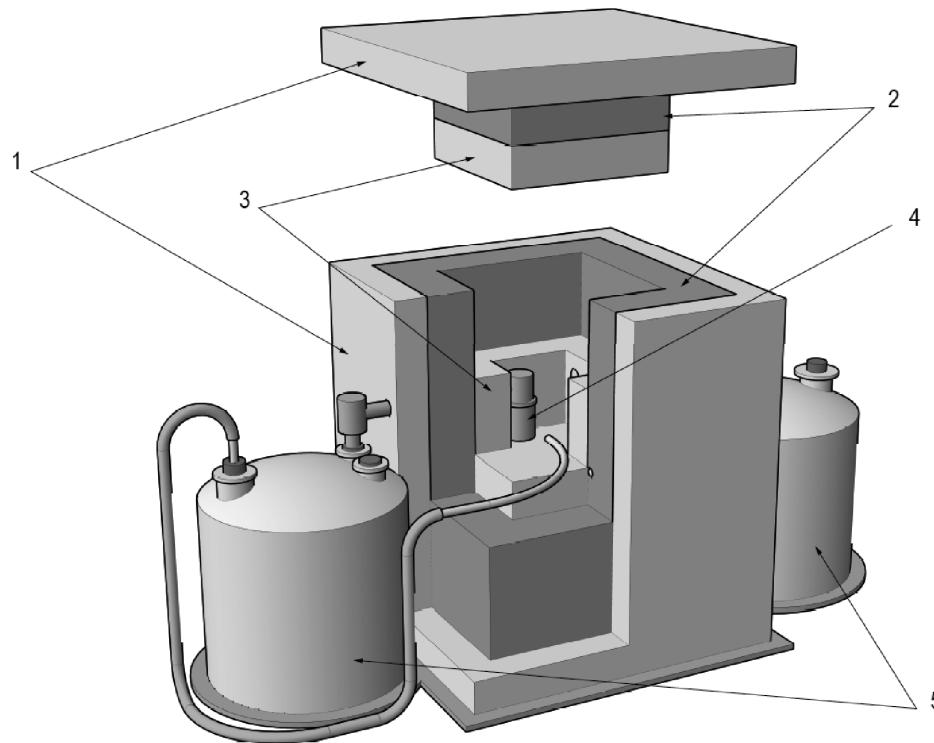


Рис. 2. Геометрия расположения ОЧГ-детектора в рабочей низкофоновой защите: 1 – борированный полиэтилен, 2 – свинец, 3 – медь, 4 – ОЧГ-детектор, 5 – сосуд Дьюара с жидким азотом.

амплитуд импульсов или запись в общий файл каждого отдельного импульса с ОЧГ-детектора для последующего оффлайн анализа. При построении спектров анализируется полная форма импульса и из анализа исключаются неионизационные импульсы от на-водок и пробоев. Их форма имеет специфические особенности.

2.4. Низкофоновые гамма-спектрометры “НИКА-2”

В состав установки “НИКА-2” входят два низкофоновых гамма-спектрометра идентичной конструкции производства компании РАДЭК [14]. Основой гамма-спектрометра является спектрометрический блок детектирования гамма-излучения CANBERRA с германиевым детектором SEGe-типа [15]. Параметры детектора приведены в табл. 1.

Диапазон энергий регистрируемых гамма-квантов составляет от 40 кэВ до 10 МэВ, а относительная эффективность регистрации составляет не менее 20%. Спектрометрические блоки снабжены горизонтальными интегральными криостатами с сосудами Дьюара объемом 30 л для охлаждения ОЧГ-кристаллов до рабочей температуры.

Для защиты от радиоактивного излучения, вызванного распадами радиоактивных изотопов природного характера, — ^{238}U , ^{232}Th , их дочерних продуктов, ^{40}K , в скальных породах, окружающих рабочее помещение низкофоновой камеры, а также от распа-

дов ^{222}Rn в воздухе помещения, детекторы окружены низкофоновой защитой, состоящей из борированного полиэтилена, 10 см свинца и 10 см меди марки “M1”. Гамма-спектрометры “НИКА-2” имеют идентичную конструкцию низкофоновой защиты, представленной на рис. 3.

Детекторы “НИКА-2” оснащены спектрометрическими устройствами СПУ-01М [16], предназначенными для регистрации и анализа энергетических спектров ионизирующих излучений. В СПУ-01М используется 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь поразрядного уравновешивания и 8192-канальный амплитудный анализатор. Блок питания СПУ-01М обеспечивает как питание устройства, так и блока ППД, в том числе и высокого напряжения (до 5000 В). Для работы с СПУ-01М используется программное обеспечение (ПО) “ASW2” [17]. Данное ПО обеспечивает одновременное и независимое управление всеми подключенными анализаторами и спектрометрическими устройствами и предоставляет все необходимые для прикладной спектрометрии инструменты. В ПО “ASW2” реализованы различные алгоритмы для определения активности в исследуемых образцах. Для анализа спектров с ППД имеется отдельный инструментарий (поиск пиков, аппроксимация гауссом, идентификация и т.п.).

Для проведения Монте-Карло-моделирования и расчета функции отклика детектора используется ПО

Таблица 1. Параметры ОЧГ-детектора установки “НИКА-2”

Модель	Относительная эффективность регистрации, %, не менее	ПШПВ* для пика, кэВ, не более		Отношение пик/комптон, не менее	Отношение ПШПВ/ПШДВ** для пика 1332 кэВ	Диаметр камеры детектора, мм
		122 кэВ	1332 кэВ			
GC2018	20	0.850	1.8	50	1.90	76

Примечание. *Полная ширина на полувысоте. **Полная ширина на 1/10 высоте.

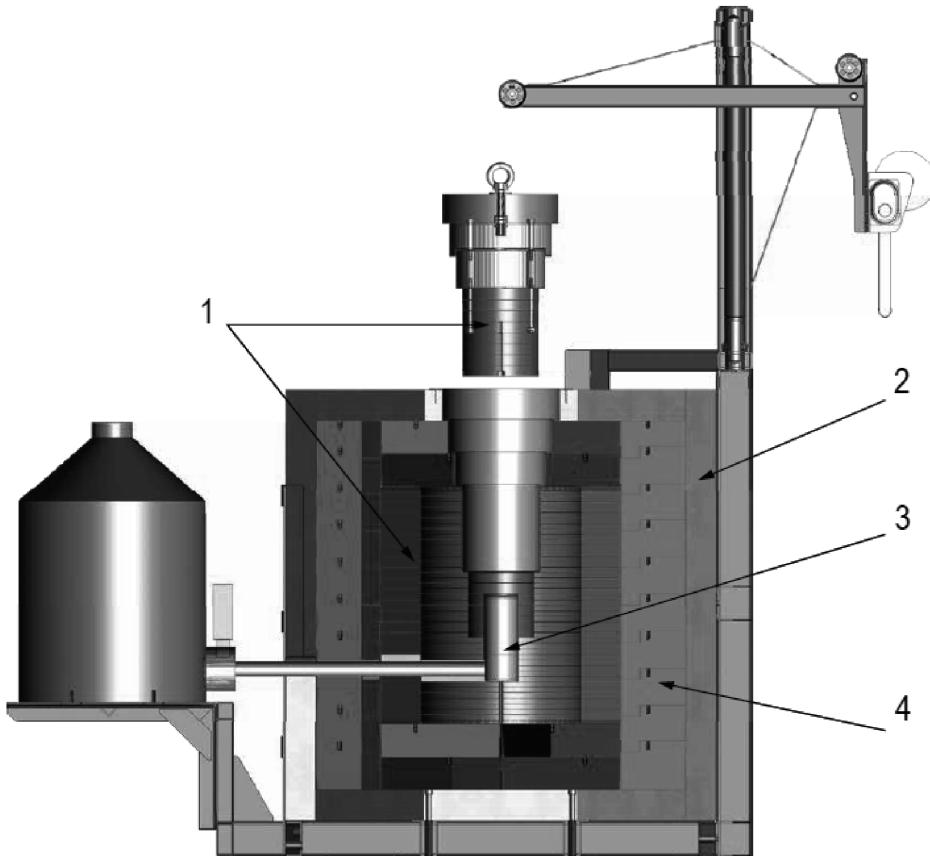


Рис. 3. Низкофоновая защита гамма-спектрометров установки “НИКА-2”: 1 – медь марки “М1”, 2 – полиэтилен, 3 – ОЧГ-детектор, 4 – свинец.

“МСС-МТ” [18]. В ПО “МСС-МТ” реализована возможность создавать подробную сложную геометрическую модель детектора, проводить расчеты и получать результаты в необходимой форме.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Перед началом измерения снимаются характеристики образца: геометрические размеры, вес. Данные характеристики потребуются в дальнейшем для моделирования и расчетов эффективности регистрации гамма-линий от радиоактивных источников в образце. Для проведения измерений образец помещается во внутреннюю полость низкофоновой защиты. Расположение образца в защите фотографируются либо зарисовываются, данный параметр так же необходим для моделирования.

Накопленные за время измерений экспериментальные данные представляются в виде энергетических спектров. Для того чтобы исключить из спектра исследуемого образца события, связанные с фоном установки, из него вычитается спектр, набранный без исследуемого образца.

Расчет значений удельной активности изучаемого изотопа проводится по следующей методике:

- геометрия образца, его расположение относительно детектора, материал и масса, характеристики детектора вводятся в лист параметров пакета Geant4 [19] моделирования физических процессов в детекторе, и с его помощью рассчитывается с учетом самопоглощения излучения в образце полная эффективность регистрации детектором излучения соответствующей энергии от источника, равномерно распределенного по объему образца;
- определяется площадь соответствующей линии в

разностном спектре, и с учетом эффективности вычисляется полное количество испущенных образцом гамма-квантов в единицу времени;

— с учетом коэффициента выхода гамма-квантов на один распад данного изотопа определяется его удельная активность на единицу массы образца.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для подтверждения или опровержения предположения о радиоактивной чистоте пластиков (филаментов) был проведен отбор группы образцов пластика. С целью изучения возможности применения материалов 3D-печати полный список отобранных образцов пластика приводится в табл. 2. Образцы представляют собой как напечатанные изделия, так и исходное сырье.

- Образцы № 1 и № 2 представляют собой готовые изделия, напечатанные на 3D-принтере из PET-G пластика фирмы Bestfilament [20];
- Образец № 3 — Полифениленсульфон марки PPSU Radel R-5600 фирмы Solvay (Бельгия) [21];
- Образец № 4 — Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), синтезированный Центром прогрессивных материалов и аддитивных технологий КБГУ [22]. Синтез ПЭЭК осуществляли методом поликонденсации по реакции нуклеофильного замещения при молярном соотношении мономеров 4,4'-дифторбензофенона и гидрохинона 1.0 : 1–1.04 : 1 в присутствии натрия углекислого и калия углекислого в соотношении 0.2 : 0.8 в дифенилсульфоне в токе инертного газа с непрерывным перемешиванием при постепенном повышении температуры до 305–320 °C. Механические свойства образцов ПЭЭК получены методом литья под давлением и 3D-печатью;
- Образец № 5 — Полифениленсульфон, синтезирован Центром прогрессивных материалов и аддитивных технологий КБГУ с добавлением 0.4% углеродных нанотрубок производства ООО “НаноТехЦентр” (Россия). Синтез полифениленсульфона осуществлялся в N, N-диметилацетамиде с использованием 4,4'-дигидроксидифенила и 4,4'-дихлордифенилсульфона в качестве мономеров при температуре 165 °C;
- Образцы № 6 (полиэтилентерефталат) и № 7 (поликарбонат) синтезированы Центром прогрессивных материалов и аддитивных технологий КБГУ;
- Образец № 8 изготовлен на 3D-принтере из SLA-фотополимера, синтезированном Центром прогрессивных материалов и аддитивных технологий КБГУ. Смесь состоит из мономеров, олиго-

меров и фотоинициаторов. Олигомеры представляют собой эпоксидные смолы, уретаны, простые полиэфиры или сложные полиэфиры, каждый из которых придает определенные свойства полученному материалу. Обычно каждый из этих олигомеров функционализирован акрилатом. Примерами фотоинициаторов могут быть бензофенон, ксантоны и хиноны, при этом общими донорными соединениями являются алифатические амины;

- Образец № 9, кварцевый лом, был предоставлен компанией “КВАРЦ-ПРОМ”, производителем изделий из кварца [23]. Кварц был исследован, поскольку прототип детектора содержит цилиндрическую сцинтилляционную ячейку из оптического кварца.

Спектры излучения от радиоактивных примесей представлены на рис. 4. Полученные удельные активности радиоактивных примесей в исследуемых образцах приведены в табл. 3.

Из табл. 2 и 3 видно, что для изготовления прототипа детектора необходимо использовать материалы с наименьшим содержанием урана, тория и продуктов их радиоактивного распада. Конструкционные материалы детектора или низкофоновой защиты, изготовленные методом 3D-печати, могут быть загрязнены дочерними продуктами распада ^{222}Rn или другими радиоактивными изотопами, которые могут присутствовать в воздухе во время изготовления. В связи с этим 3D-печать должна выполняться в беспылевой зоне и, желательно, в азотной или аргоновой атмосфере, либо в воздухе, очищенном от радона.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения принципиально новых результатов в экспериментах по поиску двойного безнейтринного бета-распада следующего поколения необходимо минимизировать уровень радиоактивного фона. Этого можно достичь, в частности, за счет использования новых, более низкофоновых, конструкционных материалов для изготовления детекторов, применяемых в эксперименте, а также современных методов их производства. В настоящей работе представлены результаты исследования содержания радиоактивных примесей в образцах, приготовленных из пластика на 3D-принтере, а также других конструкционных материалов, которые предполагается использовать при создании прототипа детектора безнейтринного двойного бета-распада и его радиационной защиты. При этом образцы представляют собой как напечатанные изделия, так и исходное сырье.

Показано, что 3D-печать должна выполняться в чистой зоне и, желательно, в азотной или аргоновой атмосфере, либо в воздухе, очищенном от радона.

Таблица 2. Основные характеристики исследуемых образцов

№	Образец	Описание образца
1	Белый пластик (PET-G)	полиэтилентерефталат гликоль-модифицированный, $(C_{10}H_8O_4)_n$, температура плавления – 260 °C, ρ : 1.27–1.29 г/см ³ , цвет белый
2	Полупрозрачный пластик (PETG)	полиэтилентерефталат гликоль-модифицированный, $(C_{10}H_8O_4)_n$, температура плавления – 260 °C, ρ : 1.27–1.29 г/см ³ , полупрозрачный
3	PPSU Radel	полифенилсульфон Radel®(PPSU), температура плавления – 207 °C, ρ : 1.01 г/см ³ ; цвет бежевый
4	Пластик марки 343 × 6Б ПЭЭК	полиэфирэфиркетон $C_{19}H_{14}O_3$, температура плавления – 260 °C, ρ : 1.3 г/см ³ , цвет серый
5	Полифениленсульфон	синтез полифениленсульфона осуществлялся в N,N-диметилацетамиде с использованием 4,4'-дигидроксидифенила и 4,4'-дихлордифенилсульфона в качестве мономеров при температуре 165 °C, $(C_6H_4SO_2)_n$, ρ : 1.29 г/см ³ ; цвет черный
6	Полиэтилентерефталат (ПЭТ)	Полиэтилентерефталат, $(C_{10}H_8O_4)$, температура плавления – 260 °C, ρ : 1.4 г/см ³ ; оптически прозрачный
7	Поликарбонат	сложные полиэфиры угольной кислоты и двухатомных спиртов, $(C_4H_6O_3)_n$, температура плавления – >310 °C, ρ : 1.2 г/см ³ ; оптически прозрачный
8	SLA (фотополимерная смола)	смесь состоит из мономеров, олигомеров и фотоинициаторов, оптически непрозрачный
9	Кварц	полиморфная модификация диоксида кремния, SiO_2 , температура плавления – 1700 °C, ρ : 2.65 г/см ³ ; оптически прозрачный

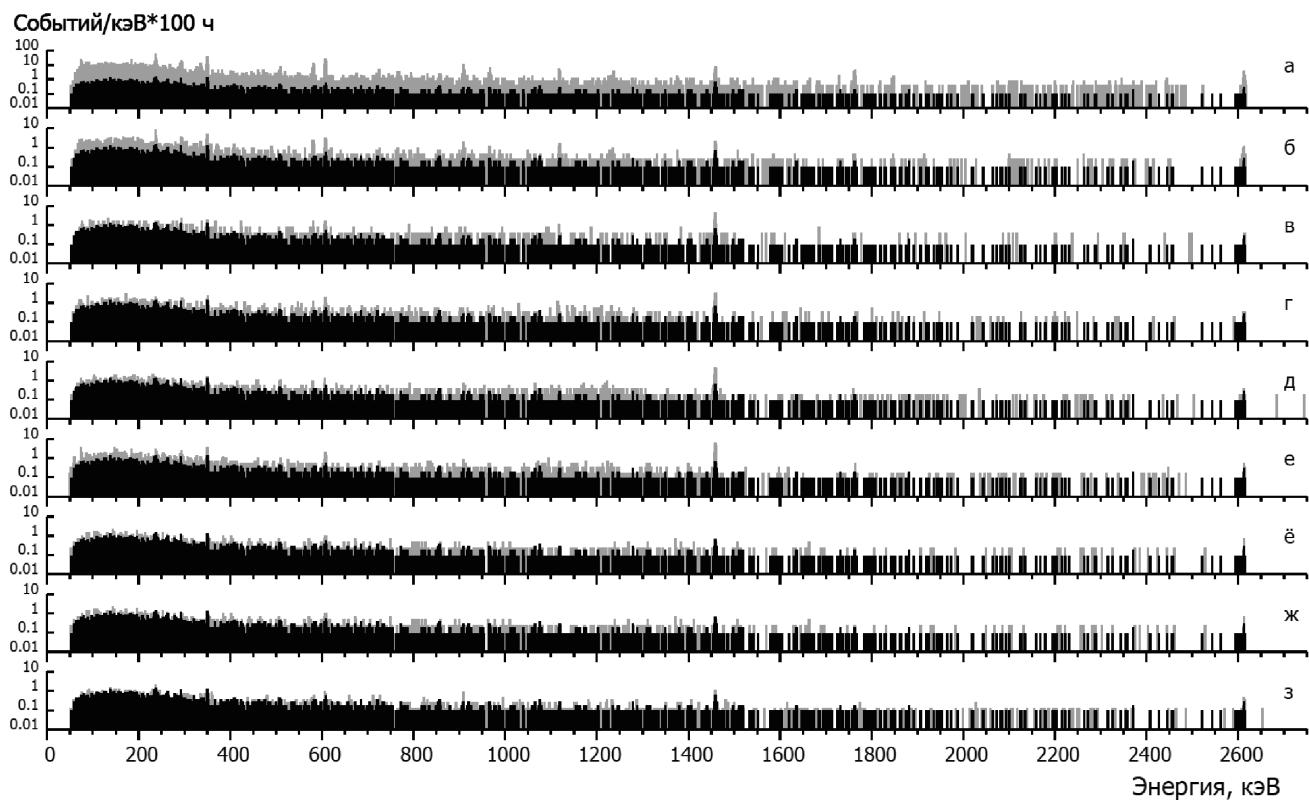


Рис. 4. Сравнение спектров образцов (серый) и спектра фона (черный). Спектры образцов приведены в порядке, соответствующем табл. 2: а – образец кварца; б – WtF – образец белого пластика; в – StF – образец полупрозрачного пластика; г – PPSU – образец пластика PPSU Radel; д – PEEK – образец пластика 343 × 6Б ПЭЭК; е – ТаунитМ – образец Таунит-M; ё – PK – образец поликарбоната; ж – PET – образец ПЭТ; з – образец пластика SLA. Спектры нормированы на 100 ч.

Таблица 3. Активность радиоактивных изотопов в образцах (мБк/кг); пределы установлены на 90% уровне достоверности

Образец	Изотопы			
	^{226}Ra (^{214}Bi)	^{228}Ac	^{40}K	^{208}Tl
	Активность радиоактивных изотопов (мБк/кг)			
1 Белый пластик	14.2 ± 3.2	15 ± 5	62 ± 20	7 ± 1.5
2 Полупрозрачный пластик (PETG)	5.5 ± 2.6	≤ 2.4	110 ± 30	≤ 1.49
3 PPSU Radel	33 ± 12	≤ 26.1	900 ± 200	12.9 ± 6.2
4 Пластик марки	10.9 ± 6.5	23 ± 11	950 ± 100	≤ 12.2
5 Полифениленсульфон	65.41 ± 1.9	≤ 50	2000 ± 200	≤ 24.3
6 Полиэтилентерефталат (ПЭТ)	≤ 17.5	≤ 10.5	≤ 50	≤ 9
7 Поликарбонат	≤ 18.5	≤ 10	≤ 49	≤ 9.5
8 SLA (фотополимерная смола)	≤ 40	≤ 50	≤ 300	≤ 50
9 Кварц	161 ± 13	140 ± 22	500 ± 100	45 ± 8.5

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FZZR-2022-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Н. С. Румянцева, К. Н. Гусев, Вестн. Международного ун-та природы, общества и человека “Дубна”, № 2(47), 29 (2020).
- I. R. Barabanov, A. V. Veresnikova, Yu. M. Gavrylyuk, V. I. Gurentsov, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, G. Ya. Novikova, Z. Kh. Kalajokov, D. A. Tekueva, M. Sh. Thazaplichev, and E. A. Yanovich, Bull. Lebedev Phys. Inst. **50**, 491 (2023).
- Ю. К. Акимов, Фотонные методы регистрации излучений (ОИЯИ, Дубна, 2006).
- Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, А. М. Гежаев, В. В. Казалов, А. А. Клименко, В. В. Кузьминов, С. И. Панасенко, С. С. Раткевич, А. А. Смольников, К. В. Эфендиев, С. П. Якименко, Препринт ИЯИ РАН 1236/2009 (Москва, 2009).
- A. Agrawal, V. V. Alenkov, P. Aryal, H. Bae, J. Beyer, B. Bhandari, R. S. Boiko, K. Boonin, O. Buzanov, C. R. Byeon, N. Chanthima, M. K. Cheoun, J. S. Choe, S. Choi, S. Choudhury, J. S. Chung, et al., Front. Phys. **12**, 1362209 (2024).
- O. Gileva, J. S. Choe, Y. D. Kim, M. H. Lee, D. S. Leonard, K. A. Shin, and H. Yeon, Appl. Radiat. Isotop. **194**, 110673 (2023).
- Нейтронно-активационный анализ, <https://www.iaea.org/ru/temy/neutronno-aktivacionnyy-analiz>
- Ю. К. Акимов, О. В. Игнатьев, А. И. Калинин, В. Ф. Кушнирук, Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике (Энергоатомиздат, Москва, 1989).
- С. А. Балдин, Н. А. Вартанов, Ю. В. Ерыхайлов, Л. М. Иоаннесянц, Прикладная спектрометрия с полупроводниковыми детекторами (Атомиздат, Москва, 1974).
- Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН, <https://www.inr.ru/bno/>
- Ju. M. Gavriljuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkевич, A. A. Smolnikov, and S. P. Yakimenko, Nucl. Instrum. Methods A **729**, 576 (2013).
- O. A. Busanov, R. A. Etezov, Yu. M. Gavriljuk, A. M. Gezhaev, V. V. Kazalov, V. N. Kornoukhov, V. V. Kuzminov, P. S. Moseev, S. I. Panasenko, S. S. Ratkевич, and S. P. Yakimenko, EPJ Web Conf. **65**, 03002 (2014).
- CAEN DT5780, <https://www.caen.it/products/dt5780/>
- НТЦ “РАДЭК”, <https://www.radek.ru/>
- Блоки детектирования спектрометрические с германиевыми детекторами, www.canberra.ru
- Устройство спектрометрическое СПУ-01М НТЦ “РАДЭК”, <https://www.radek.ru/product/Komplektuyuschie-izdelya-i-bloki/108/>
- Программа “ASW2” НТЦ “РАДЭК”, <https://www.radek.ru/product/Programmnoe-obespechenie/95/>
- Программа “MCC-MT” НТЦ “РАДЭК”, <https://www.radek.ru/product/Programmnoe-obespechenie/84/>
- S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, et al., Nucl. Instrum. Methods A **506**, 250 (2003).
- Bestfilament, <https://bestfilament.ru/>
- PPSU Radel R-5600, <https://www.syensqo.com/en/brands/radel-ppsu>
- Центр прогрессивных материалов и аддитивных технологий КБГУ, <https://cpmat.ru/produkciya/>
- КВАРЦ-ПРОМ, <https://www.quartz-prom.com/>

MEASUREMENT OF RADIOACTIVITY OF MATERIALS FOR LOW-BACKGROUND EXPERIMENTS USING A SEMICONDUCTOR GAMMA-RAY SPECTROMETER

V. Veresnikova^{1),2)}, Yu. M. Gavril'yuk¹⁾, A. M. Gangapshev^{1),2)}, V. V. Kazalov^{1),2),3)},
M. M. Kochkarov^{1),2)}, D. S. Kalashnikov²⁾, E. L. Berbekov²⁾

¹⁾ Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²⁾ Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

³⁾ National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

To create a prototype of a detector based on a neodymium-containing liquid organic scintillator for the search for neutrinoless double beta decay of ^{150}Nd , measurements of the spectra of radioactive impurities from various materials used in the manufacture of the detector were carried out using low-background semiconductor gamma spectrometers at the Baksan Neutrino Observatory INR RAS. The potential use of 3D printing in low-background conditions was considered. This could potentially allow the creation of detector structural elements with a record-low content of radioactive impurities for experiments in neutrino astrophysics, dark matter searches, neutrinoless double-beta decay experiments. The activity of radioactive impurities in plastic parts produced on a 3D printer, which were intended for use in creating a prototype of a detector and its low-background shielding, were measured.