

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074 +539.12-173

ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА РЭД-100

© 2021 г. Д. Ю. Акимов^a, И. С. Александров^{a,b}, В. А. Белов^{a,c}, А. И. Болоздыня^{a,*},
Ю. В. Ефременко^d, А. В. Этенко^{a,e}, А. В. Галаванов^{a,f}, Д. В. Гусс^a, Ю. В. Гусаков^{a,f},
Dj. E. Kdib^a, А. В. Хромов^a, А. М. Коновалов^{a,c}, В. Н. Корноухов^{a,g}, А. Г. Коваленко^{a,c},
А. А. Козлов^a, Е. С. Козлова^{a,c}, А. В. Кумпан^a, А. В. Лукьяшин^{a,h}, А. В. Пинчук^a, О. Е. Разуваева^{a,c},
Д. Г. Рудик^a, А. В. Шакиров^a, Г. Е. Симаков^{a,c}, В. В. Сосновцев^a, А. А. Васин^a

^a Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
(Московский инженерно-физический институт)
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^b Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

^c Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова НИЦ
“Курчатовский институт”, Москва, Россия

^d Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee,
Knoxville, Tennessee, USA

^e Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
Москва, Россия

^f Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна Московской обл., Россия

^g Институт ядерных исследований РАН,
Москва, Россия

^h Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

*e-mail: aibolozdynya@mephi.ru

Поступила в редакцию 29.10.2020 г.

После доработки 06.11.2020 г.

Принята к публикации 09.11.2020 г.

Разработана и построена комбинированная пассивная защита эмиссионного двухфазного нейтринного детектора РЭД-100, обеспечивающая подавление внешнего γ -фона и нейтронного фона. Защита представляет собой слой меди толщиной 5 см (внутренний слой – вблизи детектора) и слой воды суммарной толщиной (включая пространство внутри слоя меди) ~70 см. Выполнено моделирование методом Монте-Карло эффективности защиты и проведена экспериментальная проверка в лабораторных условиях с помощью сцинтилляционного детектора NaI(Tl) рассчитанного коэффициента ослабления γ -фона медной защитой, а также рассчитан коэффициент подавления γ -фона для полной защиты.

DOI: 10.31857/S0032816221020105

ВВЕДЕНИЕ

Упругое когерентное рассеяние нейтрино (у.к.р.н.) на атомном ядре было предсказано в рамках Стандартной модели в 1974 г. практически одновременно американским [1] и советскими [2] учеными. В этом процессе нейтрино взаимодействует не с отдельными нуклонами ядра, а с ядром в целом и передает ему часть кинетической энергии. Единственным детектируемым продуктом этой реакции является ядро отдачи (точнее, атом отдачи) с очень слабой сигнатурой – кинетической энергией в килоэлектронвольтом и субки-

лоэлектронвольтом энергетических диапазонах. По этой причине процесс у.к.р.н. на атомном ядре был обнаружен только в 2017 г. коллаборацией COHERENT на ядрах Cs и I, несмотря на его большое (по сравнению с другими нейтринными взаимодействиями) сечение [3].

Совсем недавно коллаборация COHERENT сообщила о наблюдении данного процесса на ядре аргона [4]. В этих экспериментах, проводимых в Национальной лаборатории Oak Ridge, США, наблюдались события у.к.р.н., вызванные смесью нейтрино трех типов относительно высоких энергий от импульсного протонного источника, обра-

зующихся в распадах π^+ -мезонов в состоянии покоя. Исследование процесса у.к.р.н. с помощью реакторных нейтрино представляет особый интерес, поскольку ядерный реактор является источником нейтрино одного определенного типа (электронных антинейтрино) и по сравнению с ускорительным экспериментом позволяет расширить энергетический диапазон исследования процесса у.к.р.н. в область более низких энергий нейтрино, что дает практически полную когерентность рассеяния. Это важно для проверки теоретических предсказаний зависимости сечения процесса у.к.р.н. от энергии нейтрино и от числа нейтронов в ядре.

Наблюдение реакторных антинейтрино через у.к.р.н. на атомном ядре является сложной задачей, требующей регистрации значительно более слабых сигналов, чем в эксперименте на ускорителе, в присутствии фона от космических мюонов, быстрых нейтронов и γ -квантов окружающей среды. Несмотря на имеющиеся сложности, в этом направлении активно работают несколько экспериментальных групп: CONUS, TEXONO, vGeN [5–7], использующие детекторы из высококчистого германия; MINER, RICOCHET, v-cleus [8–10], работающие с болометрами при температурах несколько десятков милликельвин, а также CONNIE, которая применяет для идентификации частиц малозумящее устройство с зарядовой связью [11].

В настоящее время нами осуществляется подготовка эксперимента по регистрации процесса у.к.р.н. на атомном ядре Хе при помощи эмиссионного двухфазного детектора РЭД-100, содержащего более 100 кг ксенона в активной части детектора. Эмиссионный двухфазный метод регистрации частиц был предложен 50 лет назад советскими учеными [12]. Детекторы такого типа используются в современных экспериментах по прямому поиску темной материи и регистрации нейтрино в подземных лабораториях [13–17]. Этот метод позволяет регистрировать сверхмалые ионизационные сигналы вплоть до сигналов, производимых одиночными электронами ионизации, что как раз и отвечает поставленной задаче наблюдения процесса у.к.р.н. на атомном ядре [18]. Использование тяжелых ядер ксенона в качестве мишени представляет особый интерес для изучения процесса у.к.р.н. на атомном ядре, поскольку ксенон имеет практически самое тяжелое атомное ядро среди веществ, из которых могут быть построены детекторы, чувствительные к энерговыделению в субкилоэлектронвольтовой области. При этом процесс у.к.р.н. на атомном ядре ксенона имеет самое большое сечение.

Детектор РЭД-100 [19] будет установлен под реактором ВВЭР-1000 4-го энергоблока Калининской атомной электростанции (КАЭС) на

расстоянии 19 м от активной зоны реактора. Тепловая мощность реактора составляет 3 ГВт, поток антинейтрино в месте расположения детектора $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В статье описана конструкция пассивной защиты для детектора РЭД-100, результаты проверки в лабораторных условиях правильности моделирования медной составляющей этой защиты и результаты моделирования эффективности полной защиты по отношению к внешнему γ -фону. Эффективность защиты по отношению к нейтронному фону на станции в данной работе не рассматривается, поскольку такой расчет требует исходных экспериментальных данных по нейтронному фону в планируемом месте проведения эксперимента.

В силу того что у нас не было технической возможности испытать полную защиту в сборе до перевозки установки на КАЭС, были выполнены следующие исследования: измерены γ -фон в лаборатории НИЯУ МИФИ при помощи сцинтилляционного детектора NaI(Tl), собственный γ -фон этого детектора, а также γ -фон внутри медной защиты. Затем было проведено моделирование методом Монте-Карло измеренного внешнего фона с извлечением из полученной аппроксимации концентраций основных источников γ -квантов: U/Th распадных цепочек и ^{40}K в бетоне пола лаборатории. На основании этого было проведено моделирование ослабления γ -фона медной защитой и сравнение энергетического спектра полученного модельного фона с измеренным спектром внутри медной защиты. Окончательная эффективность полной защиты была получена моделированием после добавления водной защиты к защите из меди.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ ДЕТЕКТОРА РЭД-100

Нашей задачей являлось создание относительно компактной и легкой (в связи с лимитированной нагрузкой на пол в помещении станции), пожаробезопасной и дешевой защиты от внешнего радиационного фона, который представлен следующими основными компонентами:

- γ -квантами и нейтронами от естественных радиоактивных источников в веществе здания станции и конструкциях (вклад радиационного фона от реактора станции в месте расположения установки не является существенным);
- нейтронами, образующимися при взаимодействии космических мюонов с веществом здания станции и конструкциями.

Идеальной пассивной защитой от вышеперечисленных источников мог бы служить водяной бак большого размера (диаметром ~ 10 м), заполненный чистой водой, подобный тем, которые ис-

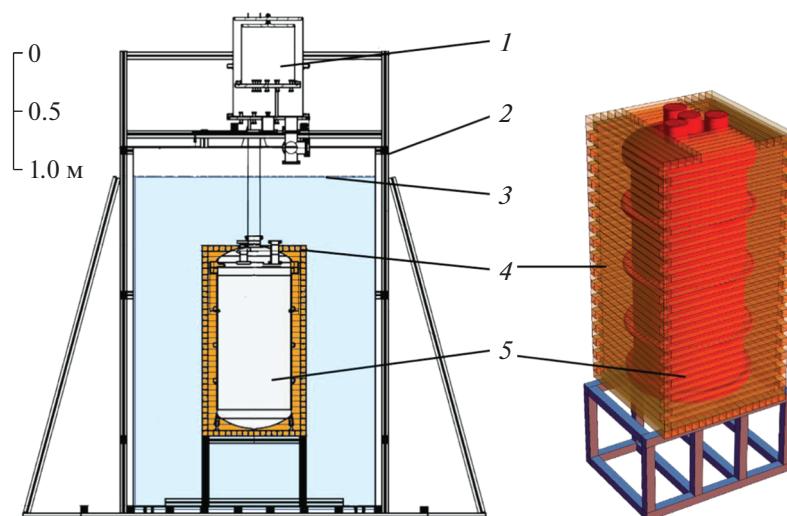


Рис. 1. Радиационная защита детектора РЭД-100. 1 – сосуд Дьюара термосифона; 2 – опорная рама; 3 – резервуар с водой; 4 – медная защита; 5 – корпус титанового криостата детектора РЭД-100.

пользуются в современных экспериментах по поиску темной материи в подземных лабораториях. Однако, принимая во внимание упомянутые выше ограничения, разместить в помещении станции резервуар диаметром более ~2 м с водой не представляется возможным. При таком диаметре толщина слоя воды между стенками детектора и бака (~0.75 м) оказывается недостаточной для полного поглощения γ -квантов высоких энергий.

В связи с этим было принято решение расположить дополнительный слой защиты из вещества с высоким значением Z толщиной 5 см на минимально возможном расстоянии от корпуса детектора, что обеспечивало минимальную массу защиты при ее заданной толщине. Были рассмотрены варианты медной и свинцовой защиты, и выбор материала был сделан в пользу меди. Основными аргументами при этом были следующие:

- для свинца удельный выход рождения нейтронов на один космический мюон составляет $(7.2 \pm 0.7) \cdot 10^{-5} \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^2$, что более чем в 3 раза превосходит соответствующую величину для меди $(2.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-5} \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ [20];
- медь является намного более чистым материалом по сравнению со свинцом по содержанию радиоактивных примесей.

Схема пассивной защиты детектора РЭД-100 показана на рис. 1. Резервуар 3 с водой представляет собой мягкий бак из армированного пластика диаметром 2.2 м, установленный внутри восьмигранной (в горизонтальном сечении) поддерживающей рамы 2, выполненной из алюминиевого конструкционного профиля AL-PS-6060-A сечением $6 \times 6 \text{ см}^2$. Детектор РЭД-100 (5) и окружающая его медная защита 4 установлены в центре

бака на постаменте из алюминиевого профиля высотой 0.6 м (см. рис. 1 справа). Полное расстояние от детектора до пола составляет 0.87 м.

Медная защита собрана из брусков размером $0.05 \times 0.05 \times 0.85 \text{ м}$, соединенных стальными штифтами. Внешние габариты медной защиты составляют $0.9 \times 0.9 \times 1.6 \text{ м}$. Система охлаждения и термостабилизации детектора на основе термосифона 1 (см. подробное описание в [21]) вынесена за пределы водяной защиты. Трубки охлаждения термосифона проходят внутри сильфона, подсоединенного к центральному фланцу детектора на верхней крышке криостата детектора.

Металлорукава (на рис. 1 не показаны), соединенные с тремя другими фланцами, служат для заполнения детектора ксеноном, подвода высоковольтного питания к детектору и вывода сигналов при помощи коаксиальных кабелей. Все перечисленные коммуникации с детектором проходят через прямоугольное окно размером $0.45 \times 0.4 \text{ м}$ в верхней части медной защиты. С учетом квадратного сечения медной защиты среднее расстояние между медной защитой и стенкой водяного бака составляет примерно 0.6 м, а между медной защитой и стенкой детектора ~0.1 м.

ИЗМЕРЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ γ -ФОНА

Оценка эффективности пассивной защиты от внешнего γ -фона требует знания энергетического спектра этого фона в месте ее установки. Согласно измерениям [22], проведенным группой DANNS в помещении КАЭС, расположенном над местом размещения установки РЭД-100, спектр и интенсивность γ -фона практически не отличаются от

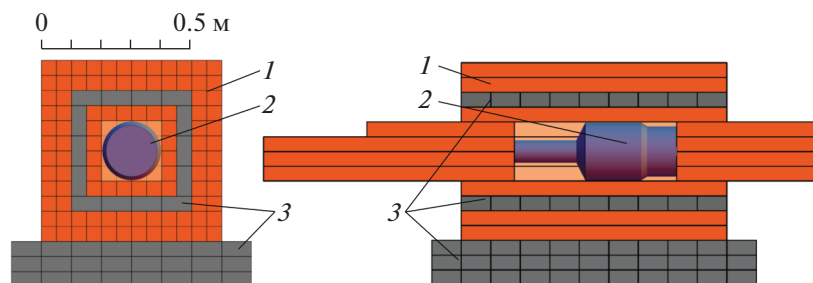


Рис. 2. Комбинированная свинцово-медная защита для измерения собственного фона сцинтилляционного детектора NaI(Tl). 1 – медь; 2 – детектор NaI(Tl); 3 – свинец.

соответствующих характеристик естественного фона, производимого γ -источниками от U/Th распадных цепочек и ^{40}K в бетоне. В связи с этим для определения эффективности пассивной защиты от внешнего γ -фона нами были проведены измерения γ -фона вне и внутри полностью собранной медной защиты в лаборатории НИЯУ МИФИ.

Измерения проводились с помощью сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI(Tl) в форме цилиндра размером $\varnothing 150 \times 100$ мм. Сигналы с детектора усиливались и формировались при помощи спектрометрического усилителя ORTEC 570, после чего подавались на многоканальный анализатор импульсов ORTEC MCA-927, управляемый при помощи программного обеспечения MAESTRO [23]. Данное программное обеспечение позволяло определять “живое” время измерений, что дало возможность сравнивать интенсивность γ -фона снаружи и внутри защиты.

Перед проведением измерений спектрометрический тракт был откалиброван при помощи источников γ -излучения ^{22}Na (511 кэВ, 1275 кэВ), ^{40}K (1461 кэВ) и ^{232}Th (с хорошо выделенной линией 2615 кэВ от ^{208}Tl). Бета-частицы, испускаемые этим источником одновременно с γ -квантами, поглощались тефлоновой пластиной толщиной 1 см. Во время калибровочных измерений с источником ^{232}Th , имеющим малую интенсивность, а также при измерении собственного фона детектор NaI(Tl) был помещен внутри толстой пассивной комбинированной защиты из свинца и меди (рис. 2), обеспечивающей подавление внешнего фона γ -излучения на несколько порядков величины. Для достижения стабильных характеристик спектрометрического тракта перед проведением измерений проводился длительный (3–5 ч) прогрев оборудования.

Результат калибровки энергетической шкалы спектрометрического тракта детектора NaI(Tl) и проверки ее линейности приведен на рис. 3а. Из графика видно, что энергетическая шкала линейна во всем диапазоне измерений γ -фона (см.

ниже). На рис. 3б показана зависимость энергетического разрешения детектора от энергии γ -квантов, которая была аппроксимирована формулой:

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{E}}$$

где E – энергия γ -кванта; σ – стандартное среднеквадратичное отклонение по энергии; a и b – параметры, значения которых приведены на врезке к рис. 3б. Данная зависимость энергетического разрешения детектора от энергии γ -квантов учитывалась при моделировании методом Монте-Карло γ -фона.

Измеренное энергетическое распределение событий радиационного фона в лаборатории в диапазоне энергий 0.4–5 МэВ показано на рис. 4 в виде залитой фоном гистограммы 1. Детектор находился на полу лаборатории без какой-либо защиты. Для аппроксимации данного распределения составляющими от отдельных γ -источников было проведено моделирование методом Монте-Карло с использованием пакета GEANT4 [24, 25]. В модельном эксперименте были заданы радионуклиды в цепочках распада ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . Концентрации этих элементов варьировались в качестве свободных параметров, и было принято, что промежуточные продукты распада в указанных цепочках находятся в равновесии.

В модели радионуклиды были равномерно распределены в бетонном полу (основном источнике γ -фона в лаборатории) размером 6×6 м и толщиной 0.5 м. Выбор данной толщины обусловлен тем, что, как было показано при моделировании, потоком γ -квантов от более глубоких слоев можно пренебречь. Как и во время измерений, детектор в модели находился на полу. Кроме вклада γ -излучения от перечисленных выше радионуклидов, при аппроксимации был учтен фон детектора, измеренный отдельно внутри свинцово-медной защиты, включающий в себя собственный γ - и β -фон детектора и низкоэнергетическую часть спектра энерговыделения от космических мюонов.

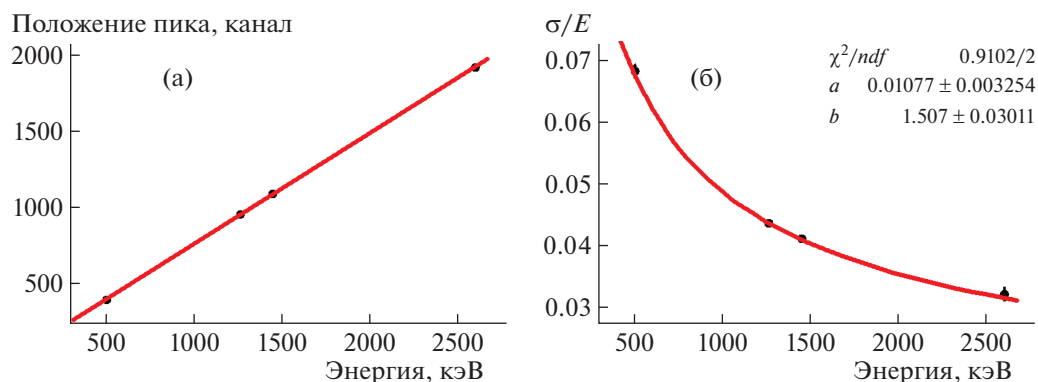


Рис. 3. Результат калировки спектрометрического тракта детектора Na(Tl): **а** – линейность энергетической шкалы; **б** – зависимость энергетического разрешения от энергии γ -квантов. Ошибки измерений (если не показаны) меньше размеров экспериментальных точек.

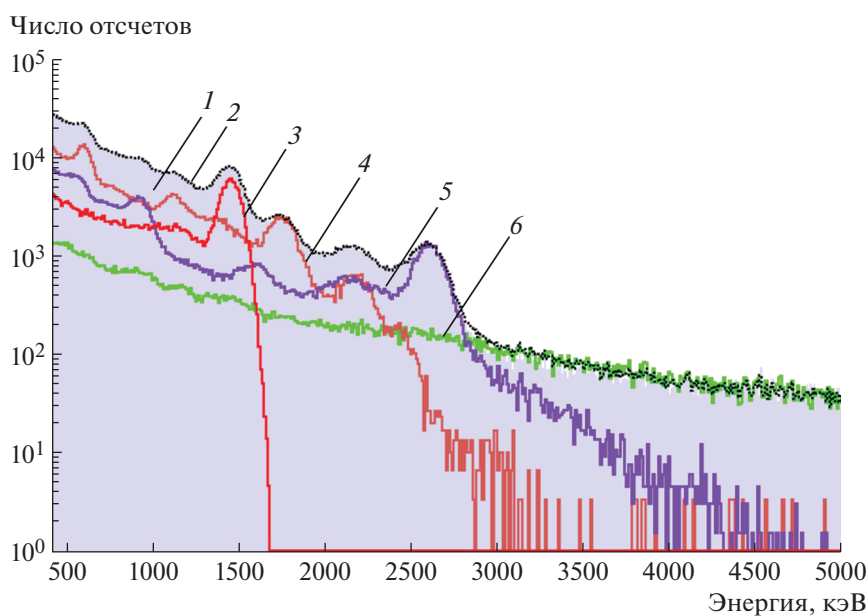


Рис. 4. Измеренный радиационный фон в лабораторном помещении (1) и его модельная аппроксимация (2) вкладом от изотопов ^{40}K (3), ^{238}U (4), ^{232}Th (5), включая также собственный фон детектора NaI(Tl) и фон от космических мюонов (6).

В результате проведенного моделирования было получено, что экспериментальный фоновый спектр хорошо аппроксимируется суммарной гистограммой 2, если в материале пола присутствуют ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в концентрациях (44 ± 1) , (21 ± 1) и (203 ± 1) Бк/кг соответственно. Компоненты фона от этих радионуклидов показаны на рис. 4 гистограммами 4, 5 и 3 соответственно. Полученные концентрации U/Th и K типичны для грунта и бетона [22, 26, 27].

Опорная рама, расположенная в непосредственной близости к защите, изготовленная из стандартного алюминиевого сплава и имеющая значительную массу, потенциально может содер-

жать высокие концентрации радионуклидов, являющихся источниками γ -фона. Поэтому 52-граммовый образец алюминиевого профиля был отправлен в подземную Баксанскую нейтринную обсерваторию для измерений на сверхнизкофономом HPGe-детекторе [28]. На основании проведенных измерений было получено, что вклад в γ -фон лаборатории от материала, из которого изготовлена опорная рама, невелик, и им можно пренебречь при моделировании фона.

Измеренное распределение по энергии событий радиационного фона внутри полностью собранной медной защиты показано на рис. 5 в виде залитой фоном гистограммы 1. Модельный γ -фон

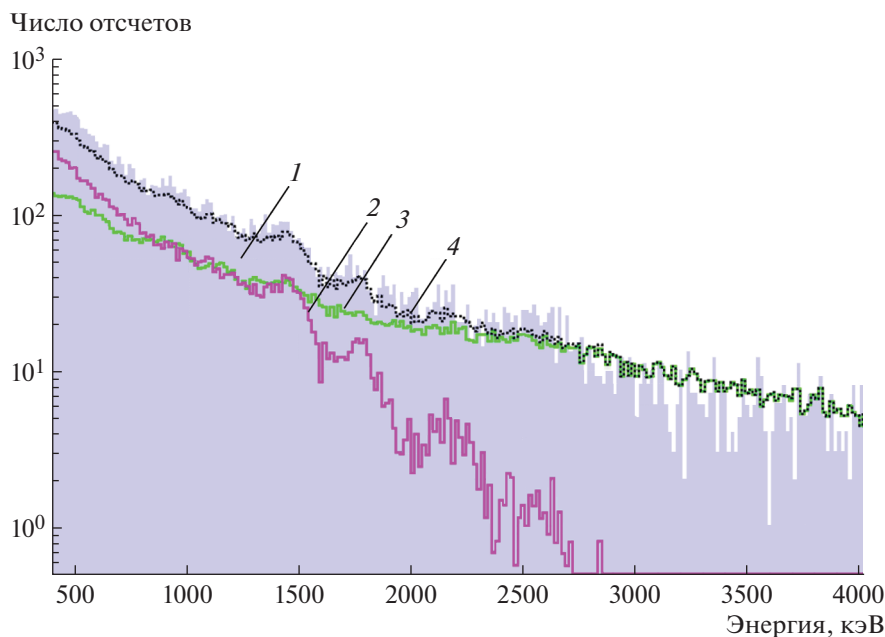


Рис. 5. Радиационный фон внутри медной защиты: 1 – измеренный фон; 2 – модельный γ -фон; 3 – собственный фон детектора NaI(Tl) и фон от космических мюонов; 4 – сумма компонент (2) и (3).

внутри защиты 2 был получен, исходя из приведенных выше концентраций изотопов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K для бетонного пола. Результирующий модельный фон 4 определен как сумма γ -фона 2 и фона 3, представляющего собой измеренный внутри свинцово-медной защиты собственный фон детектора NaI(Tl) и фон от космических мюонов. Рисунок 5 демонстрирует хорошее согласие величин и форм экспериментального и модель-

ного спектров радиационного фона внутри медной защиты.

Незначительное превышение экспериментального фона над модельным, по всей видимости, обусловлено неучтенным вкладом радионуклидных источников γ -фона в других местах лаборатории, а также наличием возможных небольших щелей между медными брусками защиты. Данный этап исследования показал нам правильность созданной математической модели медной защиты и распределения источников в лаборатории.

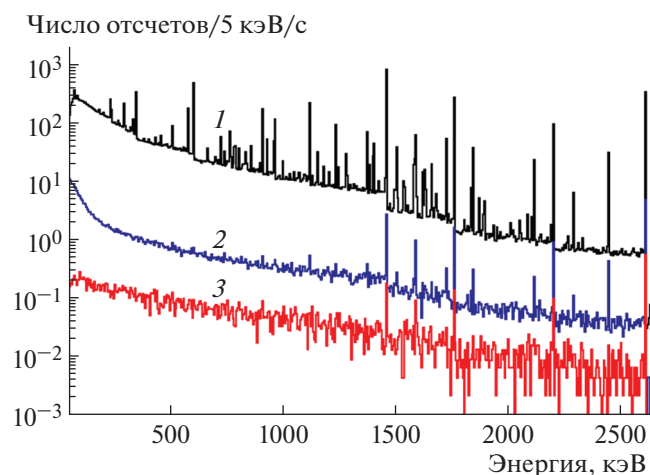


Рис. 6. Модельный γ -фон вне (1) и внутри (2, 3) пассивной защиты – водяного бака на внешней стороне криостата детектора РЭД-100 без медной защиты (2) и с медной защитой (3).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛНОЙ ЗАЩИТЫ

Последним шагом в данном исследовании было моделирование полной комбинированной защиты (см. рис. 1), включающей в себя воду и медь. Гамма-источники в виде радионуклидов задавались в бетонном полу лаборатории описанным выше образом и в той же концентрации. В результате моделирования был получен (рис. 6) спектр γ -фона на поверхности корпуса детектора РЭД-100 (усредненный по его поверхности) для следующих случаев: без защиты (гистограмма 1), с водной защитой (гистограмма 2) и с полной защитой (гистограмма 3), включающей воду и медь. Моделирование показало, что водная защита без меди существенно (примерно в 50 раз) снижает интегральный поток γ -квантов и смягчает их энергетический спектр. Медная защита толщиной 5 см дает дополнительное уменьшение потока γ -квантов в ~ 10 –13 раз. Кумулятивный эффект

подавления γ -фона пассивной защитой из воды и меди составляет 500–1000 в зависимости от энергии γ -квантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и создана комбинированная водно-медная пассивная защита двухфазного эмиссионного ксенонового детектора РЭД-100 для наблюдения процесса у.к.р.н. на атомном ядре на Калининской АЭС. Защита удовлетворяет ограничениям по габаритам и весу в помещении станции. Выполнено моделирование эффективности защиты по отношению к γ -фону методом Монте-Карло с помощью пакета GEANT4. Разработанная модель проверена сравнением экспериментально полученного распределения сигналов со сцинтилляционного детектора NaI(Tl), размещенного внутри медной защиты, с модельным распределением. Коэффициент подавления γ -фона пассивной защитой из воды и меди составил 500–1000 в зависимости от энергии γ -квантов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность АО “Наука и инновации” Госкорпорации “Росатом”, Российскому научному фонду (контракт № 18-12-00135 от 12.04.2018) за сотрудничество и поддержку постановки эксперимента на Калининской АЭС, а также Программе повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (контракт № 02.а03.21.0005, 27.08.2013) и Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (Проект “Фундаментальные свойства элементарных частиц и космология” № 0723-2020-0041). Авторы благодарны Ю.М. Гаврилюку, В.В. Казалову и В.В. Кузьминову за измерение собственной радиоактивности образцов элементов защиты в лаборатории низкофонных исследований БНО ИЯИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Freedman D.Z.* // *Phys. Rev. D.* 1974. V. 9. P. 1389. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.9.1389>
2. *Копелиович В.Б., Франкфурт Л.Л.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1974. Т. 19. С. 236.
3. COHERENT collaboration. *Akimov D. et al.* // *Science.* 2017. V. 357. Issue 6356. P. 1123. <https://doi.org/10.1126/science.aao0990>
4. COHERENT collaboration. *Akimov D. et al.* First Detection of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering on Argon. // 3 Apr 2020. arXiv:2003.10630
5. *Hakenmüller J., Buck C., Fülber K., Heusser G., Klages T., Lindner M., Lücke A., Maneschg W., Reginatto M., Rink T., Schierhuber T., Solasse D., Strecker H., Wink R., Zbořil M., Zimbal A.* // *Eur. Phys. J. C.* 2019. V. 79. P. 699. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7160-2>
6. *Kerman S., Sharma V., Deniz M., Wong H. T., Chen J.-W., Li H. B., Lin S. T., Liu C.-P., Yue Q.* // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93. P. 113006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.113006>
7. *Belov V., Brudanin V., Egorov V., Filosofov D., Fomina M., Gurov Y., Korotkova L., Lubashevskiy A., Medvedev D., Pritula R.* // *JINST.* 2015. V. 10. P12011. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/12/P12011>
8. MINER collaboration. *Agnolet G. et al.* // *Nucl. Instrum. and Methods. A.* 2017. V. 853. P. 53. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.024>
9. *Billard J., Carr R., Dawson J., Figueroa-Feliciano E., Formaggio J.A., Gascon J., Heine S.T., Jesus M.De, Johnston J., Lasserre T., Leder A., Palladino K.J., Sibille V., Vivier M., Winslow L.* // *J. Phys. G.* 2017. V. 44. № 10. P. 105101. <https://doi.org/10.1088/1361-6471/aa83d0>
10. *Strauss R., Rothe J., Angloher G., Bento A., Gütlein A., Hauff D., Kluck H., Mancuso M., Oberauer L., Petricca F., Pröbst F., Schieck J., Schönert S., Seidel W., Stodolsky L.* // *Eur. Phys. J. C.* 2017. V. 77. Article № 506. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5068-2>
11. CONNIE Collaboration. *Aguilar-Arevalo A. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2019. V.100. P. 092005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.092005>
12. *Долгошеин Б.А., Лебедеко В.Н., Родионов Б.У.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1970. Т. 11. С. 513.
13. LUX collaboration. *Akerib D.S. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P. 021303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.021303>
14. XENON Collaboration. *Aprile E. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 111302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.111302>
15. PandaX-II Collaboration. *Cui X. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 119. P. 181302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.181302>
16. DarkSide Collaboration. *Agnes P. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2018. V. 98. P. 102006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.102006>
17. DUNE Collaboration. *Cuesta C. et al.* Status of Proto-DUNE Dual Phase. // 22 Oct 2019. ArXiv: 1910.10115
18. *Акимов Д.Ю., Белов В.А., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Коновалов А.М., Кумпан А.В., Рудик Д.Г., Сосновцев В.В., Хромов А.В., Шакиров А.В.* // *УФН.* 2019. Т. 189. № 2. С. 173. <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.05.038356>
19. RED-100 Collaboration. *Akimov D. et al.* // *JINST.* V. 15 2020. P02020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/P02020>
20. *Kneißl R., Caldwell A., Du Q., Empl A., Gooch C., Liu X., Majorovits B., Palermo M., Schulz O.* // *Astropart. Phys.* 2019. V. 111. P. 87. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2019.03.006>
21. *Ананьев В.В., Болоздыня А.И., Власик К.Ф., Дмитренко В.В., Ефременко Ю.В., Утешев З.М., Сосновцев В.В., Толстухин И.А., Шакиров А.В., Шафигуллин Р.Р., Хромов А.В.* // *ПТЭ.* 2015. № 4. С. 138. <https://doi.org/10.7868/S0032816215030167>
22. *Alekseev I., Belov V., Brudanin V., Danilov M., Egorov V., Filosofov D., Fomina M., Hons Z., Kazartsev S., Kobayakin A., Kuznetsov A., Machikhiliyan I., Medvedev D., Nesterov V., Olshevsky A. et al.* // *JINST* 2016. V. 11. P11011. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/11/P11011>

23. <https://www.ortec-online.com/products/application-software/maestro-mca>
24. GEANT4 Collaboration. *Agostinelli S. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2003. V. 506. P. 250. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
25. GEANT4 Collaboration. *Allison J. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2016. V. 835. P. 186. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
26. *Kozlov A., Chernyak D.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2018. V. 903. P. 162. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.07.006>
27. *Chazal V., Brissot R., Cavaignac J.F., Chambon B., Jesus M.De, Drain D., Giraud-Heraud Y., Pastor C., Stutz A., Vagneron L.* // Astropart. Phys. 1998. V. 9. P. 163. [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(98\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(98)00012-7)
28. *Busanov O.A., Etezov R.A., Gavriljuk Yu.M., Gezhaev A.M., Kazalov V.V., Kornoukhov V.N., Kuzminov V.V., Moseev P.S., Panasenko S.I., Ratkevich S.S., Yakimenko S.P.* // EPJ Web of Conferences. 2014. V. 65. P. 03002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20136503002>