

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

На правах рукописи

БОЙКО НАДЕЖДА СЕРГЕЕВНА

**ФОТОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ
ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель,
д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Д. Скорохватов

Научный консультант,
ассистент каф. 40

_____ Ф. А. Дубинин

Москва 2023

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**ФОТОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ
ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

Студент	_____ Н. С. Бойко
Научный руководитель, д.ф.-м.н.	_____ М. Д. Скорохватов
Рецензент, к.ф.-м.н., доц.	_____ А. В. Гробов
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов
Рук. учеб. прог., д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Введение	5
2	Позитронно-эмиссионный томограф	9
2.1	Принципы работы ПЭТ	9
2.2	Макет ПЭТ для животных	11
2.3	Сцинтилляционный кристалл	12
2.4	Кремневые фотоумножители	14
2.5	Анализатор PETIROC2A	17
3	Характеристики макета ПЭТ	18
3.1	Определение рабочего напряжения Si-ФЭУ	18
3.2	Энергетическое разрешение макета ПЭТ	23
3.3	Модернизация установки	25
3.4	Измерение зависимости усиление Si-ФЭУ от температуры	25
3.5	Анализ данных и выводы	30
4	Принципы работы нейтринных детекторов	32
4.1	Детектирование реакторных антинейтрино и мониторинг работы реактора	32
4.2	Источники реакторных антинейтрино	33
4.3	Опытный образец измерительного модуля твердотельного нейтронного детектора	34
5	Определение характеристик образца модуля нейтринного детектора	37
5.1	Определение амплитуды сигнала в зависимости от расстояния до Si-ФЭУ	37
5.2	Измерение однородности сцинтиллятора на мюонном годоскопе УРАГАН	38

5.3 Анализ данных и выводы	40
6 Заключение	42
Список литературы	44

1 ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день переход от традиционных вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) к полупроводниковым аналогам - Si-ФЭУ (SiPM, MPPC, MAPD и др.) приобретает все большую популярность, как в области мегасайенс установок физики частиц [1] и астрофизики [2–4], так и у производителей детекторов мониторинга [5], сканирования и медицинского оборудования. Кремниевые фотоумножители, также известные как многопиксельные счетчики фотонов (MPPC) - это тип твердотельных кремниевых детекторов, они предназначены для детектирования фотонов оптического диапазона. Кремниевые фотоумножители компактны и не чувствительны к магнитным полям, они существенно превосходят вакуумные ФЭУ в эффективности регистрации фотонов, а дисперсия шумовых сигналов по амплитуде низкая, что позволяет устанавливать невысокий порог для малых амплитуд сигнала. Стоит отметить, что обновления серий датчиков с улучшенными характеристиками происходят раз в несколько лет производителями нескольких стран (Япония, США, Италия и т.д.), привлекательна их доступность в большом разнообразии конфигураций, таких как одиночные Si-ФЭУ, линейные массивы и матрицы разных размеров. В источниках [6–8], ссылаясь на проведенные измерения, авторы показывают, что полная замена ФЭУ на Si-ФЭУ в установке черенковского телескопа, сканере однофотонно-эмиссионной компьютерной томографии и других детекторах уже возможна благодаря развитию кремниевых технологий и снижению затрат, что делает Si-ФЭУ предпочтительным выбором в качестве фотонного детектора во многих областях.

В позитронно-эмиссионных томографах (ПЭТ) Si-ФЭУ получили широкое распространение в связи с развитием системы ПЭТ/МРТ (объединение позитронно-эмиссионной и магнитно-резонансной видов томографии), где нечувствительность к магнитным полям является решающим фактором применения исключительно полупроводниковых датчиков. Возможность повышения чув-

ствительности оборудования и улучшения качества изображений, а также наблюдение за обменными процессами опухолей в реальном времени играют важную роль в выборе типа детектора. Многие преимущества данной технологии в сравнении с аналогами обсуждаются в обзорной статье [9]. Если обратиться к другому типу детекторов - нейтринному, применяющемуся в задачах мониторинга частиц реактора атомных станций, то, в данном случае, решающим фактором является стоимость и эффективность работы детектора. Объединяя все вышесказанное, переход к Si-ФЭУ требует подробного изучения их характеристик в различных конфигурациях с выбранными сцинтилляторами и электронным оборудованием для внедрения и развития данной технологии.

Разработкой и строительством плавучих атомных электростанций (ПАЭС) на данный момент занимается несколько стран, таких как Китай, Южная Корея, США и Россия [10–13]. Большой опыт создания и эксплуатации корабельных и судовых атомных электроустановок (АЭУ) стал основой при разработке ПАЭС. В настоящее время имеются два полностью законченных проекта атомных реакторов для ПАЭС: реактор блочной конструкции КЛТ-40С тепловой мощностью 150 МВт и реактор интегрального типа АБВ-6М тепловой мощностью около 40 МВт. Их использование позволяет создавать ПАЭС мощностью от 12 до 75 МВт. Поскольку Россия планирует продавать энергию ПАЭС с другими странами, то обеспечение безопасности радиоактивного топлива является одной из приоритетных задач, для решения которой в ИФВЭ (Институт Физики Высоких Энергий) НИЦ «Курчатовский институт» были собраны опытные образцы нейтринных детекторов на основе сочетания пластиковых сцинтилляторов и Si-ФЭУ. Детекторы такого типа должны выполнять функцию непрерывного мониторинга заряженных частиц от реактора ПАЭС в реальном времени. Исследование и улучшение характеристик детекторов на основе Si-ФЭУ является **актуальной** задачей, поскольку предполагается, что детектор должен не только корректно и эффективно считывать сигналы от заряженных частиц, но и быть экономически выгодным при производстве и устойчивым к внешним воздействиям окружающей среды.

На сегодняшний день создание экспериментальных установок для проведения исследований фармакокинетики, то есть изучения процессов всасывания, распределения, метаболизма и выведения лекарственных препаратов в организме, представляет интерес для ученых, работающих в области радиомедицины.

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) является перспективным методом исследования миграции лекарственных препаратов с радиоактивной меткой в организме, поскольку позволяет составить достаточно точную карту внутренних органов. Именно поэтому разработка и исследование характеристик макета ПЭТ для лабораторных животных на основе новых неорганических сцинтилляторов $\text{GGAG}(\text{Ce})$ и нечувствительных к магнитным полям Si-ФЭУ, позволяющих совмещать ПЭТ и МРТ (магнитно-резонансная томография), **актуальны**.

Цель исследования заключается в разработке и создании сцинтилляционных детекторов ядерных излучений на основе кремниевых ФЭУ для прикладных задач. Их применение заключается в таких областях как

- 1) Ядерная медицина, где проводятся исследования характеристик конфигураций ПЭТ на основе новых неорганических сцинтилляционных кристаллов $\text{GGAG}(\text{Ce})$;
- 2) Нейтринная физика, для мониторинга атомных реакторов с помощью водородсодержащих органических сцинтилляторов.

Также, важной частью исследований являются развитие и внедрение новых сенсоров - кремниевых фотоумножителей (Si-ФЭУ) для повсеместного использования как в экспериментальных установках, так и в оборудовании.

Для достижения цели были сформулированы **задачи исследования**:

Для макета ПЭТ:

- 1) Оценить рабочее напряжение, соответствующее собственному наилучшему разрешению Si-ФЭУ, то есть, соотношению сигнал/шум детектора;
- 2) Определить характеристики макета ПЭТ такие, как энергетическое разрешение, при помощи метода совпадений на противоположных каналах установки, а также эффективности в зависимости от выбранных материалов и электронного оборудования.
- 3) Оценить значение неоднородности отклика детекторов для пиков с энергией 662 кэВ, определить пути улучшения данной характеристики, определить зависимость усиления Si-ФЭУ от температуры.

Для образца нейтринного детектора:

- 1) Определить характеристики опытных образцов измерительного модуля нейтринного детектора на основе пластикового сцинтиллятора для различных типов излучений;
- 2) Разработать алгоритм отбора полезных событий, вызванных регистраци-

ей заряженных частиц в модуле нейтринного детектора;

- 3) Дать оценку однородности отклика модуля и зависимости величины амплитуды сигнала от расстояния до Si-ФЭУ при помощи мюонного телескопа и годоскопа УРАГАН (УНУ НЕВОД).

Научная новизна макета ПЭТ заключается в применении нового сцинтиллятора GAGG(Ce) в сочетании с Si-ФЭУ. Характеристики GAGG(Ce) близки к характеристикам широко применяемого в ПЭТ LISO, а по некоторым превосходит и является привлекательной альтернативой. Применение Si-ФЭУ является новым подходом к конструированию ПЭТ и открывает перспективы совмещения его с МРТ. Образец модуля нейтринного детектора представляет исследовательский интерес как новое сочетание пластикового сцинтиллятора, изготовленного методом плавления полистирольных гранул, в составе которых 2% паратерфина и 0,05% РОРОР, в зеркальных формах, разработанным в ИФВЭ (Институт Физики Высоких Энергий) НИЦ «Курчатовский институт», WLS волокна, использующегося для смещения спектра, и Si-ФЭУ.

2 ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННЫЙ ТОМОГРАФ

2.1 ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПЭТ

Позитронно-эмиссионная томография позволяет исследовать структуру и функциональность тканей организма. Эта технология зарекомендовала себя в области диагностирования злокачественных новообразований. При проведении ПЭТ исследования пациенту вводят радиофармпрепарат (РФП). Самым распространенным РФП в онкологии является фтордезоксиглюкоза [14]. Это аналог глюкозы - универсального вещества, который участвует в обмене веществ всех клеток организма. Раковые клетки поглощают его быстрее, поэтому накапливают препарат в большей дозировке, это хорошо заметно при сканировании.

На практике распространение получил фтор, поскольку он имеет наибольший период полураспада при наименьшей энергии излучения. Это, во-первых, позволяет получить изображения высокого качества и пространственного разрешения, и, во-вторых, относительно большой период полураспада (109,8 мин) дает возможность транспортировки препарата от места производства до центров сканирования. Недостатком этого вещества, согласно статье [15], является то, что он в несколько большем количестве накапливается в тканях мозга и почек, что может вызывать подсвечивание этих органов даже при нормальном состоянии.

Радиоактивная метка подвергается β^+ -распаду. Позитрон, пройдя небольшое расстояние, аннигилирует с электроном, в результате чего рождаются два γ -кванта, разлетающиеся под углом 180° по отношению друг к другу. В противном случае отклонение от коллинеарности составляет примерно $0,23^\circ$, что при 80-ти см диаметре кольца ПЭТ приводит к потере в разрешении около 1,7 мм, согласно данным источника [16]. Энергия аннигиляционных фотонов во всех случаях равна 511 кэВ. Излучение регистрируется детекторами, расположенными вокруг источника, и на основании полученных данных строится

визуальная модель, которая показывает место локализации опухоли, ее размеры и метастазы.

Согласно данным зарубежных источников [17; 18], эффективные дозы в ПЭТ-диагностике достигают 20 – 30 мЗв за исследование, при этом эквивалентные дозы в отдельных органах и тканях могут превосходить эффективную дозу в несколько раз. В статье [19] проведено обширное исследование величины этого параметра на территории России.

Детекторы для ПЭТ должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) эффективность регистрации отдельного γ -кванта с энергией 511 кэВ - около 80 %;
- 2) пространственное разрешение - несколько миллиметров;
- 3) высокое временное разрешение;
- 4) энергетическое разрешение < 100 кэВ FWHM для отсеивания событий комптон-эффекта;
- 5) скорость счета на входе детектора - порядка $10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ временного окна.

Недостаточная анатомическая информация изображений при ПЭТ сканировании сильно затрудняет локализацию выявленных патологических очагов. В связи с этим, технологию ПЭТ, как отмечено в статье [15], совмещают с магнитно-резонансной томографией (МРТ), что позволяет на одном срезе получить анатомическое изображение с наложенной на него картой метаболических процессов. Появляется необходимость заменять чувствительные к магнитным полям вакуумные ФЭУ, представляющие из себя светочувствительные датчики детекторной системы ПЭТ, на Si-ФЭУ (SiPM). Помимо чувствительности к магнитным полям, недостатками вакуумных ФЭУ являются их высокая стоимость и рабочее напряжение. Si-ФЭУ не чувствительны к магнитным полям, их коэффициент усиления линейно зависит от подаваемой разности потенциалов, высокие значения квантовой эффективности и энергетического разрешения, малое напряжение питания (20 - 30 В, по сравнению с 600 - 1500 В у вакуумных ФЭУ) и низкая стоимость. К недостаткам можно отнести малую площадь чувствительной поверхности, то есть для работы необходимо создавать матрицу из Si-ФЭУ для увеличения объема сцинтилляционного кристалла и статистики собираемых данных. Также, как и любая высокоточная техника, Si-ФЭУ подвержены перекрестным шумам, как оптическим, так и электрическим.

На сегодняшний день, существует несколько работ, где исследуются свойства детекторов для ПЭТ с Si-ФЭУ в качестве датчиков, совмещенные с кристаллами сцинтилляторов различных химических составов. Например, в статье [20] рассматриваются характеристики матриц Si-ФЭУ с кристаллом LYSO(Ce), похожее исследование можно найти в источнике [21], где рассматривается модель ПЭТ на основе объединения массивов датчиков и кристаллов GGAG. Главным отличием установки является ее геометрия и, соответственно, принцип обработки информации.

2.2 МАКЕТ ПЭТ ДЛЯ ЖИВОТНЫХ

Макет позитронно-эмиссионного томографа (ПЭТ) представляет собой экспериментальную установку, которая была собрана в лаборатории НИЦ «Курчатовский институт». Кольцо с крышкой для позиционирования выполнено из поликарбоната, со специальными канавками для датчиков и сцинтилляционных кристаллов. Данный материал был выбран как наиболее технологичный и ударопрочный - во избежание образования сколов на канавках. Характерные размеры: внешний радиус - 160 мм, внутренний радиус - 90 мм, толщина - 10 мм. Всего канавок 32 шт, так как анализатор рассчитан на соответствующее количество датчиков. Собранный макет ПЭТ представлен на рисунке 2.1.

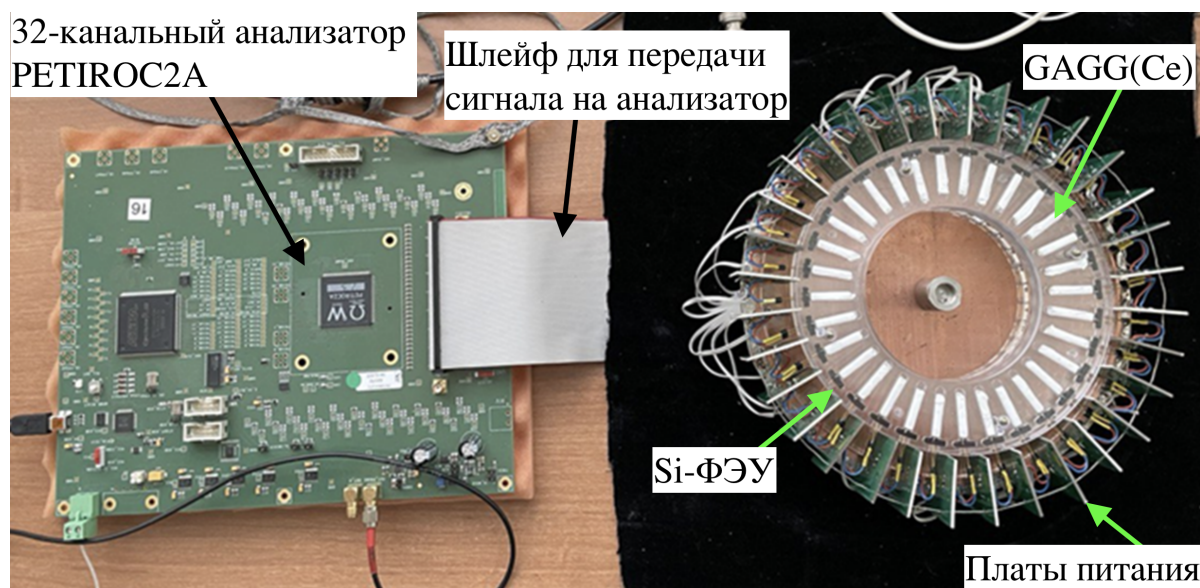


Рисунок 2.1 — Внешний вид макета ПЭТ

2.3 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ КРИСТАЛЛ

Неорганические кристаллы GAGG(Ce) ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}(Ce)$, гадолиний-алюминий-галлиевый гранат, активированный Ce), производства OST Photonics были выбран в качестве сцинтиллятора. Выбор был сделан в пользу данных кристаллов, так как они представляют интерес для исследования, поскольку это достаточно новый материал, а также его характеристики сочетают в себе высокое значение плотности, сравнительно короткое время высвечивания, отсутствие гигроскопичности и собственного фона и достаточно близкое значение эффективной длины волны к аналогичному значению Si-ФЭУ. В таблице 2.1 представлены основные характеристики кристалла и сравнительный анализ с другими распространенными кристаллами.

Легирование церием (Ce) обеспечивает сцинтилляционные характеристики, способные составить конкуренцию как традиционным сцинтилляционным кристаллам (NaI(Tl), CsI(Tl)), так и усовершенствованным силикатам, легированным церием (например, LYSO(Ce)), и галогенидам лантана (например, LaCl₃(Ce)). Они обернуты тефлоновой лентой для лучшего светосбора. Характерные размеры: 3x3x20 см.

Время высвечивания или затухания сцинтиллятора должно быть как можно меньшим для обеспечения высокой скорости счета. Особенно критичным этот параметр становится при регистрации больших потоков частиц в медицине и физике высоких энергий. Экспериментальным путем было установлено, что сцинтилляторами с приемлемым временем затухания и достаточно высоким световым выходом, являются кристаллы с примесями церия (25 - 30 нс) и празеодима (15 - 25 нс). Еще более быстрыми сцинтилляторами являются материалы, активированные ионами неодима, однако световой выход таких сцинтилляторов крайне мал, что связано с неэффективными механизмами передачи энергии к ионам неодима, поэтому сейчас такие сцинтилляторы практически не применяются. Согласно [27], световой выход связан с числом электрон-дырочных пар, образующихся в кристалле при поглощении ионизирующего излучения и обратно пропорционален ширине запрещенной зоны материала:

$$LY \simeq \frac{1}{\beta E_g} \quad . \quad (2.1)$$

Таблица 2.1 — Сравнительные характеристики распространенных сцинтилляционных кристаллов. Данные взяты из источников [22–25], а также с сайта производителей используемых GAGG(Ce) кристаллов [26]

	CsI(Tl)	LYSO(Ce)	LaCl ₃ (Ce)	NaI(Tl)	GAGG(Ce)
Плотность (г/см ²)	4.51	7.2	3.85	3.67	6.63
Эффективный Z_{eff} (атомный) номер	54	65	59.5	50	54.4
Длина вол- ны тах поглощения (нм)	550	420	350	415	540
Время вы- свечивания (нс)	1050	40	28	230	90(90%)255(10%)
Энергитическое разрешение 662 кэВ (проц.)	7	7	—	6,5	< 6%
Световыход (фото- ны/кэВ)	54	32	49	38	> 50
Гигроско- пичность	Слабая	—	+	+	—
Собственная радиоактив- ность	—	+	+	—	—

В этом выражении β - константа, которая принимает значение от 2 до 3 и βE_g имеет смысл средней энергии, которая необходима для образования одной формализованной электрон-дырочной пары в кристалле с запрещенной зоной E_g , определяющийся числом электрон-дырочных пар n_{eh} , которые создаются в ионизационном треке, после попадания частицы высокой энергии E_γ в сцинтиллятор.

Немаловажным ограничивающим фактором является гигроскопичность материала - способность некоторых веществ поглощать водяные пары из воздуха. Все сцинтилляторы на основе йодидов, хлоридов и бромидов гигроскопичны. При контакте с воздухом они поглощают из него водяные пары, что приводит

к их деградации или полному разрушению. Поэтому такие материалы должны сразу после выращивания в специальных боксах герметично упаковываться в контейнеры.

Как итог, GAGG(Ce) можем считать хорошей заменой кристаллов LYSO(Ce), чаще всего использующийся в сцинтилляционных детекторах для задач медицинской ядерной физики. GAGG представляет исследовательский интерес его применимости совместно с Si-ФЭУ, так как это относительно новый материал. В частности, поскольку GAGG имеет относительно высокую плотность, он может быть привлекательным вариантом для тех применений обнаружения γ -излучения, где эффективность детектирования является критическим фактором, как, например, ПЭТ, объединенная с магнитно-резонансным томографом (ПЭТ/МРТ). Сейчас продолжаются исследования, которые показали, что в связи с активацией его на свету и последующим продолжительным высвечиванием есть необходимость предварительного выдерживания его в темноте для достижения наилучшего разрешения детектора.

2.4 КРЕМНЕВЫЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

В качестве датчиков были выбраны кремниевые фотоумножители (SiPM, Silicon Photomultiplier) производства фирмы SensL (сейчас Onsemi) серии C (FC-30035), которые на момент покупки отличались наименьшим значением рабочего напряжения (30В) в сочетании с высоким PDE и малым разбросом напряжения пробоя.

Данная линейка датчиков с высоким коэффициентом усиления [28], чувствительных в одноэлектронном режиме, от ультрафиолетового до видимого света, с максимумом чувствительности при значении длины волны 420 нм. Они обладают рабочими характеристиками, аналогичными обычным ФЭУ, при этом сочетают в себе компактность, амплитудой выходного сигнала. На рисунке 2.2 представлена зависимость PDE от длины волны регистрируемого излучения.

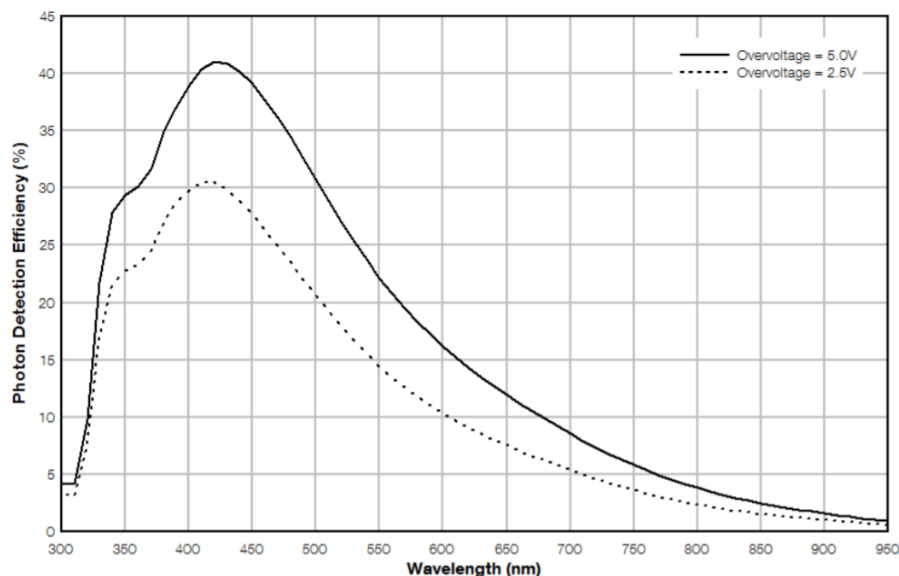


Рисунок 2.2 — Зависимость PDE от длины волны и перенапряжения

Эта величина отражает чувствительность Si-ФЭУ, или же отношение числа частиц, зарегистрированных за время измерения, к числу частиц, попавших в детектор за это же время, и определяется как

$$PDE(\alpha, T, U) = QE(\alpha)\epsilon_g P_G(\alpha, T, U) \quad (2.2)$$

где QE - квантовая эффективность чувствительной площади фотодетектора, ϵ_g - геометрическая эффективность, равная отношению чувствительной площади к полной площади Si-ФЭУ, $P_G(\alpha, T, U)$ - вероятность того, что образовавшийся фотоэлектрон вызовет пробой, значение которой возрастает с увеличением перенапряжения U , которое в свою очередь зависит от температуры T .

Отметим, что в сочетании датчика с кристаллом GAGG эффективность уменьшается на 45% от максимального значения. Рисунок 4 - Зависимость эффективности регистрации фотонов SiPM от длины волны, заявленная производителем.

Si-ФЭУ представляют собой матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD) работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы Si-ФЭУ представлено на рисунке 2.3, у разных производителей схемы могут отличаться.

В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины.

Для увеличения динамического диапазона, а также эффективности реги-

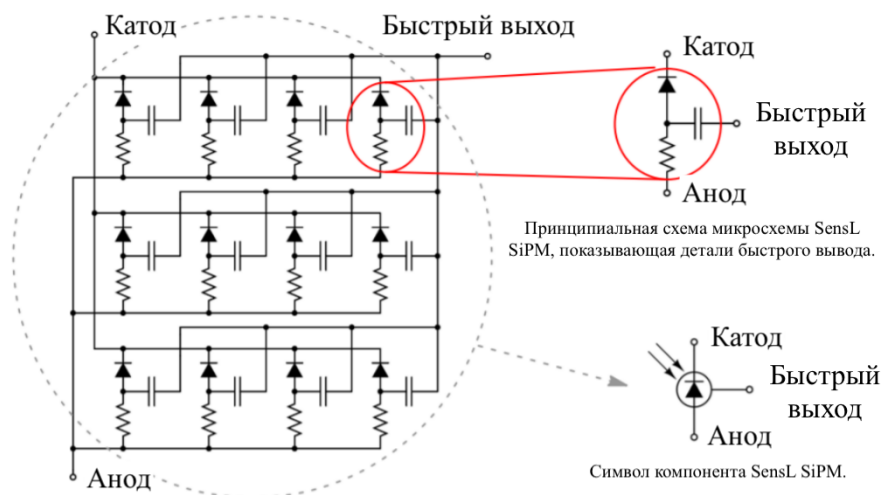


Рисунок 2.3 — Упрощенная принципиальная схема Si-ФЭУ (Onsemi), взятая из технической документации [29]

страции фотонов, схемы ЛФД, соединенные параллельно, объединены в массив.

ЛФД - это полупроводниковый диод, подключенный в режиме сильного обратного смещения, превосходящего напряжение пробоя. Усиление линейно зависит от величины приложенного напряжения. Ёмкость прибора, которая зависит от площади полупроводника и его толщины, накладывает ограничение на время восстановления, то есть на скорость счета.

Для каждого датчика собрана плата питания, которое осуществляется от единого источника. Для дальнейшей калибровки Si-ФЭУ были определены рабочие точки, которые представляют собой оптимальное значение напряжение смещения, при котором достигается наилучшее энергетическое разрешение детектора. Этот параметр зависит от коэффициента усиления, растущей при увеличении напряжении, и соотношения сигнал/шум. При слишком высоком напряжении повышается вклад электрических кроссстоклов (шумов) прибора, это снижает точность.

Производитель в технической документации указывает среднее значение напряжения пробоя, однако существует необходимость тестировать каждый отдельно, так как, на практике, у разных Si-ФЭУ одной серии они могут значительно отличаться.

Сбор сигнала с 32 Si-ФЭУ осуществляется через шлейф, присоединенный на входные pin-контакты платы.

2.5 АНАЛИЗАТОР PETIROC2A

Petiroc 2A - это 32-канальный анализатор, предназначенный для считывания сигналов SiPM для измерения времени пролета частиц. Плата сочетает в себе быстрый запуск и точные измерения заряда и времени. Главная особенность данной платы заключается в возможности объединения двух измерений: временного и зарядового [30].

Основное применение Petiroc 2A - работа с детекторами медицинского оборудования, предназначенного для сканирования малых по размерам животных, но его также можно использовать для иных исследований, требующих как точного временного разрешения, так и точного измерения энергии.

Конструкция платы позволяет считывать, записывать и обрабатывать сигналы одновременно с 32 каналов. На рисунке 5 изображена принципиальная схема платы, где видно, что полученный сигнал с датчиков через вход (positive or negative input) сначала проходит через предусилитель (preamplifier), после чего с учетом временного порога, выставленного пользователем (threshold), происходят временные измерения (time measurement), в результате чего на выходе получаем временной триггер (time trigger) для отсчета окна задержки.

Одновременно с этим сигнал идет по тракту для зарядовых измерений (charge measurement), где с помощью формирующего усилителя (CRRC shaper for charge measurement) создается сигнал для получения пика импульса в результате сканирования (Hold scan). На основе этого измерения и заданного пользователем зарядового порога происходят измерения амплитуды сигнала. На рисунке 5 показаны элементы контроля общего (8-bit input DAC) и индивидуальных (6-bit input DAC) порогов для каналов, а также датчик мониторинга температуры. Запуск считывания данных идет от срабатывания временного триггера.

Для сбора и первичного анализа данных существует готовое программное обеспечение (ПО), которое позволяет собирать не только спектры радиоактивных источников, но и отслеживать совпадения как в противоположных каналах, так и для соседних, что, в свою очередь, в дальнейшем позволит восстановить местоположение источника радиоактивного излучения и его геометрию.

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА ПЭТ

3.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ Si-ФЭУ

Метод определения оптимальной величины напряжения основан на определении разрешающей способности Si-ФЭУ при различных напряжениях.

Схема экспериментальной установки включает в себя усилитель (PSAU, Power Supply and Amplification Unit), оцифровщик (DT5720A - 2-канальный 12-битный настольный преобразователь сигналов) и LED драйвер производства CAEN в схеме осуществляют подстройку, сбор и оцифровку сигнала. Более подробную информацию об оборудовании можно найти в источнике [31; 32]. Эта установка позволяет тестировать Si-ФЭУ в режиме сбора одноэлектронных спектров при разных значениях напряжения, усиления и интенсивности светового потока. Датчик помещается в светоизолированную емкость, после чего дополнительно укрывается черной тканью.

На рисунке 3.1 представлена схема экспериментальной установки.

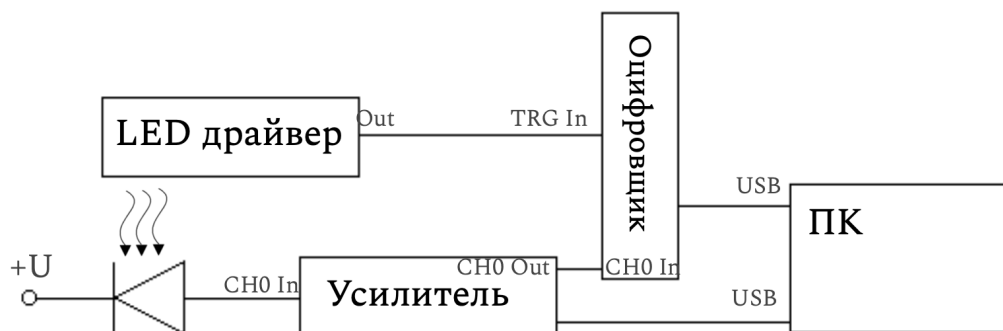


Рисунок 3.1 — Схема экспериментальной установки

В ходе эксперимента на Si-ФЭУ подается напряжение в пределах от 25,5 В до 30 В. LED является одновременно источником фотонов и триггером для АЦП. Сигнал с Si-ФЭУ идет на вход усилителя, далее на нулевой канал (CH_0)

оцифровщика. Есть возможность настройки параметров на усилителе и оцифровщике, которые подключены к персональному компьютеру (ПК), где установлена специализированная программа для сбора и анализа данных. В данном эксперименте усиление составило 40 дБ, а в выставлении триггерных порогов не было необходимости в силу наличия внешнего триггера.

На рисунке 3.2 показан внешний вид окон программного обеспечения, в режиме отображения формы волны и собранного одноэлектронного спектра, который представляет собой график зависимости количества вхождений от номера канала АЦП (аналого-цифрового преобразователя).

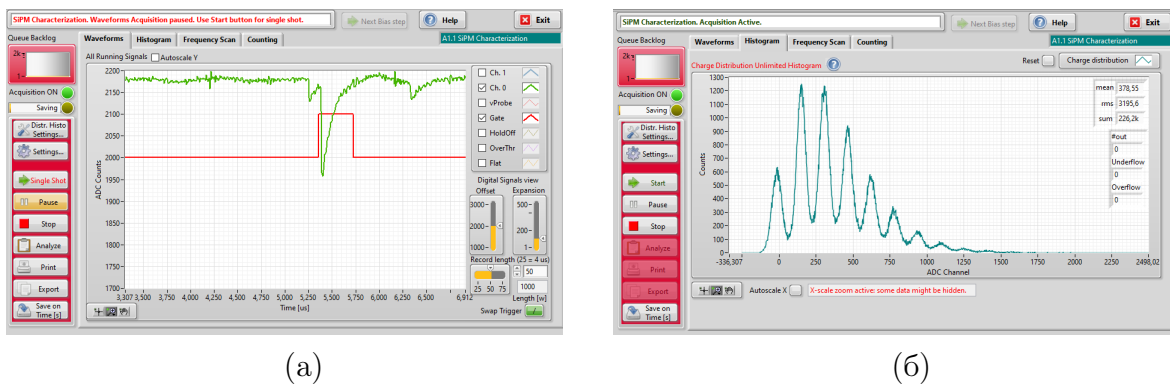


Рисунок 3.2 — (а) - форма сигнала, снимаемого с Si-ФЭУ, (б) - одноэлектронный спектр

Собранный спектр представляет собой зависимость количества вхождений от номера канала АЦП (аналого-цифрового преобразователя).

Импульс типичной треугольной формы с крутым фронтом и более пологим спадом. Длительность переднего фронта определяется основными процессами в детекторе, длительность спада - величиной RC выходной цепи. Также скорость нарастания переднего фронта зависит от времени высвечивания сцинтиллятора, пока интенсивности света будет достаточно для рождения пары электрон-дырка, передний фронт будет нарастать. С данным LED драйвером, скорость нарастания мала, так как в нем установлен быстрый светодиод, у которого время высвечивания минимально. При стремлении величины сопротивления резистора в цепи к бесконечности сигнал будет нарастать тоже бесконечно по экспоненциальному закону. Амплитуда импульса напряжения на выходе зависит от величины RC -нагрузки.

При детальном рассмотрении полученных одноэлектронных спектров, с ростом количества событий, ошибка растет как квадратный корень, согласно

распределению Пуассона. Расстояние между соседними пиками соответствует среднему усилению одной ячейки. Ширина 0-го пика определяется шумами электроники, увеличение ширины 1-го пика по отношению к 0-му определяется технологическим разбросом усиления ячеек, который является чисто случайным процессом. Так как ячеек достаточно много, то распределение усилений и, соответственно, нулевого и последующих пиков подчиняется распределению Гаусса. При увеличении напряжения на Si-ФЭУ, статистика в правых пиках будет расти, что обусловлено увеличением вероятности регистрации фотона в p-n-переходе.

Рабочая точка определена путем расчета величины разрешения для различных значений напряжения. Получены спектры для значений напряжения от 25,5 до 29 В, с шагом 0,5 В. Внешний вид типичных спектров представлен на рисунке 3.3.

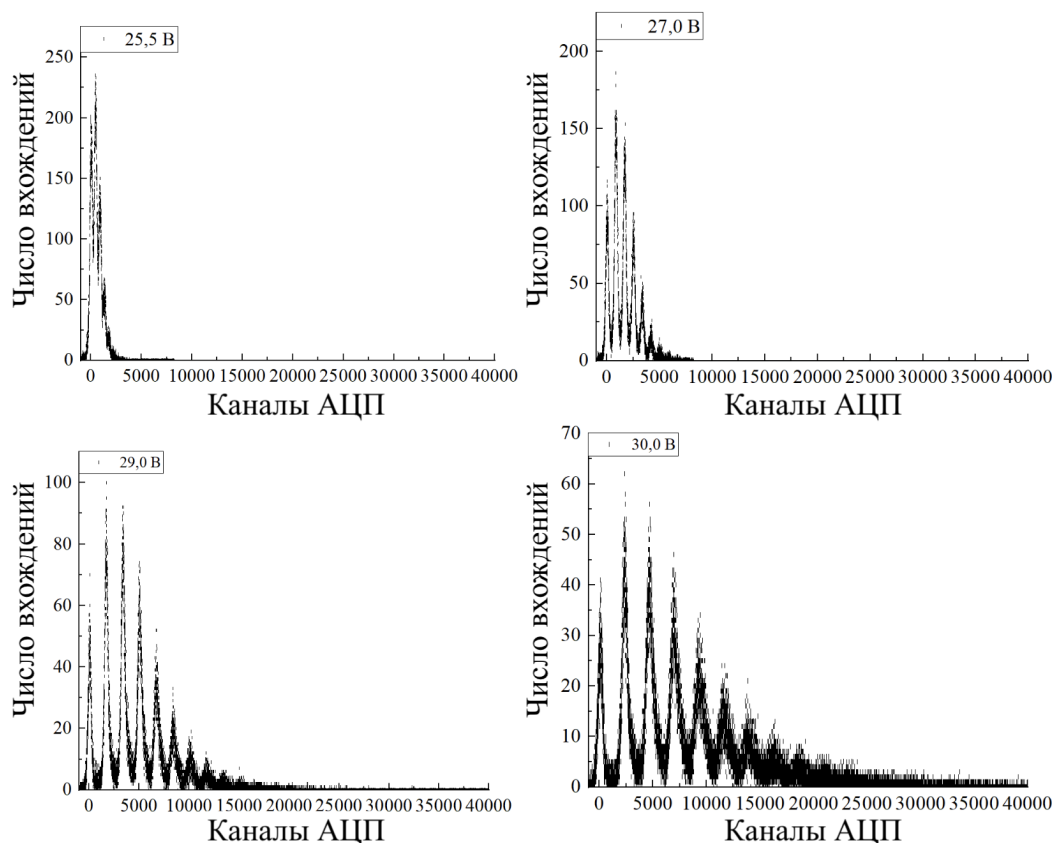


Рисунок 3.3 — Одноэлектронные спектры для 25,5 В, 27,0 В, 29,0 В и 30,0 В, где хорошо заметно усиление Si-ФЭУ в зависимости от повышения напряжения. Спектры получены при одинаковых начальных условиях и параметрах установки

Отклонение формы пиков от гауссовой с ростом напряжения связано с послеимпульсами (afterpulsing) Si-ФЭУ, которые наряду с кросс-током (cross-talk)

является основным источником шумов в датчике, расчетом влияния которых занимаются исследовательские группы [33; 34]. Послеимпульсы обусловлены теми носителями заряда в лавинном процессе, которые задерживаются в ловушках или дефектах полупроводникового материала и затем высвобождаются с постоянной времени задержки типично 200 - 300 нс в зависимости от температуры, что сопровождается образованием нового лавинного процесса.

В результате фитирования гауссом нулевого и третьего, как крайнего доступного для анализа при любом значении напряжения, пиков были получены значения математического ожидания и сигмы. На основе этих значений были рассчитаны значения R (разрешающая способность) по формуле

$$R = \frac{\Delta_{pp}}{\sigma_{gain}} \quad , \quad (3.1)$$

где

$$\sigma_{gain} = (\sigma_3^2 - \sigma_0^2)^{1/2} \quad , \quad (3.2)$$

Δ_{pp} - расстояние между пиками (нулевым и первым).

Это допустимо в нашем случае, так как, в первую очередь, значение сигмы третьего пика всегда будет больше нулевого, так как с увеличением порядкового номера пика, его среднеквадратичное отклонение растёт.

На рисунке 3.5 приведены в качестве наглядного примера полученные распределения в результате вычислений зависимости разрешающей способности от величины напряжения для двух разных Si-ФЭУ. Аппроксимация производилась полиномом второй степени.

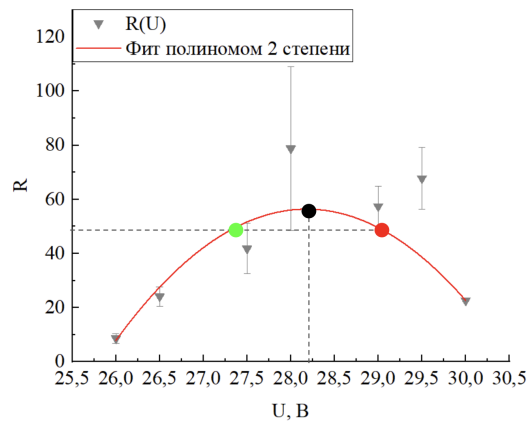


Рисунок 3.4 — Черным показана точка, где наблюдается наилучшая разрешающая способность Si-ФЭУ. Красным и зеленым - отклонения на 10% от наилучшего разрешения в большую и меньшую стороны значений напряжения соответственно

Рабочие точки были определены для всех 32 Si-ФЭУ. На рисунке 3.5 представлен результирующий график рабочих точек. Также на нем показаны абсолютные значения напряжений при отклонении от рабочего напряжения на 10%. Поскольку нет возможности подавать на каждый Si-ФЭУ индивидуальное напряжение, то оптимальным решением является установка некоего среднего значения напряжения на все датчики.

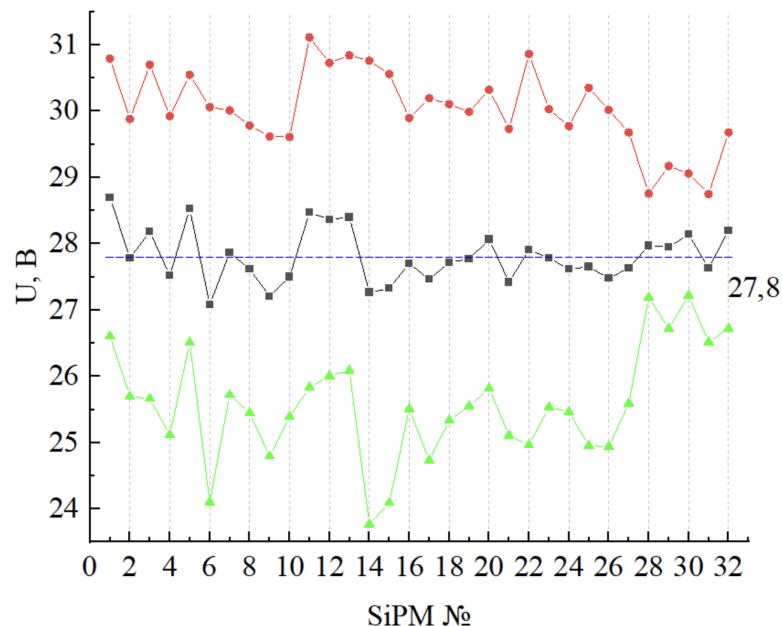


Рисунок 3.5 — Черным показаны рабочие точки для каждого кремниевого фотумножителя. Красным и зеленым - отклонения на 10% от наилучшего разрешения в большую и меньшую стороны значений напряжения соответственно. Синим построен линейный фит для определения среднего значения напряжения

Видно, что при отклонении от оптимального напряжения по выставленному, в связи со статистическим разбросом, разрешение измениться в пределах десятой доли от максимального значения. Как итог, из расчетов, общее значение напряжения для всех 32 Si-ФЭУ равно $27,8 \pm 0,07$ В.

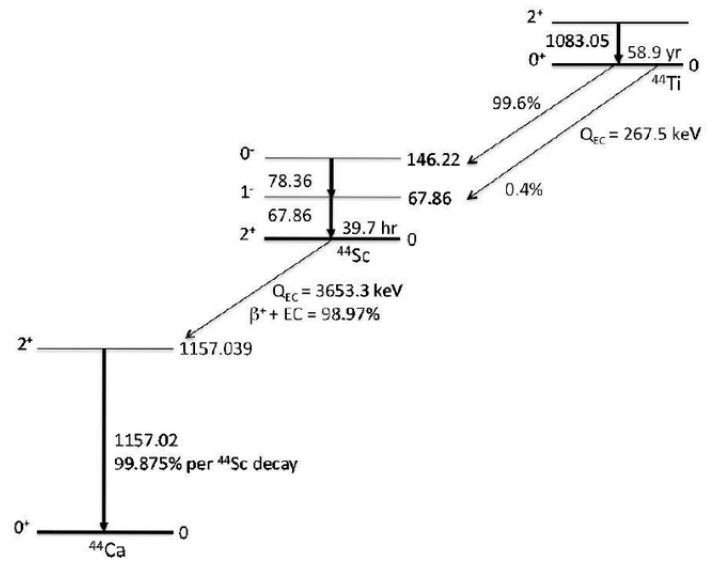
3.2 ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ МАКЕТА ПЭТ

Разрешение по энергии подразумевает способность детектора различать частицы с близкими по значению энергиями. Чем выше разрешающая способность, тем проще выставить пороги для событий определенного энергитического спектра, при этом исключая потери полезных данных. Ранее уже упоминалось, что энергитическое разрешение ПЭТ должно быть меньше 100 кэВ, так как от этого показателя зависит также скорость набора данных, что крайне важно для соблюдения норм радиационной безопасности.

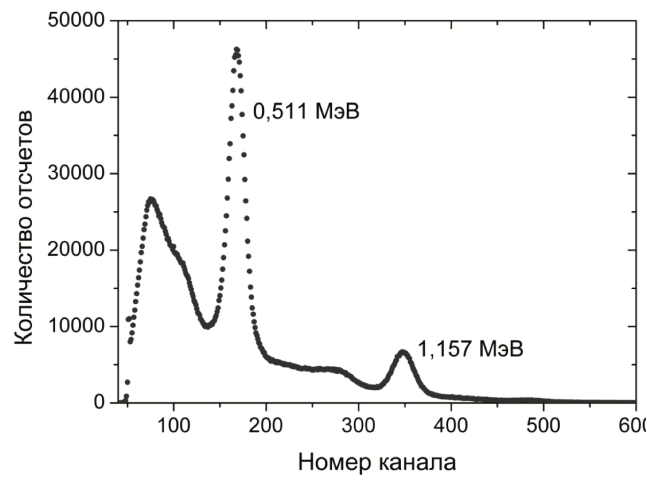
Ранее уже было измерено энергитическое разрешение при помощи Cs-137, которое составило 15% для 662 кэВ с неоднородностью сигнала 11%.

Ti-44 подходит для измерения временного распределения аннигиляции позитронов, поскольку эталонный гамма-квант с энергией 1,157 МэВ излучается почти одновременно с позитроном, спектр представлен на рисунке 3.6.

Вклад в ухудшение энергитического разрешения вносят шумы Si-ФЭУ, совмещение спектра чувствительности датчика к свету и спектра испускания сцинтиллятора, наличие дефектов в кристаллической структуре или недостаточно хороший контакт между датчиком и кристаллом. Также ухудшение энергитического разрешения заметно при наличии собственного излучения низких энергий сцинтиллятора. В случае кристалла GAGG(Ce) при продолжительном его нахождении на свету, в спектре наблюдается вклад в комптон и некоторое уширение фотопика. На рисунке 3.7 показаны полученные спектры Ti-44 одновременно со всех 32 каналов анализатора, а также распределение времени совпадений по каналам.

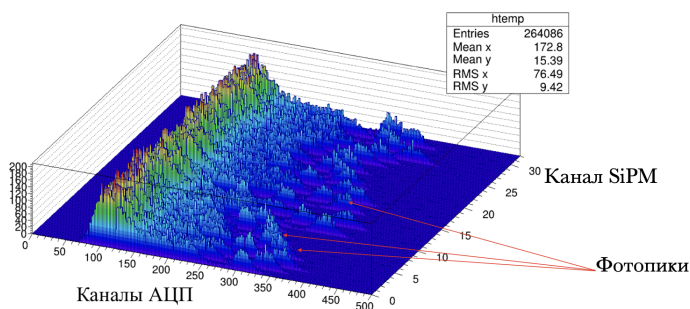


(а)

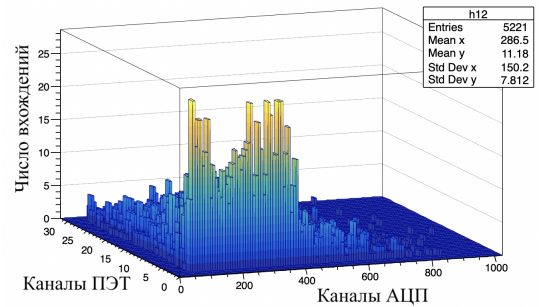


(б)

Рисунок 3.6 — Распад радиоактивного изотопа Тi-44 и его спектр из источника [35]



(а)



(б)

Рисунок 3.7 — (а) - Спектры Cs-137 для 32 каналов многоканального анализатора PETIROC2A, (б) - спектры Тi-44, собранные с 32 каналов одновременно для случаев совпадений в двух противоположных каналах

Энергетическое разрешение рассчитано, как отношение ширины пика на половине высоты к его положению, после фитирования распределением Гаусса пиков.

3.3 МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ

В качестве способов улучшения показателей макета ПЭТ для обеспечения возможности применения установки в прикладных задачах физики ядерной медицины возможны следующие пути развития:

Во-первых, решение проблемы недостаточного контакта между светочувствительными датчиками и сцинтилляционного кристалла путем их склеивания оптическим клеем ОК-72ФТ15, показатели преломления которого составляют около 1,6, что позволит не только исключить потери света в результате смещения кристалла относительно чувствительной площади датчика, но и прекратить попадание внешнего света на него. Поскольку ранее было выяснено, что GGAG(Ce) обладает продолжительной люминесценцией, которая вносит вклад в энергетическое разрешение детектора.

Во-вторых, возможность замены фум-ленты, которой на данный момент обернуты сцинтилляционные кристаллы для обеспечения наилучшего светосбора, на светоотражающую краску, которая сохранит свою структуру на более продолжительный срок. Предполагается, что качество светосбора соответственно повысится, поскольку между материалом сцинтиллятора и краской не будет присутствовать воздушная прослойка.

3.4 ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УСИЛЕНИЕ SI-ФЭУ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Зависимость коэффициента усиления G Si-ФЭУ амплитуды сигнала A от температуры и напряжения были измерены в условиях различных температур, контроль которых осуществлялся при контроле температуры. Данные определяются для каждого Si-ФЭУ отдельно, чтобы определить dG/dT и dA/dT .

Далее предполагается, что наблюдаемая температурная зависимость Si-ФЭУ обусловлена только зависимостью пробойного напряжения от температу-

ры. С этим предположением определим:

$$\frac{dA}{dT} = \frac{dA}{dU} \cdot \frac{dU}{dT}, \quad (3.3)$$

и

$$\frac{dG}{dT} = \frac{dG}{dU} \cdot \frac{dU}{dT}. \quad (3.4)$$

Разделив эти два уравнения, получим

$$\frac{dA}{dT} / \frac{dG}{dT} = \frac{dA}{dU} / \frac{dG}{dU}. \quad (3.5)$$

Это связывает четыре зависимости друг с другом и дает нам два метода вычисления зависимости амплитуды от коэффициента усиления dA/dG . Один из них основан на измерении температуры,

$$\left(\frac{dA}{dG} \right)_T = \frac{dA}{dT} / \frac{dG}{dT}, \quad (3.6)$$

второй - на измерении напряжения,

$$\left(\frac{dA}{dG} \right)_U = \frac{dA}{dU} / \frac{dG}{dU}. \quad (3.7)$$

Полученные выражения необходимы для нахождения коэффициента зависимости амплитуды и усиления от температуры. Метод введения поправки заключается в первом случае в перерасчете

$$X = X_0 + \frac{dX}{dT} \cdot \Delta T, \quad (3.8)$$

где X - либо амплитуда сигнала A , либо коэффициент усиления G . Для внесения этих поправок необходимы частые измерения температуры, которые выполняются во время сбора данных. Для более точной коррекции нужны измерения температуры для каждого Si-ФЭУ, что было в некоторой степени реализовано при помощи термодатчика, который записывает изменение температуры на протяжении всего времени сбора данных.

Во втором случае, методом коррекции температурной зависимости амплитуды сигнала является использование коэффициента усиления Si-ФЭУ в

качестве показателя температуры:

$$A = A_0 + \frac{dA}{dG} \cdot \Delta G, \quad (3.9)$$

Определение коэффициента усиления с высокой точностью занимает довольно много времени. Таким образом, для достаточно точной коррекции температурной зависимости амплитуды сигнала с помощью этого метода потребовалось бы более частое измерение коэффициента усиления, согласно статье [36].

Из формулы (3.9) видно, что помимо измерения амплитуды, для расчета поправочного коэффициента необходимо получить данные, как изменяется усиление в зависимости от температуры. Для определения показателя были проведены измерения зависимости усиления от температуры. Для контроля и подстройки температуры использовалась термокамера ESPEC TABAI. Внутри камеры установлен один датчик контроля температуры. В системе охлаждения камер используются хладагенты R404A/R508A, не вступающие во взаимодействие с озоном, что обеспечивает необходимую экологическую безопасность оборудования. Основные характеристики камеры представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Технические характеристики термокамеры ESPEC TABAI

Диапазон температур	от -85 до +180 °C
Точность температуры по объему	0,5 °C
Точность температуры по времени	1,0 °C (от -85 до + 100 °C)
Скорость нагрева	от +20 до +180 °C в течение 30 мин.
Охлаждение компрессоров	воздушное
Рабочий объем камеры	64 л

Внешний вид установки представлен на рисунке 3.8, где внутри камеры расположен Si-ФЭУ, на который подавалось напряжение 27,0 В, что составляет 2,5 В перенапряжения от точки пробоя при комнатной температуре (21 °C). Источником выступал лазер Picosecond optical pulse generator PLS-405-660, настроенный на режим работы с частотой сигнала 1 кГц, с длиной волны излучения 405 нм. Амплитуда сигнала составила Также были применены несколько фильтров для получения одноэлектронного спектра. Измерения производились для трех различных температур (0, 21 и 30 °C), поскольку для изменения температуры внутри камеры и термализации датчика необходимо выждать более

20 минут.

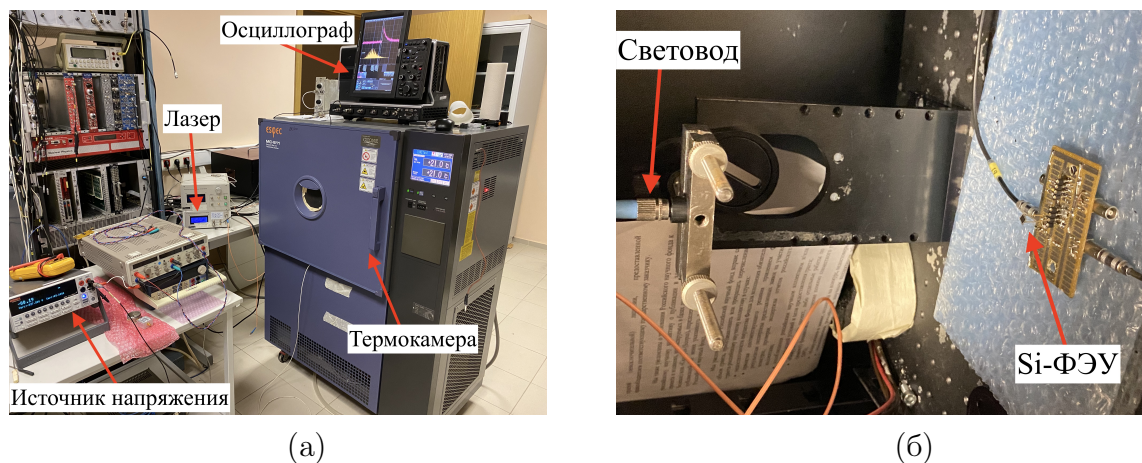


Рисунок 3.8 — Внешний вид экспериментальной установки

Для определения точек пробоя при различных температурах были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) Si-ФЭУ, собранные данные представлены на рисунке 3.9. По рисунку (а) хорошо видно, что при росте температуры точка пробоя смещается в сторону больших напряжений, если для 21 °C точка пробоя составляет 24,5 В, то при 30 °C это значение станет порядка 24,6 В. Важность определения данной характеристики заключается в том, что принято считать рабочим напряжением значение, превосходящее точку пробоя на 2,5 В, также вся техническая документация представляет данные для такого режима работы. Именно поэтому перед каждым измерением велось отслеживание смещения точки пробоя для последующей корректировки данных.

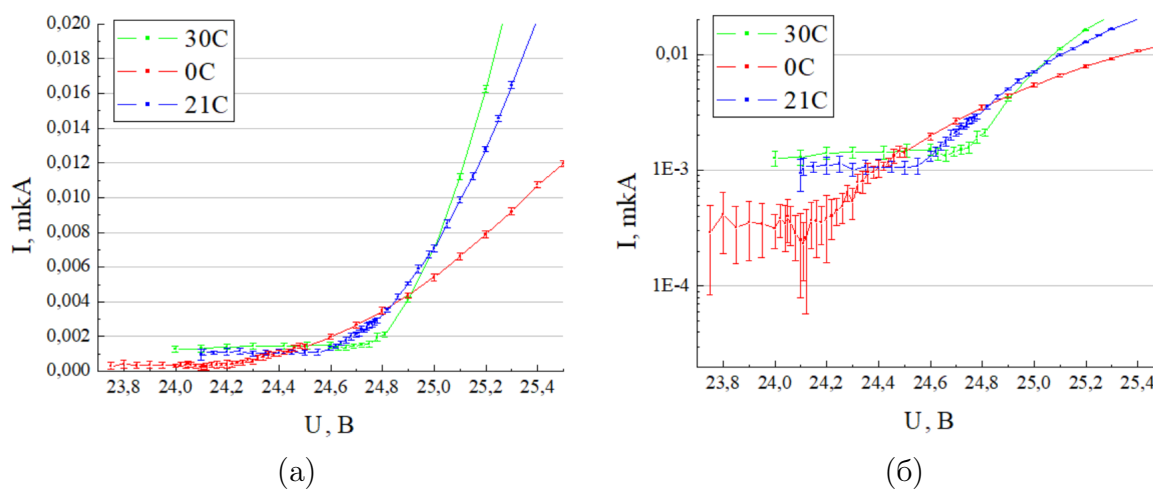


Рисунок 3.9 — Внешний вид экспериментальной установки

На данном этапе измерения одноэлектронного спектра производились в режиме перенапряжения в 2,5 В в условиях комнатной температуры (21 °C),

то есть $27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для всех случаев. Собранные спектры представлены на рисунке 3.10, где стоит отметить тот факт, что шумовой пик по большей части отсутствует, поскольку использовался триггер от лазера.

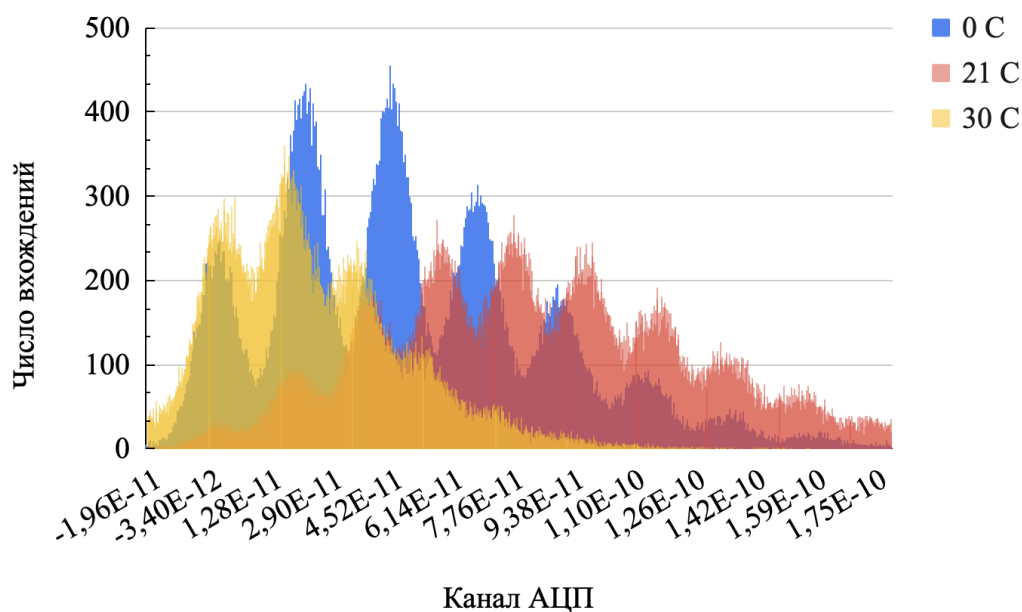


Рисунок 3.10 — Одноэлектронные спектры для 0 , 21 и $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, где хорошо заметно смещение пиков. Спектры получены при одинаковых начальных условиях и параметрах установки

Отметим, что вследствие изменения температуры изменяются такие показатели как PDE, оптическая связь и усиление, из-за чего на рисунке видно, что при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается высокая статистика в первых трех пиках. Это напрямую связано с ростом шумов внутри датчика, к тому же уменьшается усиление, то есть спектр становится более узким. Далее, спектр при температуре $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ выглядит шире так как вместе со сработавшими ячейками часто срабатывают соседние ячейки по причине оптической связи, чем и объясняется заметная статистика в дальних пиках. При температуре в $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается наилучшее разрешение пиков, что обосновано меньшим значением шумов, вносящих вклад в уширение пиков. Максимумы статистики смещены в сторону начальных пиков, что объясняется отсутствием вклада оптической связи в дальние пики.

Для определения усиления достаточно измерить изменение расстояния между соседними пиками из данных фитирования Гауссом. Были выбраны пики с наибольшей статистикой. Хорошо видно, что при понижении температуры разрешение пиков улучшается, это связано с уменьшением шумов внутри Si-

ФЭУ, которые также влияют на величину тока и усиление датчика.

Полученная зависимость усиления от температуры представлена на рисунке 3.11, из которого хорошо видна линейная зависимость уменьшения усиления при росте температуры. В будущем для уточнения данных планируется произвести для большего числа температурных точек.

На рисунке отражена зависимость в виде отклонения усиления относительно значения при комнатной температуре в процентах, откуда можем найти коэффициент изменения усиления от температуры, который вышел равным $k \approx -0,81 \pm 0,09\%/^{\circ}C$, в то время как значение, указанное производителем составляет $k = -0,8\%/^{\circ}C$.

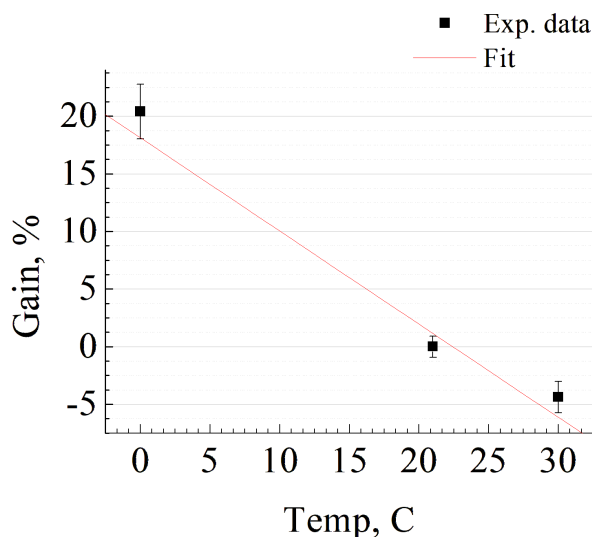


Рисунок 3.11 — Зависимость усиления Si-ФЭУ от температуры

3.5 АНАЛИЗ ДАННЫХ И ВЫВОДЫ

Макет ПЭТ на данном этапе является уникальной экспериментальной установкой, которая сочетает в себе такие характеристики как компактность, за счет замены традиционных вакуумных ФЭУ на кремнивые, а также нечувствительность к магнитным полям, что является основной целью ее разработки и создания. Из результатов тестирования и определения основных характеристик можно сделать вывод, что энергетическое разрешение, которое составило 15% для 662 кэВ, имеет потенциал для улучшения, поскольку вклад в ухудшение данной характеристики вносит плохой контакт между Si-ФЭУ и сцинтил-

лятором, то есть сильно уменьшается величина светосбора из-за чего падает амплитуда сигнала. Выводы были сделаны по результатам нескольких серий экспериментов по проверки однородности амплитуды в зависимости от различных комбинаций кристалла сцинтиллятора и Si-ФЭУ. При получении спектров на всех 32-ух каналах, неоднородность составила около 23%, при условии, что показатели наилучшего разрешения детекторов имеют разброс гораздо меньший - 10%, а в различных конфигурациях кристалл-детектор неоднородность не превышает нескольких процентов. Обобщая выше сказанное, энергетическое разрешение сильно зависит от потерь света при не достаточно хорошем контакте.

Для решения данной проблемы планируется использовать вместо оптической смазки клей, который позволит качественно спозиционировать и закрепить чувствительную площадь Si-ФЭУ и плоскость сцинтиллятора.

В результате измерений был найден коэффициент зависимости усиления от температуры, который составил $k \approx -0,81 \pm 0,09\%/^{\circ}C$, что соответствует заявленному значению производителем. Поскольку ПЭТ обычно работает при комнатной температуре ($21^{\circ}C$), а изменение происходит в пределах 5 градусов, то поправка остается линейной для малого диапазона, если же вариация температуры будет увеличиваться, то линейность исчезает, из-за чего использование поправки не представляется возможным. В связи с тем, что с ростом температуры наблюдается смещение значения напряжения пробоя, то при одинаковом значении напряжения разрешение ухудшается, так как помимо роста шумов уменьшается усиление детектора.

Решение данной проблемы заключается в установлении контроля перенапряжения в зависимости от температуры, что можно реализовать, например, применением терморезисторов, либо некоторым программируемым модулем электроники.

4 ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ НЕЙТРИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

4.1 ДЕТЕКТИРОВАНИЕ РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО И МОНИТОРИНГ РАБОТЫ РЕАКТОРА

Одним из экспериментальных проектов по измерению потока и спектра антинейтрино от реактора является проект DANSS (Detector of Anti-Neutrino based on Solid Scintillator), предложенный группой ИТЭФ-ОИЯИ и построенный на базе Калининской АЭС (КАЭС). Чувствительная часть детектора состоит из сцинтилляционных пластиковых стрипов, образующих плоскости и заполняющих общий объём 1 м³. Этот чувствительный объём обеспечен защитой из тяжёлых (медь, свинец) и лёгких (борированный полиэтилен) материалов для защиты от нейтронного фона и γ - квантов. Кроме того, для защиты от фона, образованного космическими мюонами, установка сверху закрыта сцинтилляционной вето-системой.

Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного β - распада.



Образованный в реакции позитрон теряет энергию и аннигилирует. Этот сигнал, зарегистрированный в виде света в сцинтилляционных стрипах, несёт информацию об энергии антинейтрино и является первой меткой реакции. Нейтрон, образованный в реакции, теряет энергию (термализуется) в столкновениях с ядрами и спустя время порядка нескольких десятков микросекунд захватывается. Для того чтобы сделать этот захват более эффективным, в материал добавляют гадолиний, имеющий высокое значение сечения захвата термальных

нейтронов.

Возбуждение ядра гадолиния, захватившего нейтрон, регистрируется каскадом гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МэВ. Таким образом, второй меткой реакции является детектирование ещё одного сигнала с энергией 8 МэВ, запаздывающего по отношению к первому на время термализации нейтрона.

Данная конструкция была разработана совместно группой ОИЯИ и Институтом сцинтилляционных материалов (ИСМА) (г. Харьков) для экспериментов в физике высоких энергий. Стрипы производятся в ИСМА методом экструзии полистирольного сцинтилляционного материала сразу же со светоотражающим покрытием. Сбор света со стрипа осуществляется вклеенными в канавки волокнами, смещающими спектр излучённого света в зелёную область. Часть волокон достигает границы, собирается с разных стрипов вместе на ФЭУ для измерения энергии, другие волокна считываются полупроводниковыми лавинными фотодиодами с большим количеством ячеек.

4.2 ИСТОЧНИКИ РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО

Нестабильные ядра, при бета-распаде которых образуются электронные антинейтрино в работающей АЭС можно разделить на следующие группы:

- 1) Продукты деления тяжелых изотопов и продукты их бета-распада.
- 2) Ядра, образованные в результате захвата быстрых (^{238}U) и тепловых (Pu) нейтронов тяжелыми изотопами.
- 3) Ядра, образованные после захвата нейтронов продуктами деления тяжелых изотопов и продуктами последующих бета-распадов.
- 4) Долгоживущие ядра, находящиеся в бассейне с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), а также в неактивном реакторе.
- 5) Ядра, образованные в результате захвата нейтронов конструкционными материалами реактора.

Позитрон производит мгновенный поток энергии в виде непрерывной цепочки ионизации и нескольких мягких близких к комптоновским электронам из аннигиляционного гамма-кванта. Энергия позитрона меньше энергии антинейтрино примерно на 1,8 МэВ, почти независимо от кинематики конкретного рассеяния. Нейтрон испытывает замедление до тепловых энергий в течение

нескольких микросекунд, а затем блуждает в веществе детектора до захвата ядром гадолиния, испуская каскад гамма-квантов с общей энергией около 8МэВ.

4.3 ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА

Образец модуля нейтринного детектора представляет собой конструкцию из твердотельного органического сцинтилляционного бруска размерами $50 \times 50 \times 700$ мм³ и SiPM фирмы SensL типа MicroFC-30035-SMT-TA, расположенные на противоположных концах сцинтиллятора и соединенные с усилителями - формирователями. Пластиковые сцинтилляционные бруски изготовленные на основе полистирольных гранул литьем под давлением в зеркальных формах. Это полимеризованный полистирольный сцинтиллятор с добавками 2% паратерфенила + 0,05% РОРОР (1,4 - Бис(5 - фенил - 2 - оксазомил)бензол), разработанным в ИФВЭ (Институт Физики Высоких Энергий) НИЦ «Курчатовский институт». Изобретение относится к области регистрации ионизирующих излучений и может быть использовано для изготовления недорогих сцинтилляционных детекторов в самом широком диапазоне габаритных размеров.

Особенность изготовления пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирольных гранул, согласно статье [37], заключается в сушке и опудривании гранул сцинтилляционными добавками с последующим их плавлением, причем процедура проводится в помещенных в вакуумную печь открытых формах, определяющих форму изделий. Все поверхности сцинтилляторов, изготовленных по заявляемому способу, за исключением открытой поверхности, являются слепками поверхностей материала форм плавления - полированной нержавеющей стали, то есть зеркальными. Такой способ дает возможность получения недорогих в изготовлении сцинтилляционных брусков любых форм и размеров, не требующих дополнительной механической обработки.

Органические сцинтилляторы характеризуются малым временем высвечивания (порядка единиц — десятков наносекунд) по сравнению с неорганическими, но имеют меньший световыход. Так как в органических сцинтилляторах возбуждаются молекулярные уровни, которые излучают в ультрафиолетовой

области (длина поглощения этого ультрафиолета, однако, весьма мала: центры флуоресценции непрозрачны для их собственного излученного света) для согласования со спектральной чувствительностью регистрирующих свет устройств (ФЭУ и фотодиодов) используются светопреобразователи, которые поглощают ультрафиолетовое излучение и переизлучают видимый свет в области 400 нм. Для сбора света сцинтилляций используются спектросмещающие волокна (WLS, Wave Length Shifter) типа Y11 производства фирмы Kuraray, диаметром 1 мм и длиной 3 м, вклеенные по боковым поверхностям сцинтиллятора. Волокна вклеены в канавки 1,5 x 1,5 мм, расположенные на 1 и 3 гранях сцинтилляционной пластины. На торец одного из пяти (оно на чертеже красного цвета) волокон напылено отражающее алюминиевое покрытие. Концы волокон (9 шт) собраны в прямоугольный пучок и сопряжены с чувствительной поверхностью Si-ФЭУ. За счет использования данных волокон, согласно источнику [38], где были проведены эксперименты на похожих сборках детекторов, во-первых, затягивается время нарастания переднего фронта сигнала и смещение его максимума, а во-вторых, увеличивается как быстрая компонента высвечивания, так и медленная, из-за чего сигнал становится более продолжительным по времени. Также было показано, что вклейка волокон в сцинтиллятор увеличивает светосбор примерно в 1.6 раза, а затухание света в системе сцинтиллятор — волокно целиком определяется параметром затухания света в WLS.

Внешний вид опытного образца детектора и размещение спектросмещающих волокон представлены на рисунке 4.1.

Для вклейки WLS волокон использовался эпоксидный клей ПЭО-321К. Торцы бруска закрыты тайвеком, сверху - алюминизированный майлар.

Изначально производитель выставил пороги усилителей-формирователей на уровне 0,06 амплитуды мюонного пика (30 мВ), что примерно соответствует энергии 500 кэВ. Конструкция платы предусматривает возможность изменения порогов триггеров логического сигнала, они могут быть установлены с помощью потенциометров. Диапазон регулировки - 15 - 150 мВ.

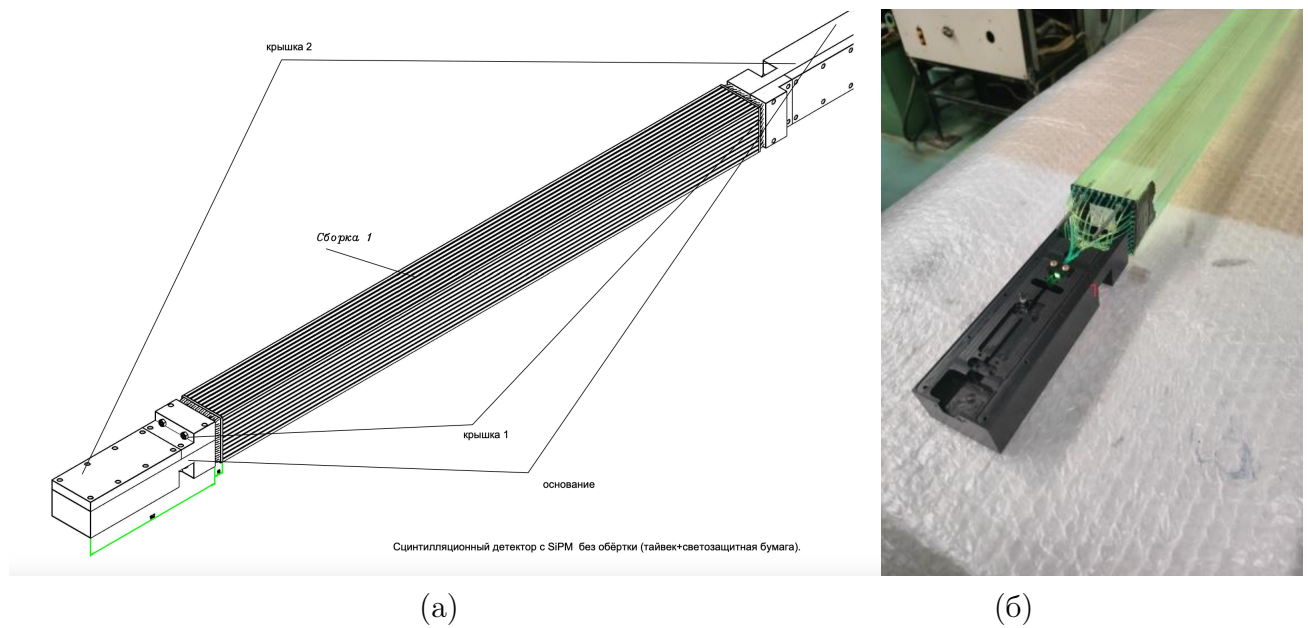


Рисунок 4.1 — Внешний вид испытательного образца детектора: (а) - рисунок, отражающий основные компоненты, (б) - позиционирование спектросмещающих волокон относительно геометрии сцинтиллятора, сходящиеся к чувствительной плоскости Si-ФЭУ

Конструкция предусматривает объединенные кабели питания для двух Si-ФЭУ (+30 В) и двух пар усилителей (± 5 В), вывод сигнала осуществляется по двум парам LEMO кабелей для аналогового и логического сигналов с каждого датчика, который позволяет выставить порог энергий для аналогового сигнала, при помощи дополнительной логической схемы, что оказывается полезным при первоначальном отсечении шумов.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦА МОДУЛЯ НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА

5.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО Si-ФЭУ

Для измерения собрана установка, состоящая из модулей CAEN, где сигнал с датчика подавался на усилитель, откуда шел на оцифровщик, где в качестве триггера выступал сигнал с дополнительного ФЭУ, находящегося на определенном расстоянии от Si-ФЭУ. Для выхода логического сигнала из усилителя необходим аналоговый сигнал определенной полярности, а инвертор дает задержку порядка нескольких десятков нс, то было принято решение воспользоваться внутренним триггером оцифровщика. Схема установки представлена на рисунке 5.1

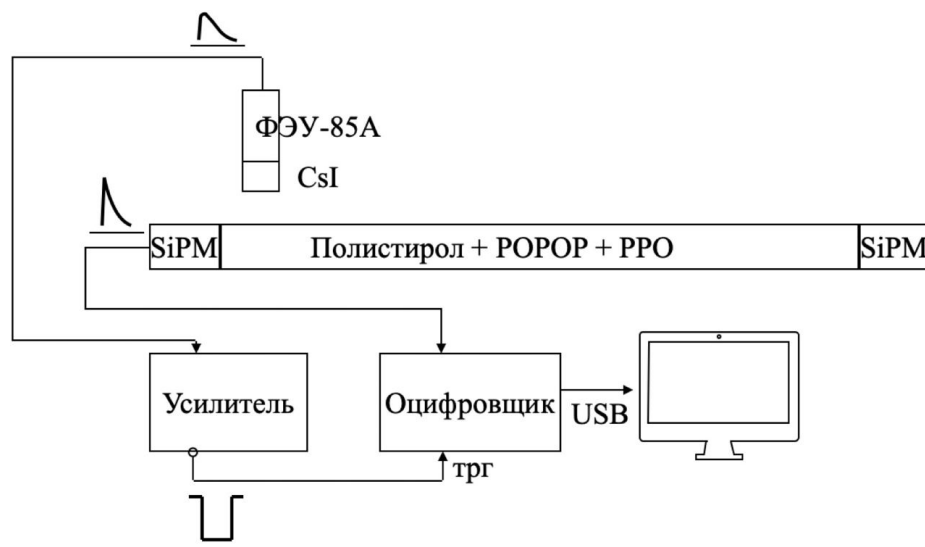


Рисунок 5.1 — Схема мюонного телескопа для измерения амплитуды сигнала

Между ФЭУ-85А и сцинтиллятором находится коллиматор из свинца,

позволяющий отрезать события, когда заряженные частицы летят от источника не перпендикулярно бруску. Такие события не интересуют, так как они не дают возможность локализовать сигнал. Спектры, полученные в результате измерений с радиоактивным источником Cs-137 представлены на рисунках 5.2.

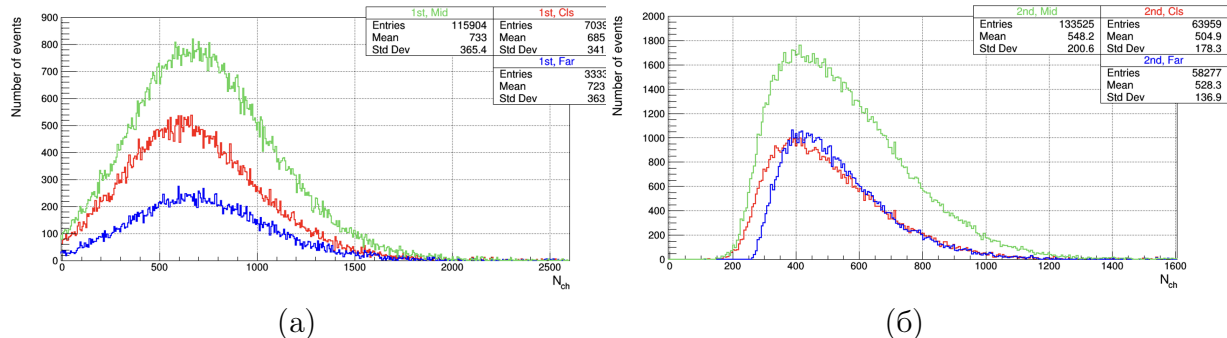


Рисунок 5.2 — Амплитудный спектр от источника Cs-137, полученный на установке при различных положениях источника: близком к одному из Si-ФЭУ, по середине бруска, далеко от Si-ФЭУ. На расунке (а) спектры с первого Si-ФЭУ, (б) - со второго. Зеленый спектр соответствует близкому расстоянию, а синий - далекому

Заметим, что на графике 5.2б амплитуда на двух разных расстояниях не одинаковая, такой результат получился скорее всего из-за недостаточно хорошего контакта оптического волокна с Si-ФЭУ или неоднородности сцинтиллятора.

5.2 ИЗМЕРЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ СЦИНТИЛЛЯТОРА НА МЮОННОМ ГОДОСКОПЕ УРАГАН

Многоцелевой мюонный годоскоп УРАГАН [39; 40] имеет модульную конструкцию, которая включает в себя восемь плоскостей, покрытых пенопластом толщиной 5 см и состоящих из 320 стримерных трубок (1 см x 1 см x 350 см) с внешними полосами (вдоль и поперек стримерных трубок), образующими двумерную систему считывания. Общая площадь каждого модуля составляет около 11,5 м², и он включает в себя 4864 канала передачи данных. Система обработки данных позволяет реконструировать мюонные треки в режиме on-line и регистрировать поток мюонов в виде непрерывной последовательности 2D-изображений. Установка обеспечивает обнаружение частиц в широком диапазоне зенитных углов (от 0 до 80°) с угловой точностью около 0,7°. Порого-

вая энергия мюона составляет около 0,2 ГэВ (для вертикального направления). Внешний вид годоскопа представлен на рисунке 5.3

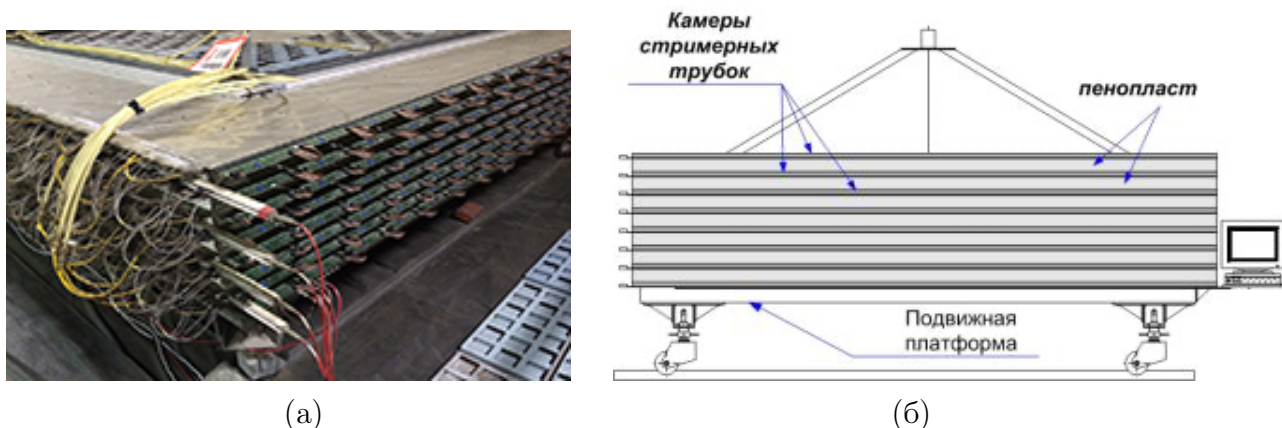


Рисунок 5.3 — Многоцелевой мюонный годоскоп УРАГАН

Для измерения однородности отклика сцинтиллятора, образец модуля нейтринного детектора помещался сверху на годоскоп. Поскольку сцинтиллятор бруска не большой по объему, то сбор мюонных сигналов осуществлялся в течение нескольких суток. По результатам были построены карты отклика, представленные на рисунке 5.4, где можно заметить, что наибольшая статистика собрана в средней части сцинтиллятора, когда как по краям она становится гораздо меньше.

Заметим, что разница составляет порядка 60% от максимума в центральной части бруска, что может считаться ощутимыми потерями, однако эта область не превышает 10%. Малая статистика по краям скорее всего связана с конструктивными особенностями вклеенных волокон, поскольку они выходят за пределы сцинтиллятора в воздух, где без контакта с материалом не считывают сигнал. Также видно, что в случае первого Si-ФЭУ амплитуда гораздо выше, чем для второго. Это может быть связано с недостаточным контактом между оптическим волокном и чувствительной поверхностью Si-ФЭУ. В будущем планируется разобрать модуль для более подробного исследования его компонентов.

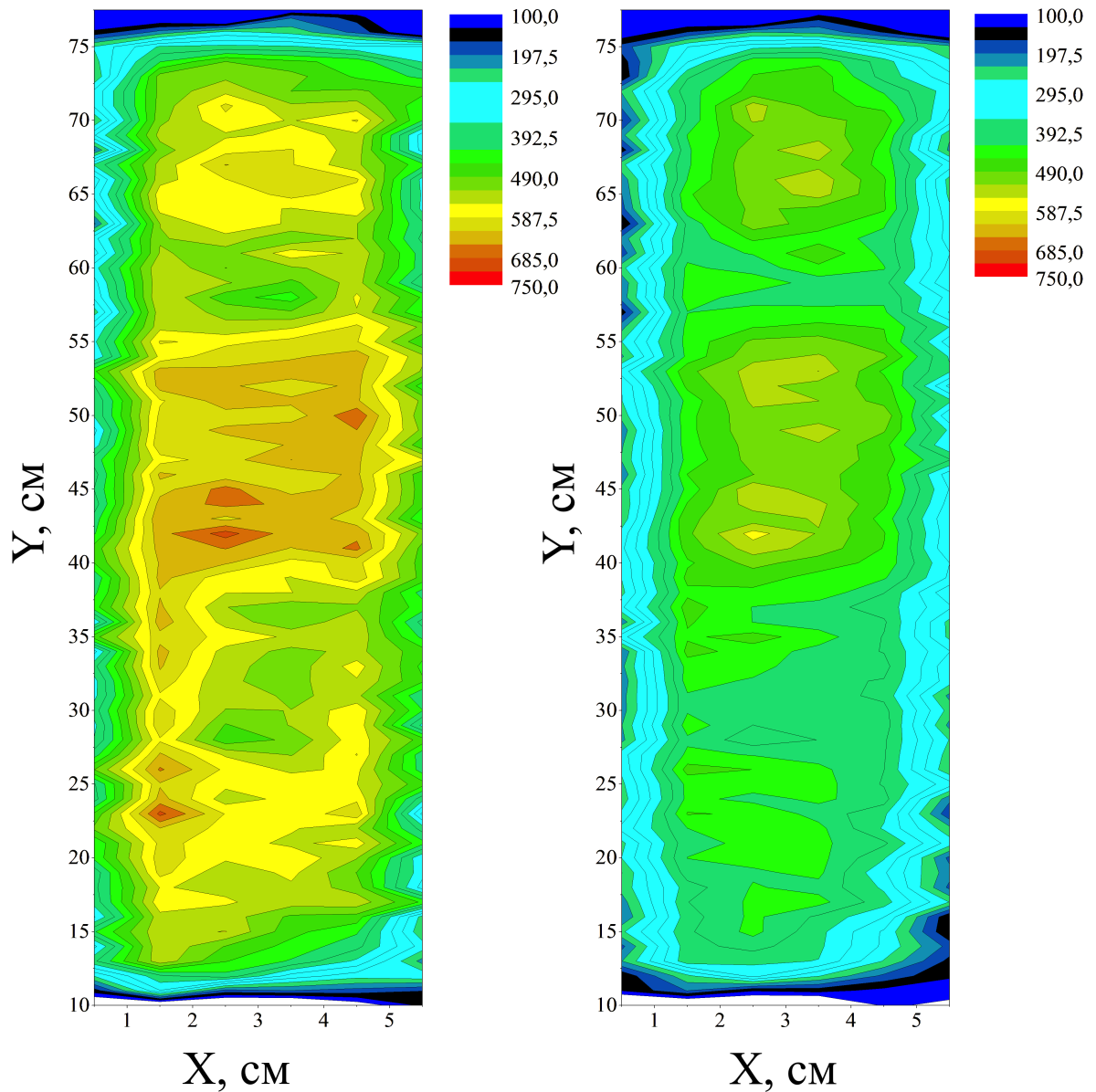


Рисунок 5.4 — Карта мюонного отклика сцинтиллятора: (а) - Si-ФЭУ №1 находится в нижней части, (б) - Si-ФЭУ №2 находится сверху. По оси X - ширина бруска, Y - расстояние до Si-ФЭУ №1

5.3 АНАЛИЗ ДАННЫХ И ВЫВОДЫ

В результате измерений были найдены амплитудная зависимость от расстояния до Si-ФЭУ, которая показала близкие значения амплитуды на трех раз-

личных расстояниях, что свидетельствует о некоторой неоднородности материала сцинтиллятора. В материале сцинтиллятора регистрировалась в основном только мягкая компонента комптона от источника Cs-137, поскольку частицы с энергией 662 кэВ проходили материал сцинтиллятора насквозь, оставляя только часть собственной энергии.

После продолжительных измерений сигналов мюонов на годоскопе УРА-ГАН были получены карты однородности сцинтиллятора, которые наглядно показывают, что заметна разница между величиной амплитуд у двух Si-ФЭУ, причиной чему может служить плохой контакт между оптическим волокном и Si-ФЭУ. Также, заметно отличие амплитуд сигнала в средней части бруска и на краях. Плохой светосбор наблюдается на торцах и в местах стыковки сцинтиллятора и Si-ФЭУ. Разница составляет порядка 60% от максимума в центральной части бруска, что может считаться ощутимыми потерями, однако эта область не превышает 10%.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате научно-исследовательской работы был найден и отработан метод нахождения рабочего напряжения Si-ФЭУ, собрана экспериментальная установка и проведены измерения. Были собраны энергетические спектры и найдены рабочие точки для всех Si-ФЭУ. Значение рабочего напряжения составило $27,8 \pm 0,07$ В.

Далее были проведены измерения с радиоактивными источниками Cs-137 и Ti-44, на основе амплитудных спектров которых были получены энергетические и временные разрешения на 662 и 511 кэВ, получена неоднородность и предложены варианты улучшения данных характеристик для улучшения эффективности сбора данных макета ПЭТ. Ранее уже было получено значение энергетического разрешения для 662 кэВ при почти 10 часах непрерывных измерений. Для выполнения данной задачи были подобраны оптимальные характеристики 32-канального анализатора PETIROC2A для избавления системы от лишних шумов.

Проведены измерения и найден линейный коэффициент зависимости усиления от температуры для трех значений (0 , 21 и 30°C), который составил $k \approx -0,85 \pm 0,11\%/^\circ\text{C}$, что согласуется с предъявленным производителем значением. Вследствие, для решения проблемы уменьшения усиления с ростом температуры было предложено использование терморезисторов для подстройки напряжения в зависимости от температуры.

Планируется модернизация конструкции установки для улучшения светосбора путем приклеивания кристаллов сцинтиллятора при помощи оптического клея ОК-72ФТ 15, а также замены тефлоновой ленты на отражающую краску.

Для модуля нейтринного детектора для мониторинга заряженных частиц от атомных станций была произведена первичная оценка характеристик детектора при помощи мюонного годоскопа и телескопа, получены значения амплитуд сигнала в зависимости от расстояния от Si-ФЭУ и неоднородности сцинтиллятора, которая составила $< 30\%$. Наибольшая амплитуда сигнала наблю-

дается в центральной части сцинтиллятора, а наименьшая – по краям и рядом с Si-ФЭУ. В будущем планируется разобрать детектор на составляющие, чтобы отдельно измерить характеристики Si-ФЭУ и пластикового сцинтиллятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ghezzi A.* Precision Timing with LYSO: Ce Crystals and SiPM Sensors in the CMS MTD Barrel Timing Layer // 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). — IEEE. 2021. — с. 1–4.
2. Characterization of new silicon photomultipliers with low dark noise at low temperature / К. Ozaki [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — т. 16, № 03. — P03014.
3. The Development of SiPM-based fast time-of-flight detector for the AMS-100 experiment in space / С. Chung [и др.] // Instruments. — 2022. — т. 6, № 1. — с. 14.
4. Characterization of new photo-detectors for the future dark matter experiments with liquid xenon / К. Ozaki [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. т. 1468. — IOP Publishing. 2020. — с. 012238.
5. Monitoring of microfluidics systems for PET radiopharmaceutical synthesis using integrated silicon photomultipliers / В. Salvador [и др.] // IEEE Sensors Journal. — 2019. — т. 19, № 17. — с. 7702–7707.
6. A 144-SiPM 3” LaBr3 readout module for PMTs replacement in Gamma spectroscopy / D. Di Vita [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2022. — т. 1040. — с. 167179.
7. Large-Area SiPM Pixels (LASiPs): A cost-effective solution towards compact large SPECT cameras / D. Guberman [и др.] // Physica Medica. — 2021. — т. 82. — с. 171–184.
8. Preliminary study on the timing characteristics of a fast SiPM for the TOF of the beam line in IHEP / М. Yan [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2021. — т. 68, № 8. — с. 2096–2100.

9. *Гележе П., Морозов С.* Возможности применения магнитно-резонансной томографии и позитронно-эмиссионной томографии с ^{18}F - фтордезоксиглюкозой для диагностики рака молочной железы (обзор литературы и собственные клинические наблюдения) // Радиология-практика. — 2018. — 6. — с. 22—34.
10. Плавающая атомная электростанция малой мощности / В. Замуков [и др.] // Судостроение. — 2007. — 2. — с. 9—12.
11. *Зверев Д.* Перспективы плавучих АЭС // Журнал прикладных исследований. — 2008. — 4. — с. 52—53.
12. Development of BANDI-60S for a floating nuclear power plant / I. N. Kim [и др.] // Fuel. — 2019. — т. 290. — с. 325.
13. *Jurewicz J. M.* Design and construction of an offshore floating nuclear power plant : дис. ... канд. / Jurewicz Jacob M. — Massachusetts Institute of Technology, 2015.
14. *Рудас М., Насникова И., Матякин Г.* Позитронно-эмиссионная томография в клинической практике // Учебно-методическое пособие. М.: Центральная клиническая больница УДП РФ. — 2007.
15. *Зыков Е., Поздняков А., Костеников Н.* Рациональное использование ПЭТ и ПЭТ-КТ в онкологии // Практическая онкология. — 2014. — т. 15, № 1. — с. 31.
16. *Беляев В., Климанов В.* Физика ядерной медицины: учеб. пособие // М.: НИЯУ МИФИ. — 2012.
17. A national survey of computed tomography doses in hybrid PET-CT and SPECT-CT examinations in the UK / G. R. Iball [и др.] // Nuclear medicine communications. — 2017. — т. 38, № 6. — с. 459—470.
18. Effective dose estimation for oncological and neurological PET/CT procedures / J. M. Martí-Climent [и др.] // EJNMMI research. — 2017. — т. 7, № 1. — с. 1—8.
19. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ - диагностики в России / Л. Чипига [и др.] // Радиационная гигиена. — 2018. — т. 10, № 4. — с. 31—43.

20. A novel, SiPM-array-based, monolithic scintillator detector for PET / D. R. Schaart [и др.] // *Physics in Medicine & Biology*. — 2009. — т. 54, № 11. — с. 3501.
21. Development of simultaneous PET and Compton imaging using GAGG-SiPM based pixel detectors / K. Shimazoe [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2020. — т. 954. — с. 161499.
22. *Crystals S.-G.* Physical properties of common inorganic scintillators // *Saint-Gobain Crystals*. — 2007.
23. The digital silicon photomultiplier — Principle of operation and intrinsic detector performance / T. Frach [и др.] // *2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)*. — 2009. — с. 1959—1965.
24. *Jeong M., Hammig M.* Development of hand-held coded-aperture gamma ray imaging system based on GAGG(Ce) scintillator coupled with SiPM array // *Nuclear Engineering and Technology*. — 2020. — т. 52, № 11. — с. 2572—2580. — ISSN 1738-5733.
25. Comparison between Pixelated Scintillators: CsI(Tl), LaCl₃(Ce) and LYSO(Ce) when coupled to a Silicon Photomultipliers Array / M. Jeong [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2018. — т. 893. — с. 75—83. — ISSN 0168-9002.
26. OST Photonics [электронный ресурс]. — URL: <https://www.ost-photonics.com/products/scintillation-crystal/scintillation-crystal-material/gaggce/>.
27. *Шендрик P.* Введение в физику сцинтилляторов-1. — 2013.
28. *Sensors C.-S. S.* Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive // *On Semiconductor*. — 2020.
29. Semiconductor Components Industries, LLC [электронный ресурс]. — URL: <https://www.onsemi.com>.
30. *Shchablo K.* Development of fast timing detector for CMS experiment upgrade at CERN : дис. . . . канд. / Shchablo Konstantin. — Université de Lyon, 2020.
31. CAEN S.p.A. [электронный ресурс]. — URL: <https://www.caen.it>.

32. Background removal procedure based on SNIP algorithm for gamma ray spectroscopy with the CAEN Educational Kit / М. Caccia [и др.] // Viareggio, Italy, Oct. — 2017.
33. Afterpulsing effects in SPAD-based photon-counting communication system / С. Wang [и др.] // Optics Communications. — 2019. — т. 443. — с. 202—210.
34. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. — Объед. ин-т ядерных исслед., 2014.
35. Оптимизация параметров спектрометра для исследования времени жизни позитронов в материалах / Ю. Бордулев [и др.] // Современные наукоемкие технологии. — 2013. — 8—2. — с. 184—189.
36. Correction of SiPM temperature dependencies / А. Kaplan, C. Collaboration [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — т. 610, № 1. — с. 114—117.
37. Способ изготовления пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирольных гранул / А. М. Горин [и др.]. — 2017.
38. Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ / Г. Бритвич [и др.] // Протвино. ФГБУ ГНЦ ИФВЭ. — 2013.
39. Ground-Level Enhancement of December 13, 2006 in muon hodoscopes data / D. Timashkov [и др.] // Proc 30th Int Cosmic Ray Conf, Merida, Mexico. — 2007. — с. 3—11.
40. Уникальная научная установка «Экспериментальный комплекс НЕВОД» [электронный ресурс]. — URL: <http://ununevod.mephi.ru/ru/uragan.html>.