

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»

УДК 539.1.074, 539.1.075

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПЛАСТИН СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО
ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD С
ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Студент _____ К. А. Тertyшная

Научный руководитель,
к.ф.-м.н., доцент

_____ П. Е. Тетерин

Москва 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПЛАСТИН СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО
ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD С
ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Студент _____ К. А. Тертышная

Научный руководитель,
к.ф.-м.н. _____ П. Е. Тетерин

Рецензент,
к.ф.-м.н. _____ М. Г. Коротков

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Эксперимент SPD	6
1.1 Описание установки SPD	6
1.2 Beam-beam Counter	8
1.3 CAEN FERS-5200 DT5202	10
1.4 Цели и задачи	15
2 Представление результатов	16
2.1 Оценка разброса величины отклика тайлов при регистрации космических мюонов	16
2.2 Оценка эффективности тайлов по заряженным релятивистским частицам	24
2.3 Отклик тайлов в режиме Time-over-Threshold	25
2.4 Оценка влияния оптических соединений на светосбор	31
2.4.1 Плата с SiPM Onsemi	31
2.4.2 Плата с SiPM Hamamatsu	45
2.5 Исследование работы прототипов секторов ВВС в режиме телескоп	51
Заключение	55
Список используемых источников	57

ВВЕДЕНИЕ

Nuclotron based Ion Collider Facility (NICA) – это новый ускорительный комплекс, который создаётся на базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств плотной барионной материи. Для реализации исследования на коллайдере предусмотрены две точки взаимодействия пучков заряженных частиц, в одной из которых предполагается установить Spin Physics Detector.

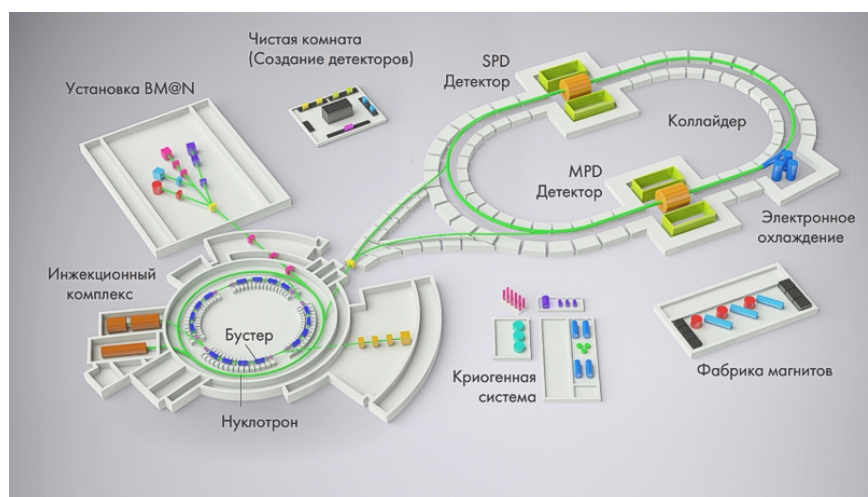


Рисунок 0.1 — Схема комплекса NICA

Spin Physics Detector - это универсальная установка для исследования спиновой структуры нуклонов и других спиновых явлений [1]. Установка будет использовать поляризованные пучки протонов и дейтронов (pp и dd), а так же ряд ион-ионных столкновений.

Согласно современным представлениям квантовой хромодинамики в рамках Стандартной модели, спин нуклона формируется из спинов орбитальных моментов кварков и глюонов. Вклад кварков в общий спин нуклона был довольно точно измерен коллаборациями HERMES (DESY) и COMPASS (CERN). Однако вклад глюонов до сих пор недостаточно изучен и является одной из проблем адронной физики.

Основной физической задачей SPD является изучение распределений

партонов внутри нуклона, включая функции распределения по поперечному импульсу (TMD), механизмы спиновой корреляции, а также вклад глюонов и морских кварков в полный спин нуклона. Планируется работа с поляризованными пучками частиц с энергией до 27 ГэВ в системе центра масс, частотой соударения 3 МГц и светимостью до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [1]. Первый этап эксперимента будет нацелен на изучение поляризованных и неполяризованных явлений при столкновении на низких энергиях и пониженной светимости пучков тяжелых ионов и поляризованных протонов и дейтронов (упругое pp и dd рассеяние). Продолжительность первой фазы займет не более двух лет. Реализация второго, основного этапа планируется в 2030 году. Данная фаза эксперимента предполагает исследование поляризованных глюонов в протоне и дейтроне.

Эксперимент SPD должен закрыть кинематический разрыв между существующими экспериментами в области физики спина адронов, такими как SPASCHARM с энергиями до 10 ГэВ в системе центра масс [2] и экспериментами PHENIX&STAR на коллайдере RHIC, работающими до $\sqrt{s} = 200$ ГэВ [3]. Энергетический диапазон SPD позволит исследовать область, в которой существенную роль играют непертурбативные эффекты квантовой хромодинамики, что важно для понимания внутренней структуры нуклона.

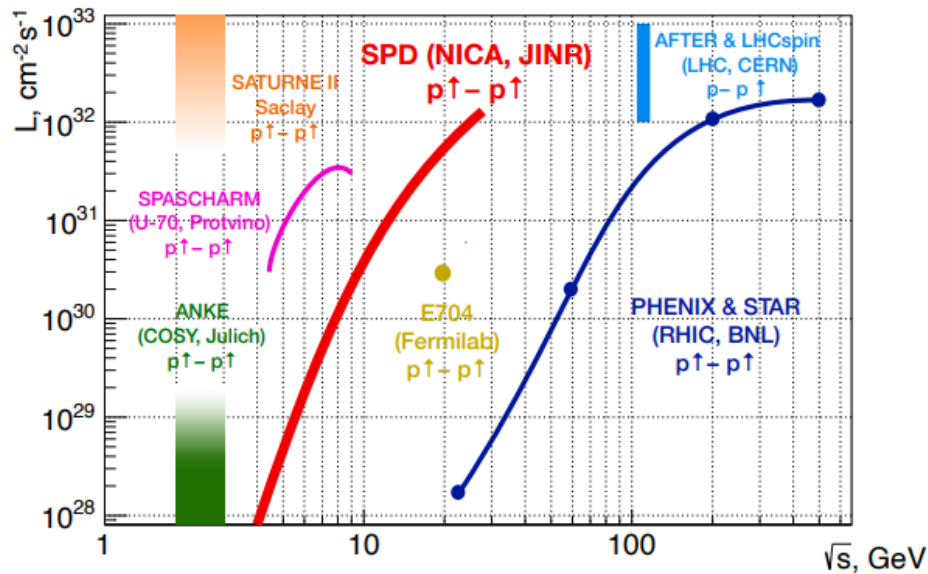


Рисунок 0.2 — Эксперименты с поляризованными протонами

1 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

1.1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ SPD

Экспериментальная установка SPD разрабатывается как 4- π детектор цилиндрической формы [4]. Геометрия установки обеспечивает практически полный телесный угол регистрации дочерних частиц, что существенно для исследования корреляционных спиновых эффектов. Все подсистемы SPD разрабатываются с учётом необходимости эффективной работы в условиях высокой множественности вторичных частиц и высокой светимости. Для фазы 0 будет использована упрощенная система трекинга и частичная установка калориметров для сбора физических данных. Основные детекторные системы фазы-0 представлены на рисунке 1.1. В период нулевой фазы эксперимента планируется столкновения пучков с энергиями до $\sqrt{s} = 15$ ГэВ и светимостью до $\mathcal{L} = 10^{30}$ см⁻²с⁻¹.

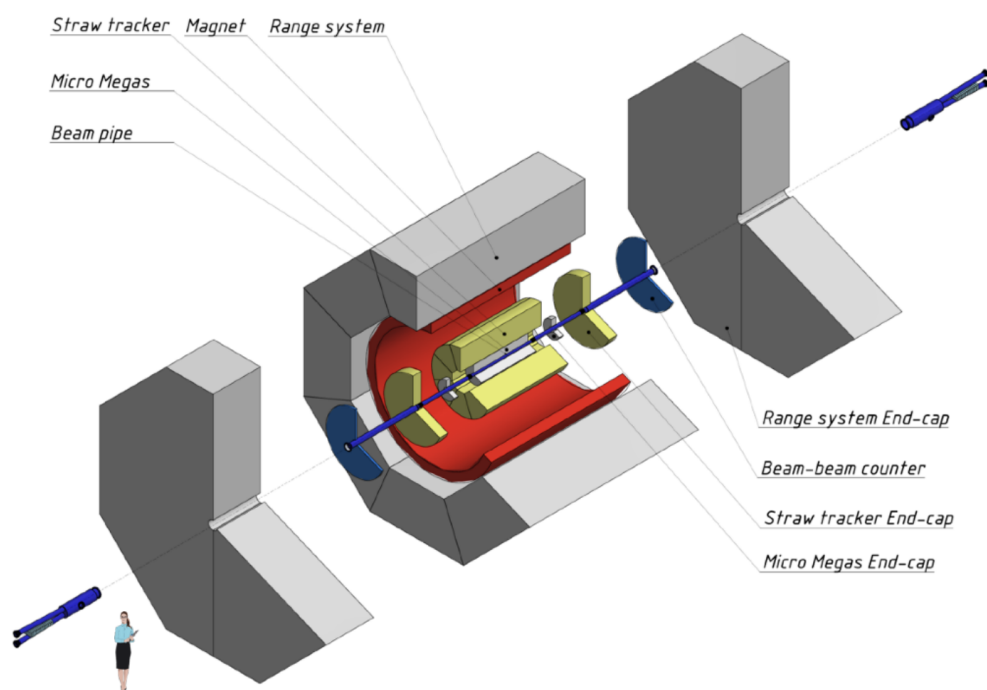


Рисунок 1.1 — Детекторная система SPD фаза-0

На рисунке 1.2 представлена схема детекторных систем основной фазы эксперимента SPD. Реализация данной фазы подразумевает замену детекторов Micromegas кремниевыми ППД, а также установку всех остальных детекторных систем эксперимента.

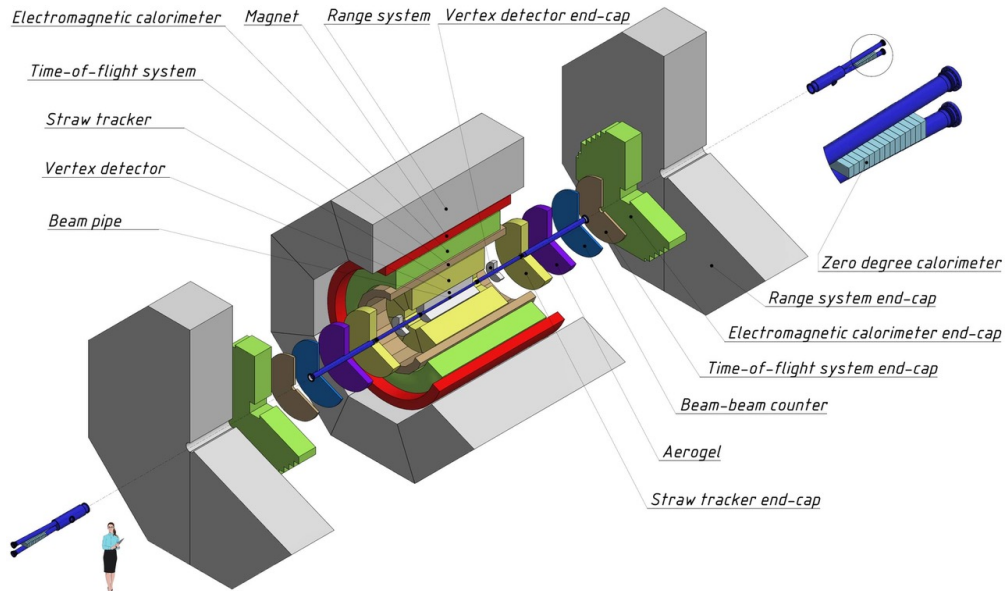


Рисунок 1.2 — Детекторная система SPD фаза-1

- Центральный трекер на нулевой фазе эксперимента будет основан на технологии Micromegas. Детектор должен обеспечить высокую эффективность реконструкцию треков и вторичных вершин долгоживущих частиц. Использование данной системы планируется в течение первых двух–трёх лет работы эксперимента.
- Вершинный детектор (Vertex detector) — кремниевый ППД детектор, отвечает за точное определение первичной точки взаимодействия и измерение вторичных вершин по распадам короткоживущих частиц. Предполагается обеспечить разрешение на уровне менее 100 мкм, необходимого для реконструкции вторичных вершин распадов D-мезонов и чармониев. Данный вершинный детектор предполагается в рамках первой фазы эксперимента SPD.
- Трековый детектор (Straw tracker) — система на основе straw-трубок, расположенная внутри соленоидального магнита с индукцией до 1 Тл на оси детектора. Детектор предназначен для реконструкции траектории первичных и вторичных частиц с высокой эффективностью, измерении их импульсов на основе кривизны траектории в магнитном

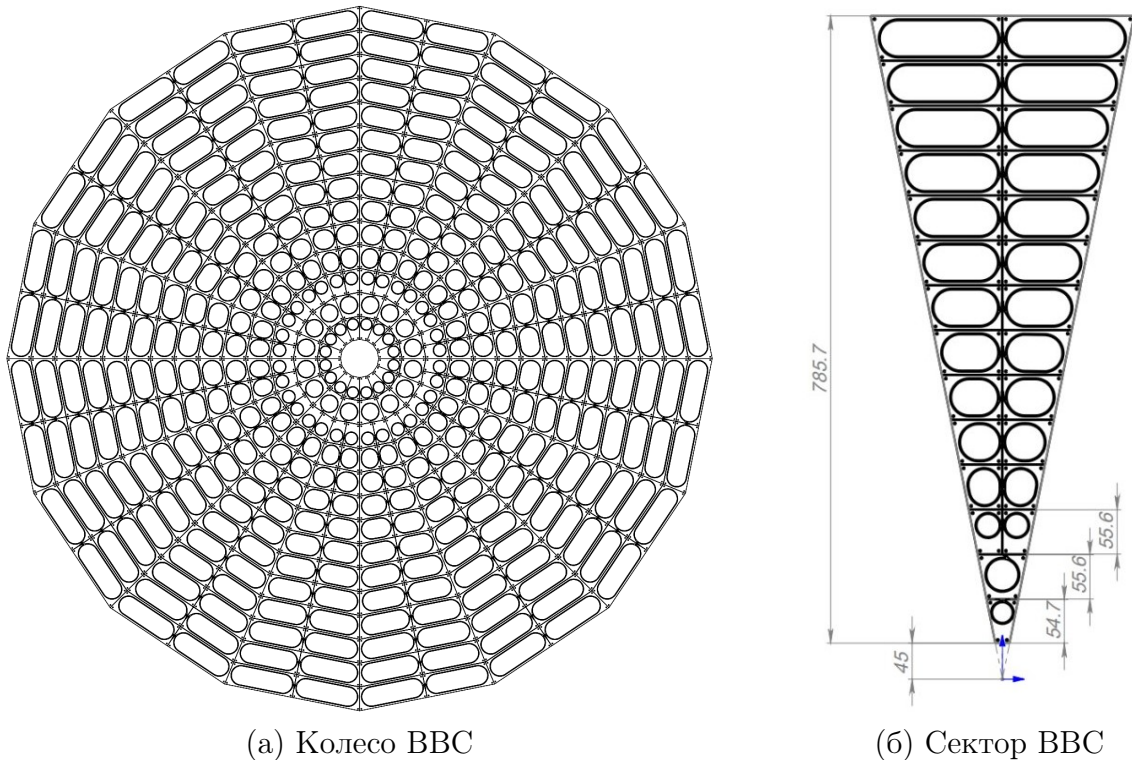
поле и идентификации частиц посредством измерения энерговыделения (dE/dx). Предполагаемое разрешение по поперечному импульсу $\approx 2\%$ для импульса частицы 1 ГэВ/с.

- Время-пролетная система (Time-of-flight system - TOF) должен обеспечить разделение π/K при импульсах до 1,2 ГэВ/с и K/p при импульсах до 2,2 ГэВ/с на уровне 3σ . Детектор должен обладать временным разрешением не хуже 70 пс.
- Аэрогелевый Черенковский детектор (Aerogel) может расширить диапазон энергий для разделений π/K и K/p . Аэрогелевый радиатор позволит повысить эффективность идентификации частиц при высоких энергиях.
- Электромагнитный калориметр (Electromagnetic calorimeter) — необходим для регистрации и идентификации частиц, вылетающих в телесный угол 4π . Обеспечит обнаружение γ и π^0 . Энергетическое разрешение калориметра $5\%/\sqrt{E}$.
- Мюонная система (Range system) используется для идентификации мюонов в условиях высокого адронного фона и оценки их энергии. Одной из основных физических задач системы является идентификация мюонов из распадов $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$
- Счетчик столкновений пучков (Beam-beam counter) - это сцинтилляционный детектор, предназначенный для локальной поляриметрии, восстановления плоскости реакции и мониторинга столкновений пучков.
- Калориметр нулевого угла (Zero degree calorimeter) будет установлен в зонах разделения пучков по обе стороны от точки взаимодействия для определения светимости пучка и создания временной метки для разделения событий. Вместе с ВВС измеряет локальную поляриметрию.

1.2 BEAM-BEAM COUNTER

В качестве инструмента для локальной поляриметрии и контроля светимости на SPD планируется система Beam-Beam Counter. Сцинтилляционный детектор имеет секторную структуру - он состоит из 16 секторов, об-

разующих одно из двух колец ВВС. Каждый сектор состоит из 24 (возможно 26) сцинтилляционных пластин - тайлов. Тайлы имеют трапециевидную форму и толщину в 1 см. Между каждой парой трапеций предусмотрены зазоры, необходимы для избежания взаимного засвечивания тайлов при попадании частицы в один из них. В канавке внутри каждого тайла уложено спектросмещающее оптоволокно, свернутое в три витка для обеспечения однородного светосбора со всей рабочей области сцинтиллятора.



(а) Колесо ВВС

(б) Сектор ВВС

Рисунок 1.3 — Детектор ВВС

Состав сцинтилляторов ВВС (производитель «Унипласт» г. Владимир):

- polystyrene Styrolution 124N – 98.0–98.5%
- p-Terphenyl (CAS 92-94-4) – 1.5–2.0%
- POPOP (CAS 1806-34-4) – 0.01–0.04%

Спектросмещающее волокно (Wavelength Shifting fiber) - это оптическое волокно с добавкой переизлучателя, благодаря которому волокно способно поглощать фотоны боковой областью, переизлучая свет в более длинноволновую область. Согласно техническому описанию детектора SPD [1], в фазе-0 планируют использовать спектросмещающее оптоволокно Kuraray Y-11 [5]. Эффективность захвата и переизлучения фотонов волокном составляет $\sim 3,1\%$ [5]. В целях экономии волокна в прототипе детектора бу-

Световой выход, % антрацена	Время затухания, нс	Длина волны макс. излучения, нм	Длина ослабления света, см	Основные применения
60 - 70	2,5	430	> 200	α , β , γ , быстрые нейтроны

Таблица 1.1 — Характеристики сцинтиллятора

дет применяться волокно SG VCF-92 с пиком высвечивания 492 нм [6]. Для устранения воздушного зазора между волокном и сцинтиллятором и фиксации волокна в канавку заливается двухкомпонентный клей СКТН-мед [7]. Применение оптического клея позволяет повысить эффективность сбора фотонов [8].

Химическое матирование поверхности тайлов способствует повышению эффективности светосбора. За счёт диффузного отражения уменьшается доля фотонов, покидающих объём сцинтиллятора, что увеличивает вероятность их регистрации спектросмещающим волокном.

Поверхности тайлов имеют химическое матирование, которое увеличивает эффективность светосбора спектросмещающим волокном. За счет отражения от матированной поверхности фотоны не покидают сцинтиллятор, что увеличивает светосбор. Собранные волокном фотоны посредством чистого оптического волокна (clear fiber) регистрируются SiPM. В фазе-0 предусматривают чистое волокно Kuraray, а в прототипе - SG VCF. Считывание сигналов SiPM осуществляется системой DT5202, включающей в себя источник питания, электронику переднего края, временной и амплитудный анализатор[9].

1.3 CAEN FERS-5200 DT5202

CAEN DT5202 [9] — это система предварительной обработки данных, предназначенная для считывания данных с больших массивов детекторных систем, таких как полупроводниковые детекторы, многоанодные фотоэлектронные умножители, газовые трубки и сцинтилляционные счетчики.

Главная часть DT5202 - микросхема Citiroc-1A, помещенная на пла-



Рисунок 1.4 — Корпус DT5202

ту считывания. Плата содержит 64 канала и включает в себя источник питания, электронику переднего края, аналого-цифровые преобразователи, временной анализатор, триггерную логику, синхронизацию, локальную память и интерфейс передачи данных.

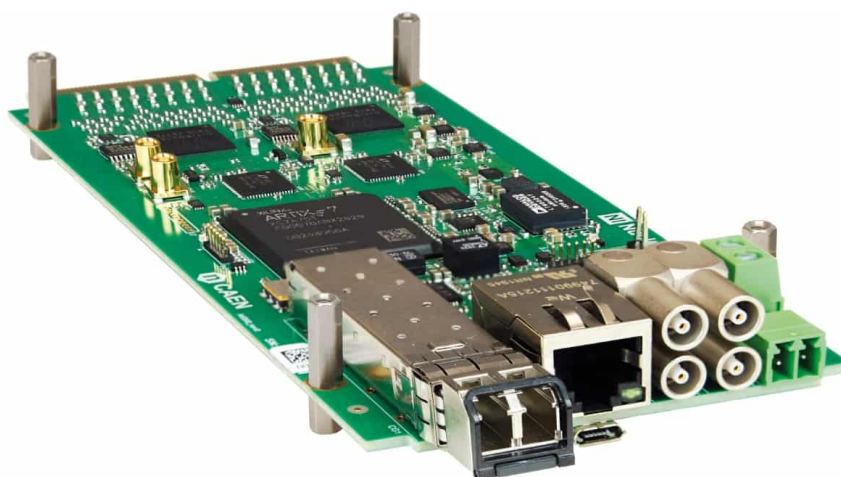


Рисунок 1.5 — Плата A5202 FERS-5200

Все устройства FERS оснащены портами USB 2.0 и Ethernet 10/100T для автономного использования. Также, FERS предусматривает LEMO-разъёмы для подачи внешнего триггера и подключения тактовых сигналов.

Каждый канал считывания состоит из предусилителя и двух формирователей сигнала: медленный формирователь (Slow Shaper) с детектором пиковых значений для измерения амплитуды сигнала, и быстрый формирователь (Fast Shaper), за которым следует дискриминатор для временных измерений. Каждый канал считывания может принимать сигналы LVDS и измерять их фронт. Таким образом, устройство способно восстанавливать

время прихода сигналов и время превышения порога (T_{oT}), что позволяет оценить амплитуду и восстанавливать энергетический спектр.

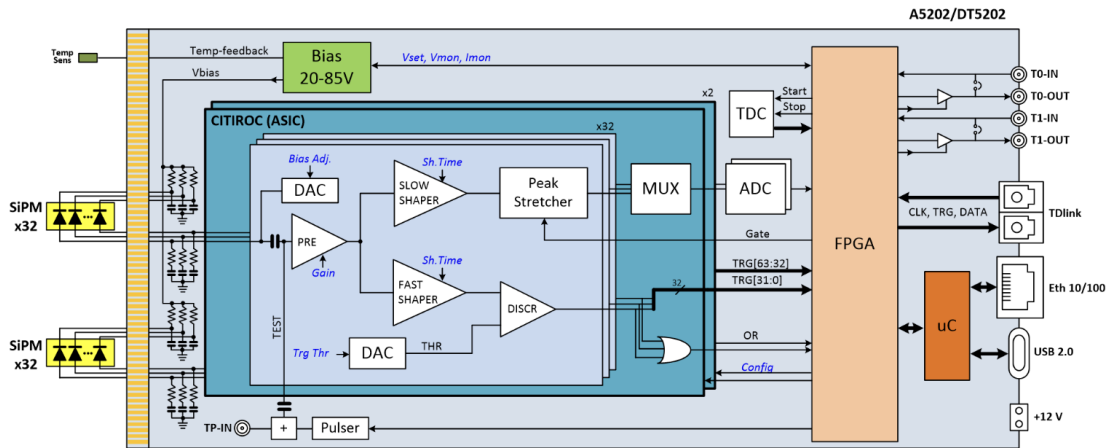


Рисунок 1.6 — Упрощенная блок-схема DT5202

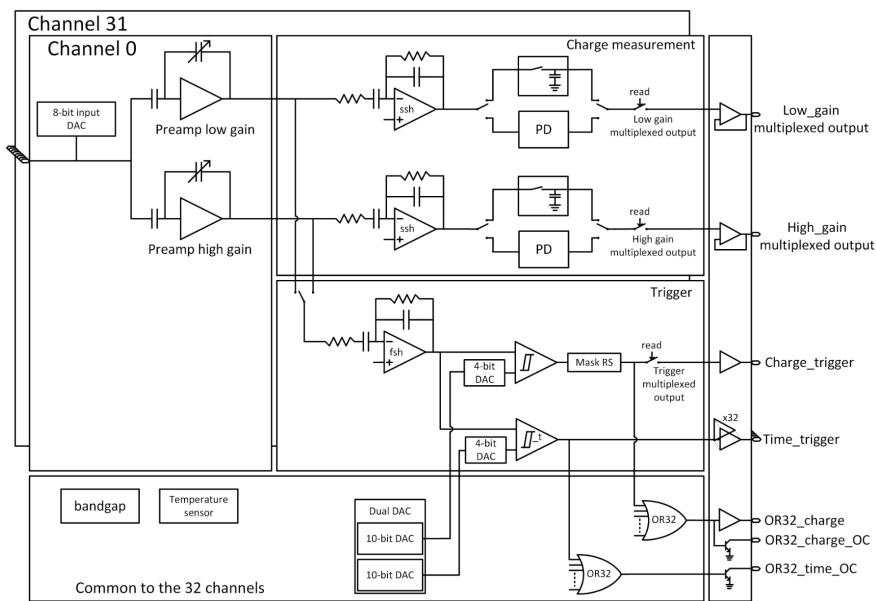


Рисунок 1.7 — Блок-схема чипа Citiroc-1A

Режим сбора данных спектрометрии управляется триггерным сигналом, который формируется в модуле DT5202 (например логическая операция AND), либо поступает от внешней триггерной системы. В отсутствие триггера детектор пиковых значений (Peak Detector) находится в выключенном состоянии (OFF Phase). После поступления триггерного сигнала пиковый детектор переходит в фазу поиска максимума (Peak Sensing Phase), в котором отслеживает сигнал на выходе медленного формирователя (Slow Shaper) и запоминает его амплитудное значение. Поиск макси-

мума сохраняется сохраняется до момента формирования переднего фронта сигнала удержания (Hold). Передний фронт сигнала Hold приводит к отключению входа пикового детектора от выхода медленного формирователя (Slow Shaper) и обеспечивает сохранение зарегистрированной амплитуды, предотвращая запись последующих входных сигналов (Hold Phase). Во время фазы удержания амплитудное значение считывается системой сбора данных. Задний фронт сигнала Hold завершает фазу удержания (Hold Phase), после чего детектор пиковых значений возвращается в исходное состояние (OFF Phase).

Каждый канала чипа Citiroc-1A имеет два независимых предусилителя с регулируемым коэффициентом усиления. Коэффициент усиления регулируется засчет ёмкости обратной связи. Ёмкость может меняться в диапазоне от 25идо 1575 фФ с шагом 25фФ. Для тракта высокого усиления (HG) используется входная ёмкость 15 пФ, а для низкого усиления (LG) - 1,5 пФ

После регистрации события аналоговые значения HG и LG последовательно считываются и преобразуются 13-разрядными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП).

На рисунке 1.8 показаны три фазы формирования сигнала на пиковом детекторе.

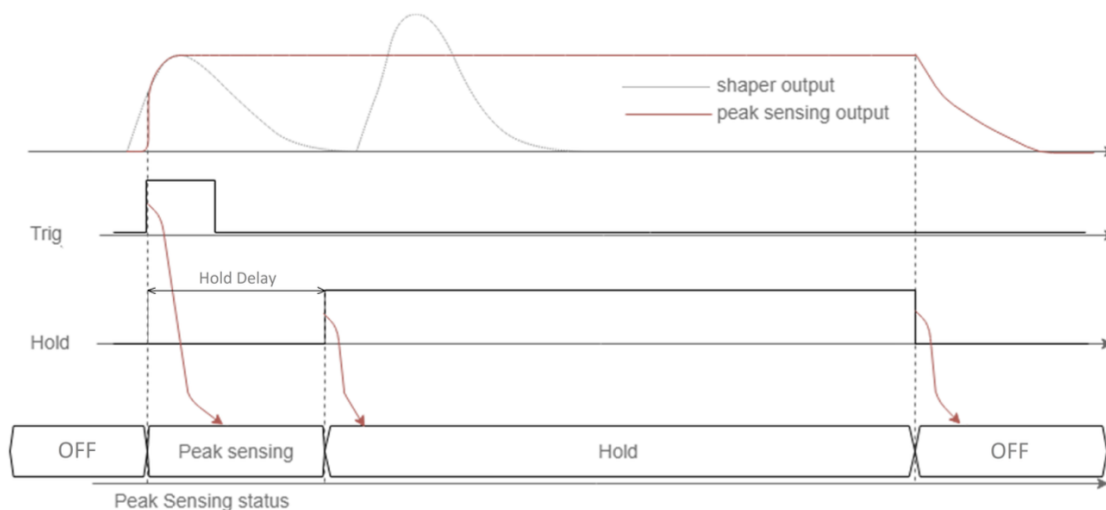


Рисунок 1.8 — Временная диаграмма работы детектора пиковых значений

Временной режим сбора данных осуществляется при срабатывании самотриггера канала, который формируется временным дискриминатором. При регистрации события Программируемая Логическая Интегральная Схе-

ма (ПЛИС) сохраняет временную отметку, соответствующую моменту пересечения сигналом уровня дискриминатора, а также длительность сигнала, превышающую пороговое значение (Time over Threshold). После пересечения сигналом порога дискриминатора формируется передний фронт импульса самотриггера, а при обратном пересечении порога — задний фронт. Разность между моментами формирования переднего и заднего фронтов определяет величину ToT.

Time Reference - сигнал временной привязки, который открывает временное окно заданной длительности. В итоговые данные сохраняются только те события, которые были зарегистрированные в пределах этого временного окна.

Метод ToT является грубой оценкой амплитуды сигнала, вследствие чего энергетическое разрешение меньше, чем в режиме спектрометрии. При этом метод временных измерений способен работать при высоких нагрузках, не теряя эффективности, и обладает преимуществом в виде отсутствия мёртвого времени.

Работа с системой DT5202 осуществляется с помощью специального программного обеспечения Janus [10]. В данной программе разработана возможность работы со всеми каналами нескольких микросхем Citiros-1A, то есть возможна работа с несколькими DT5202 одновременно. Для одновременного подключения нескольких DT5202 необходим концентратор DT5215. Система из DT5202 и DT5215 называется FERS-5200 [11]. Так же в программе есть возможность индивидуальной настройки рабочего напряжения детектора и усиления.



Рисунок 1.9 — Концентратор DT5215

1.4 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Целью работы является исследования качества светосбора и зависящих от него характеристик в прототипах детектора ВВС.

Задачи:

- 1) Оценить разброс величины отклика тайлов при регистрации космических мюонов.
- 2) Оценить эффективность тайлов по заряженным релятивистским частицам.
- 3) Получить отклик тайлов детектора ВВС SPD в режиме Time over Threshold.
- 4) Оценить влияние оптических соединений на светосбор.
- 5) Исследовать работу прототипов секторов ВВС в режиме телескопа.

2 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1 ОЦЕНКА РАЗБРОСА ВЕЛИЧИНЫ ОТКЛИКА ТАЙЛОВ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ

Экспериментальная установка проводимого исследования состояла из матрицы полупроводниковых детекторов SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08 [12], мюонного телескопа, двух триггеров и системы считывания DT5202. Характеристики матрицы Hamamatsu представлены в таблице 2.1. Работа с матрицей осуществлялась при напряжении 54 В.

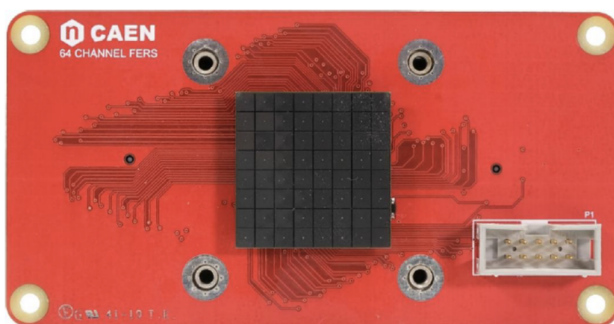


Рисунок 2.1 — Матрица полупроводниковых детекторов Hamamatsu

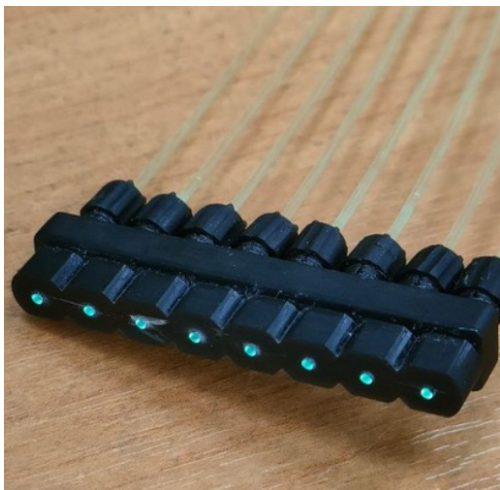
В качестве сцинтилляторов для мюонного телескопа были выбраны тайлы 3-го ряда сектора ВВС. Для изготовления тайлов в сцинтилляционные пластины необходимо уложить и заклеить спектросмещающее оптоволокно. Спектросмещающее волокно тоже требует предварительной подготовки.

Для создания данного телескопа использовалось волокно SG BCF-92 [6]. Каждое из восьми волокон было отрезано лезвием по 54,5 см. Далее шифтер помещался в устройство для полировки (рисунок 2.2а). Перед полировкой в коннекторе следует отрезать лезвием несколько миллиметров шифтера так, чтобы он стал вровень с коннектором. Ручная полировка на

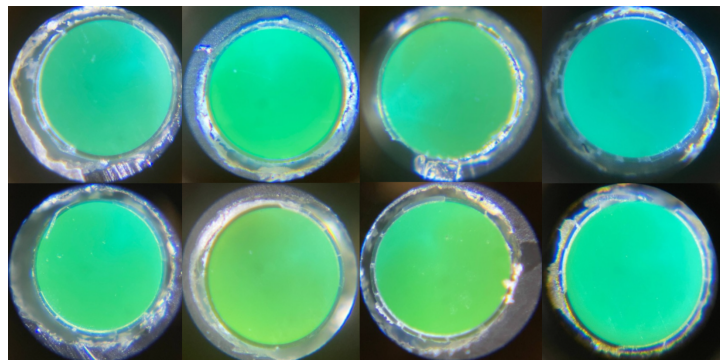
Параметр	S13361-3050AE-08
Количество каналов	64 (8×8)
Эффективная фоточувствительная область	3×3 мм
Шаг пикселя	50 мкм
Количество пикселей	3584
Коэффициент заполнения	74 %
Показатель преломления материала окна	1,55
Коэффициент усиления ($U_{\text{перенапр}} = 7$ В)	4×10^6

Таблица 2.1 — Характеристики S13361-3050AE-08

наждачной бумаге требует легкого давления на коннектор. Полировка начиналась на наждачной бумаге с зернистостью 3000, продолжалась на зернистости 5000, и закончилась полировка на 7000. По окончании полировки необходимо проверить состояние шифтера под микроскопом (рисунок 2.2б).



(а) Спектрсмещающее волокна в устройстве для полировки



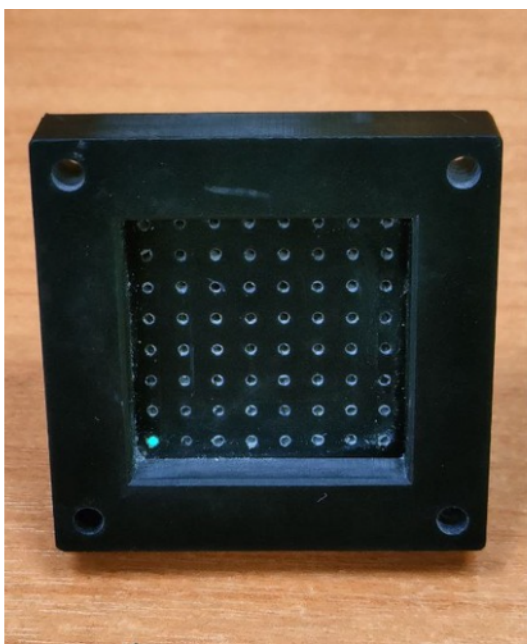
(б) Отполированные волокна под микроскопом

Рисунок 2.2 — Спектрсмещающие волокна SG BCF-92 для мюонного телескопа

Для фиксации соединения шифтеров с SiPM матрица Hamamatsu помещена в коннектор с отверстиями, расположенными со сдвигом на 1 мм по диагонали от центра каждого из фотоумножителей (рисунок 2.3б). Сдвиг необходим, так как в центре SiPMов неходится область с пониженной чувствительностью. Для обеспечения неподвижности спектрсмещающих волокон относительно коннектора они были дополнительно зафиксированы

термоклеем со стороны внешней поверхности коннектора.

Конец шифтера, который будет находиться внутри тайла, без предварительной обработки протягивается через коннектор для матрицы и закрашивается белой краской в два слоя. После полировки шифтеры следует обработать спиртом по всей поверхности для устранения загрязнений. На данном этапе рекомендуется работать в перчатках. Далее в канавку тайла необходимо уложить волокна в три оборота. Внутрь канавки заливается двухкомпонентный оптический клей СКТН-мед.



(а) Коннектор для соединения волокна и матрицы SiPM



(б) Матрица, помещенная в коннектор

Рисунок 2.3 — Коннектор для матрицы

Готовые тайлы помещаются в общую стойку, обеспечивающую соосность всех тайлов. Данная конструкция образует телескоп (рисунок 2.4).

В качестве триггеров выступали тайл и сцинтиллятор. Триггерный тайл располагается сверху мюонного телескопа, и подключен к SiPM Onsemi 1×1 мм [13], питание которого происходит с помощью источника питания Keithley 2400. Сцинтиллятор расположен под телескопом и подключен к двум ФЭУ.

В первую очередь сигнал с SiPM верхнего тайла идёт на инвертор. Далее этот сигнал и сигналы с двух ФЭУ поступают на дискриминатор, где при превышении порога он формирует логическую единицу на выходе. После, сигналы с ФЭУ идут на логическую схему совпадений. На выходе



Рисунок 2.4 — Мюонный телескоп

получается один сигнал, полученный логической операцией "AND". Далее этот сигнал и сигнал с верхнего тайла идут на вторую схему совпадений с логической операцией "AND", на выходе формируется логическая единица. Полученный сигнал стандарта NIM приходит на FERS в качестве внешнего триггера в T0-IN, подключенного в режиме Validation Signal.

Шифтеры с тайлов телескопа приходят на второй вертикальный ряд матрицы, то есть считывание сигналов происходит с 4-7 (1-ый чип Citiroc1A) и 36-39 (2-ой чип Citiroc1A) каналов DT5202. Когда вторая схема совпадений выдаёт логическую единицу и триггерный сигнал приходит на FERS, амплитуды сигналов с тайлов телескопа пишутся в гистограмму, преобразуя мВ в единицы канала кодировщика. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.5. В данном эксперименте обрабатывался сигнал с предусилителя низкого усиления.

Первоначально для калибровки шкалы «Номер канала» в «Фотоэлектронике» были получены одноэлектронные спектры для каждого из восьми SiPM. Пример представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.5 — Блок-схема экспериментальной установки

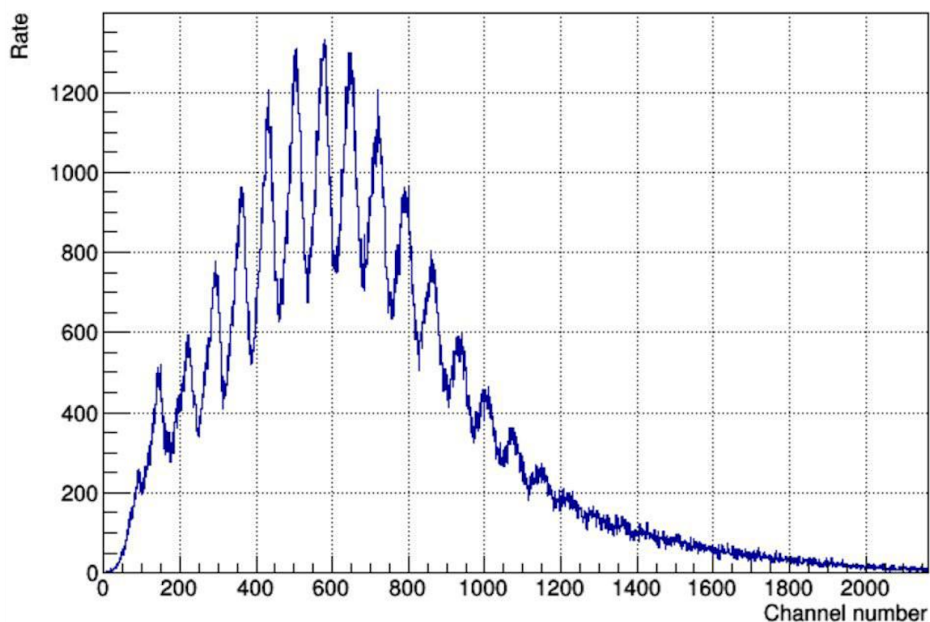


Рисунок 2.6 — Одноэлектронный спектр сигналов SiPM

Обработка данных проведена с помощью математического пакета ROOT. Определение положения пиков проходило с помощью аппроксимации пиков функцией Гаусса. Цена деления определялись как расстояние между соседними пиками одноэлектронного спектра сигналов SiPM, что соответ-

ствует одному фотоэлектрону. Данные калибровки представлены в таблице 2.2.

Номер тайла (сверху вниз)	Расстояние между соседними пиками в ед. к. кодировщика
1	79
2	79
3	77
4	77
5	85
6	86
7	88
8	88

Таблица 2.2 — Калибровка каналов

Далее были получены спектры энергетических потерь космического излучения в сцинтилляторе для каждого из тайлов телескопа. Набор данных происходил около 5-ти дней.

На рисунке 2.7 в качестве примера представлен спектр 4-ого канала.

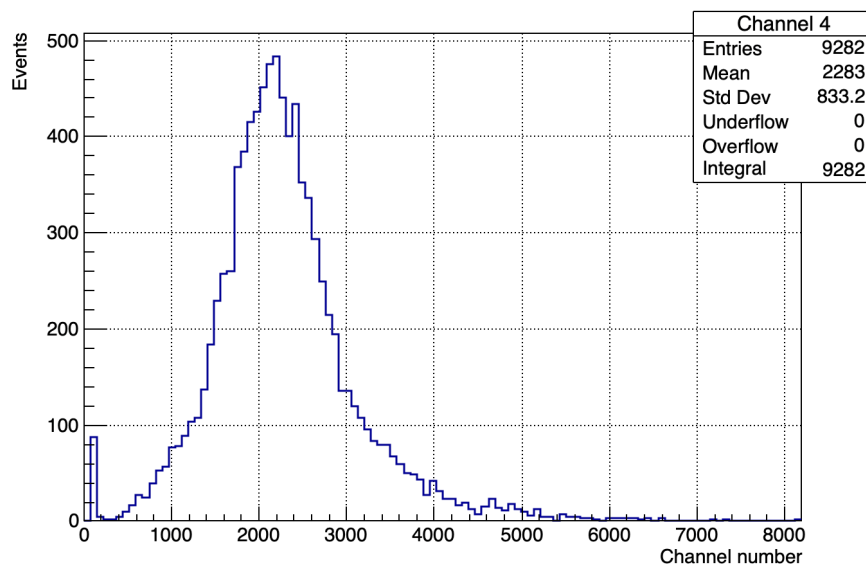


Рисунок 2.7 — Спектр энергетических потерь космических мюонов

Для каждого полученного спектра была выполнена калибровка шкалы «Номер канала» в «Фотоэлектроны».

Спектр энергетических потерь релятивистской заряженной частицы в тонком слое описывается функцией Ландау. Тайл имеет высоту в 1 см, что

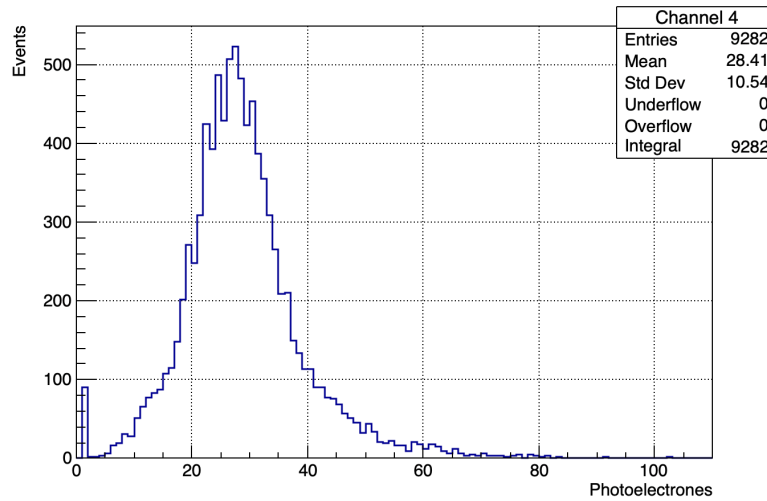


Рисунок 2.8 — Откалиброванный спектр энергетических потерь космических мюонов

является множеством тонких слоев, из-за чего функция Ландау будет размыта функцией Гаусса. В связи с этим спектр энергетических потерь космических мюонов описывается свёрткой функций Ландау и Гаусса. Наиболее вероятное значение (MPV) свёртки Ландау и Гаусса соответствует наиболее вероятным энергетическим потерям мюонов в сцинтилляторе и при калибровке шкалы числу сработавших ячеек SiPM.

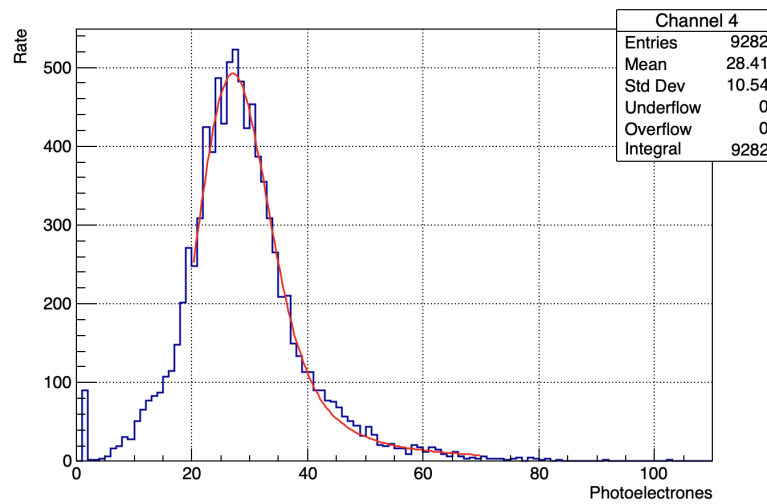


Рисунок 2.9 — Откалиброванный спектр энергетических потерь космических мюонов отфитированный свёрткой функций Ландау и Гаусса

Данные о наиболее вероятных энергетических потерях мюонов для каждого из тайлов находятся в таблице 2.3.

Тайл	MPV, фэ
1	27
2	35
3	34
4	39
5	30
6	30
7	30
8	30

Таблица 2.3 — Значение MPV для восьми тайлов телескопа при считывании сигнала с матрицы Hamamatsu при среднем напряжении 54 В

По завершении эксперимента было обнаружено, что волокно 4-го тайла было ближе к фотоумножителю, в отличие от остальных волокон. Вследствие этого соответствующий SiPM регистрировал сигнал большей амплитуды. Данные о величине отклика для данного тайла не будут рассматриваться в расчетах среднего значения и стандартного отклонения, так как условие эксперимента для этого тайла отличалось от условий остальных 7-ми тайлов.

Получены следующие параметры:

- Среднее число фотоэлектронов: 30,9
- Стандартное отклонение: 2,6

Наиболее вероятный средний отклик тайлов составляет (31 ± 3) фотоэлектронов, а разброс равен 8 фотоэлектронам. Данной амплитуды сигнала достаточно для превышения шумовых сигналов электроники.

2.2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАЙЛОВ ПО ЗАРЯЖЕННЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЧАСТИЦАМ

В данном исследовании экспериментальная установка была идентична установке из раздела 2.1.

Для оценки эффективности тайлов в качестве референсных детекторов были выбраны 1-ый и 3-ой тайлы телескопа. Для данного эксперимента одновременный сигнал с выбранных тайлов являлся триггером для системы DT5202.

Рисунок 2.9 демонстрирует, что шумовой пик располагается до 5 фотоэлектронов, из-за чего счет полезных событий начинался от 5 фэ.

Эффективность тайлов была рассчитана по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{N_{>5phe}}{N_{all}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$N_{>5phe}$ - количество событий, превышающих 5 фэ

N_{all} - (общее) количество событий в триггерных тайлах

Результаты представлены в таблице 2.4.

Тайл	Эффективность, %
2	99
3	98
4	98
5	98
6	99
7	100

Таблица 2.4 — Эффективность 8-ми тайлового телескопа

Средняя эффективность регистрации космических мюонов составила 99%. Полученное значение указывает на то, что светосбора на уровне 30 фэ достаточно для эффективной регистрации частиц. К тому же увеличение светосбора способствует улучшению разрешения сигналов, полученных при одновременной регистрации нескольких частиц.

2.3 ОТКЛИК ТАЙЛОВ В РЕЖИМЕ TIME-OVER-THRESHOLD

Выходной сигнал в режиме ToT нелинейно зависит от инжектируемого заряда. В связи с этим шкала данного режима не может быть откалибрована с помощью одноэлектронного спектра сигналов SiPM. Поэтому, данные, полученные в режиме измерения амплитуды, являются референсными для калибровки режима ToT.

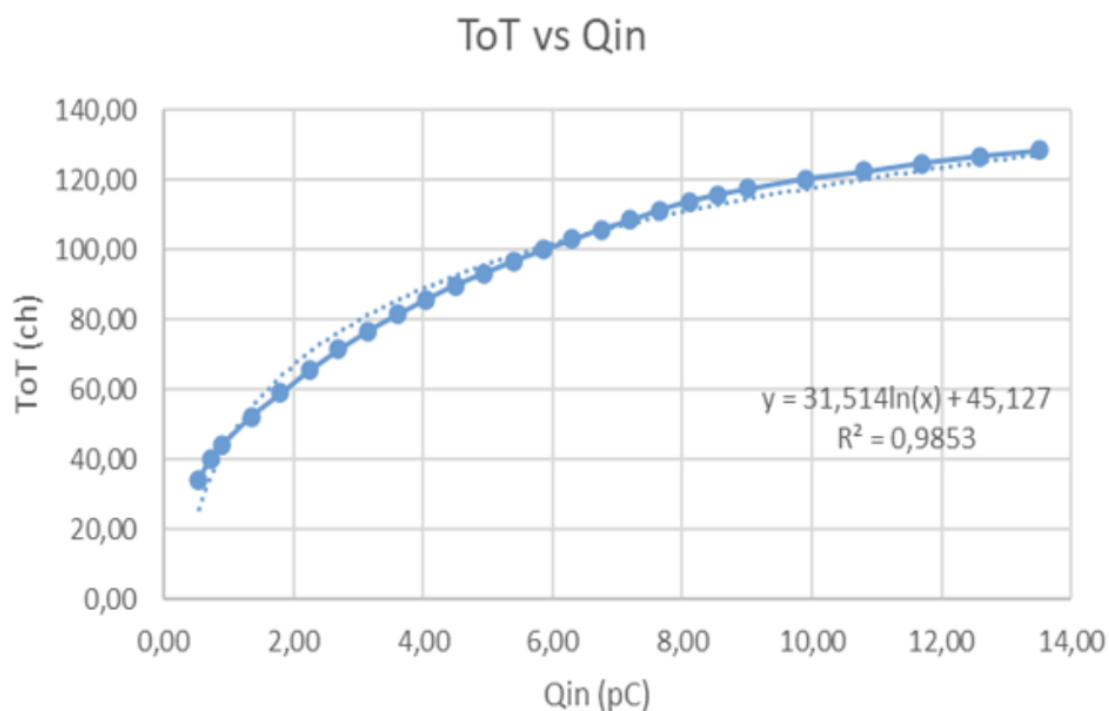


Рисунок 2.10 — Значения ToT от инжектируемого заряда

Нелинейность режима ToT искажает формы спектров энергетических потерь мюонов. Для аппроксимации спектров энергетических потерь свертка функций Ландау и Гаусса была модифицирована с помощью предложенного метода в руководстве по использованию DT5202:

$$\text{ToT} = 0.0409 Q_{\text{in}}^3 + 19.749 Q_{\text{in}}^2 - 1.4547 Q_{\text{in}} + 26.873 \quad (2.2)$$

ToT - значение в каналах калитровщика в режиме ToT;

Q_{in} - инжектируемый заряд.

Для данного исследования конфигурация экспериментальной установки была модифицирована. В качестве триггеров были добавлены два тайла той же геометрии, что и тайлы телескопа. Общая высота телескопа составила 16 см. Волокна с этих тайлов приходили так же на матрицу Hamamatsu. Триггерными каналами DT5202 являются 12 и 45. Триггер осуществлялся за счет внутренней логики DT5202. Триггерные каналы были заведены в Bunch Trigger Source как мажоритарное совпадение по двум из двух каналов (MAJ64 с уровнем совпадения 2). Дополнительной фиксации волокон засчет термокля не осуществлялось.

Для обеспечения одинакового режима работы всех используемых SiPM, что важно для временных измерений, определено пробойное напряжение каждого детектора. Пробойное напряжение определялось как точка переломления графика зависимости приложенного напряжения от расстояния между двумя соседними пиками одноэлектронного спектра сигналов SiPM с осью Y (осью напряжения).

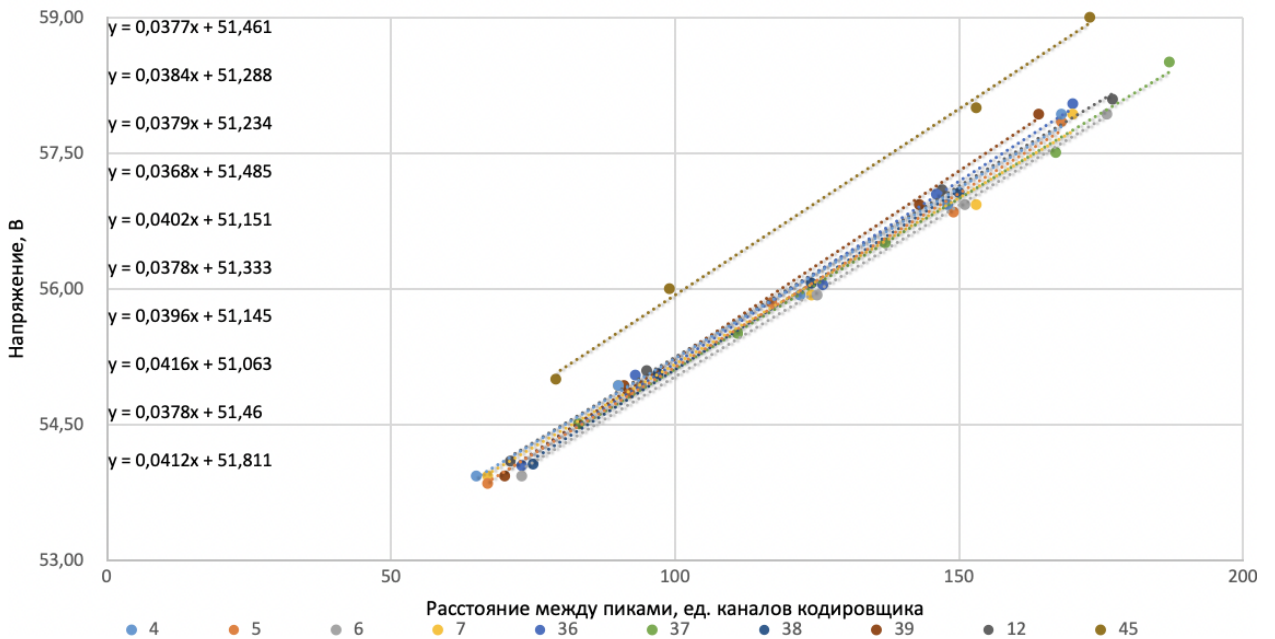


Рисунок 2.11 — Зависимость напряжения на SiPM от расстояния между пиками для матрицы Hamamatsu

Для дальнейшей работы выбрано перенапряжение в 7 В. Итоговые рабочие напряжения представлены в таблице 2.5.

$$U_{\text{раб}} = U_{\text{проб}} + U_{\text{перенапр}} \quad (2.3)$$

Номер канала DT5202	Рабочее напряжение, В
4	58,46
5	58,29
6	58,23
7	58,49
12	58,46
36	58,15
37	58,33
38	58,15
39	58,06
45	58,81

Таблица 2.5 — Рабочие напряжения SiPM матрицы Hamamatsu

В первую очередь для калибровки шкалы «Номер канала» в «Фотоэлектронны» были получены одноэлектронные спектры сигналов SiPM при рабочем напряжении. Расстояние между пиками определялось с помощью аппроксимации пиков функцией Гаусса. Пример одноэлектронного спектра SiPM, соответствующего 5-ому каналу DT5202, представлен на рисунке 2.12.

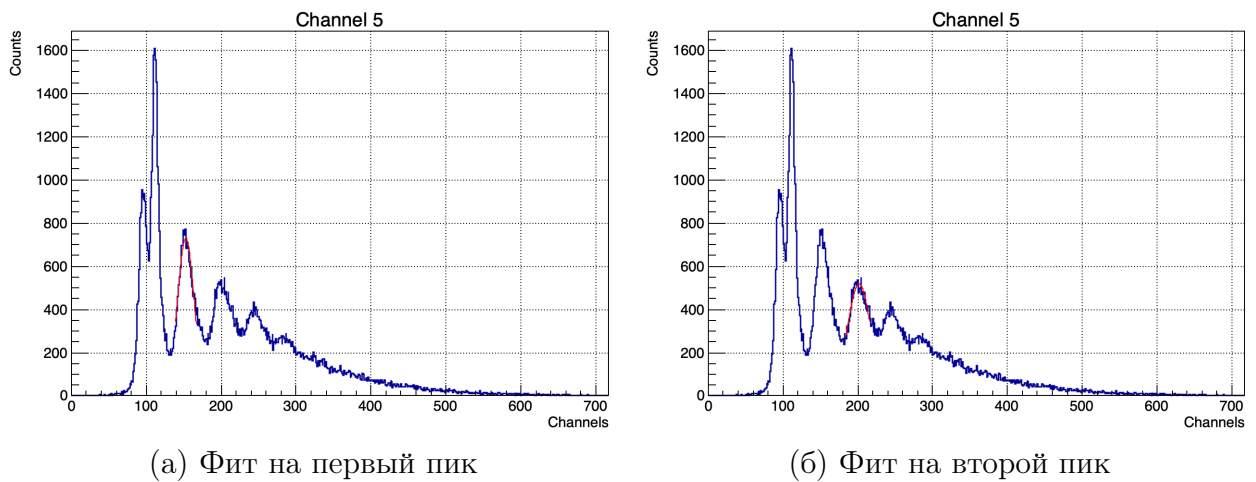


Рисунок 2.12 — Одноэлектронный спектр сигналов SiPM

Данные калибровки представлены в таблице 2.6.

Далее были получены спектры энергетических потерь космического излучения в сцинтиляторе для восьми тайлов телескопа. Пример спектра энергетических потерь для пятого канала представлен на рисунке 2.13. Для каждого полученного спектра была выполнена калибровка шкалы «Номер канала» в «Фотоэлектронны» (рисунок 2.14).

Канал DT5202	Расстояние между соседними пиками в ед. к. кодировщика
4	50
5	48
6	48
7	50
36	54
37	54
38	52
39	49

Таблица 2.6 — Калибровка каналов электроники

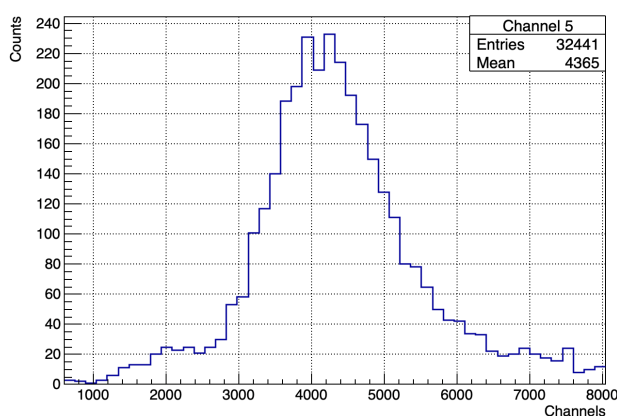


Рисунок 2.13 — Спектр энергетических потерь мюонов в тайле

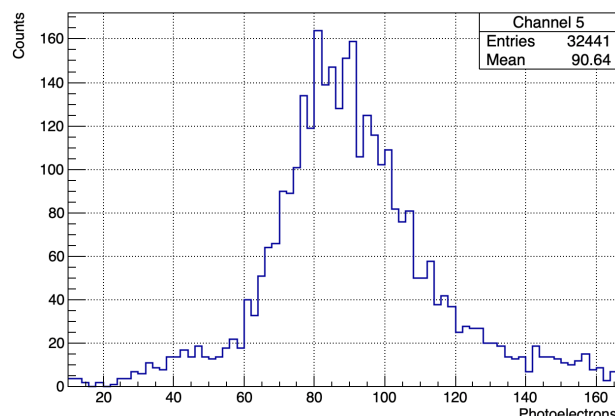


Рисунок 2.14 — Откалиброванный энергетический спектр

Наиболее вероятное значение энергии, высаженой мюоном, определялось с помощью аппроксимации спектра свёртки функций Ландау и Гаусса (рисунок 2.15).

Согласно техническому паспорту Hamamatsu S13361-3050AE-08: при перенапряжении 7 В оптическая связь ячеек SiPM составляет 10%. Данное значение было учтено при определении окончательного числа фотоэлектронов. Итоговое число фотоэлектронов занесены в таблицу 2.7. Средний отклик тайлов составил (62 ± 6) фотоэлектронов.

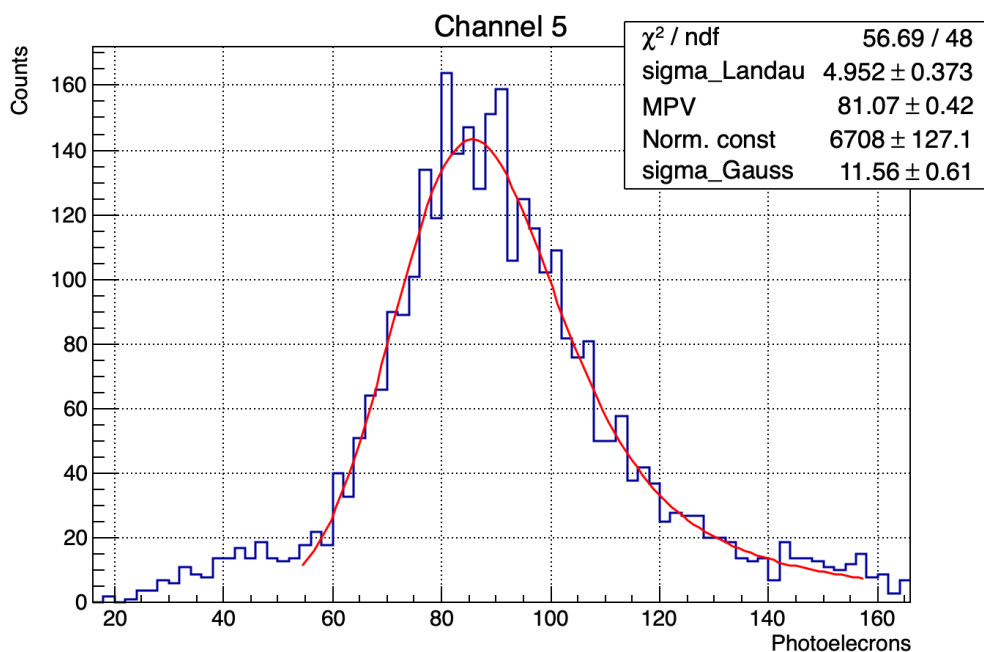


Рисунок 2.15 — Аппроксимация свёрткой функций Ландау и Гаусса пика энергетических потерь мюона в сцинтилляторе

Тайл	MPV, фэ
1	54
2	67
3	67
4	73
5	57
6	57
7	59
8	57

Таблица 2.7 — Значения MPV для восьми тайлов телескопа при считывании сигнала с матрицы Hamamatsu при перенапряжении 7 В

Аналогичные спектры энергетических потерь мюонов в сцинтилляторе получены в режиме ToT. Положение пика в данном режиме осуществлялось с помощью аппроксимации сверткой функций Ландау и Гаусса с поправкой на нелинейность (2.2).

Сопоставив значения MPV для амплитудного и временного режимов, была получена калибровка одного канала шкалы кодировщика режима ToT в единицах фотоэлектронов. Результаты калибровки приведены в таблице 2.8.

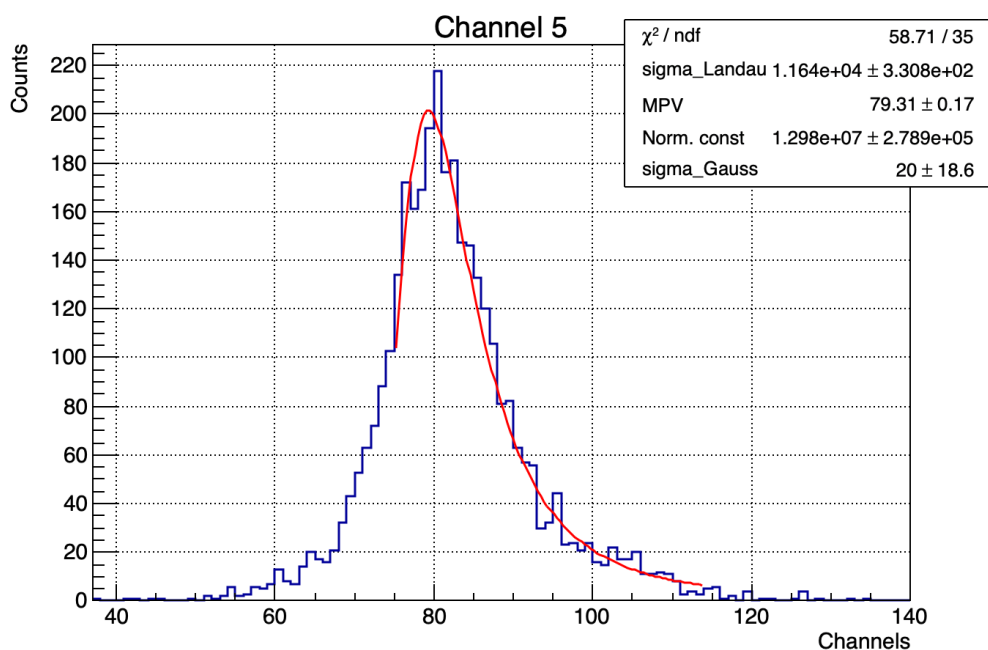


Рисунок 2.16 — Аппроксимация модифицированной свёрткой функций Ландау и Гаусса пика энергетических потерь мюона в режиме ТоТ

Канал DT5202	MPV, ед.к. кодировщика в режиме ТоТ	Фотоэлектроны
4	73	54
5	77	73
6	76	67
7	77	67
36	77	57
37	77	57
38	77	57
39	75	59

Таблица 2.8 — Калибровка одного канала шкалы электроники в режиме ТоТ

2.4 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА СВЕТОСБОР

2.4.1 ПЛАТА С SiPM ONSEMI

Данная работа рассматривает основные узлы детектора ВВС. Мюонный телескоп состоит из тайлов детектора ВВС. Свободные торцы волокон вклеены в отверстия коннектора, который будет располагаться на секторах детектора, с помощью двухкомпонентной эпоксидной смолы. Все волокна были одновременно заполированы по установленному регламенту. Для регитрации фотонов в данной работе использовалась печатная плата на 12 SiPM Onsemi microfc 10035 [13]. Так же на плате располагается ответная часть коннектора, обеспечивающая сооность и надежное соединение между волокнами и SiPM. Плата соединяется с DT5202 посредством шлейфа.

Параметр	S13361-3050AE-08
Эффективная фоточувствительная область	1 × 1 мм
Шаг пикселя	35 мкм
Количество пикселей	504
Коэффициент заполнения	64 %
Показатель преломления материала окна	1,59
Коэффициент усиления ($U_{перенапр} = 5 \text{ В}$)	6×10^6

Таблица 2.9 — Характеристики SiPM Onsemi 10035

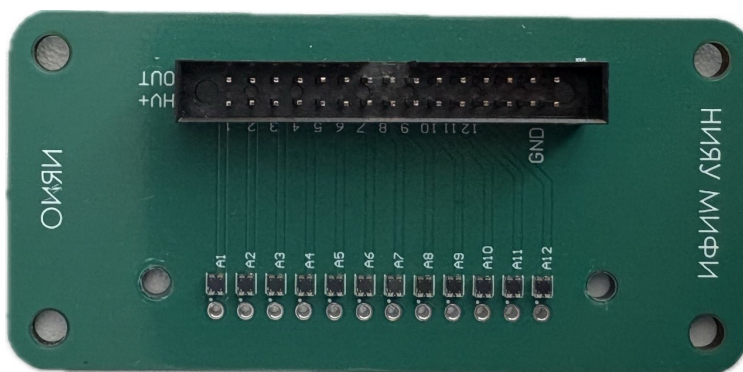


Рисунок 2.17 — Печатная плата с SiPM Onsemi

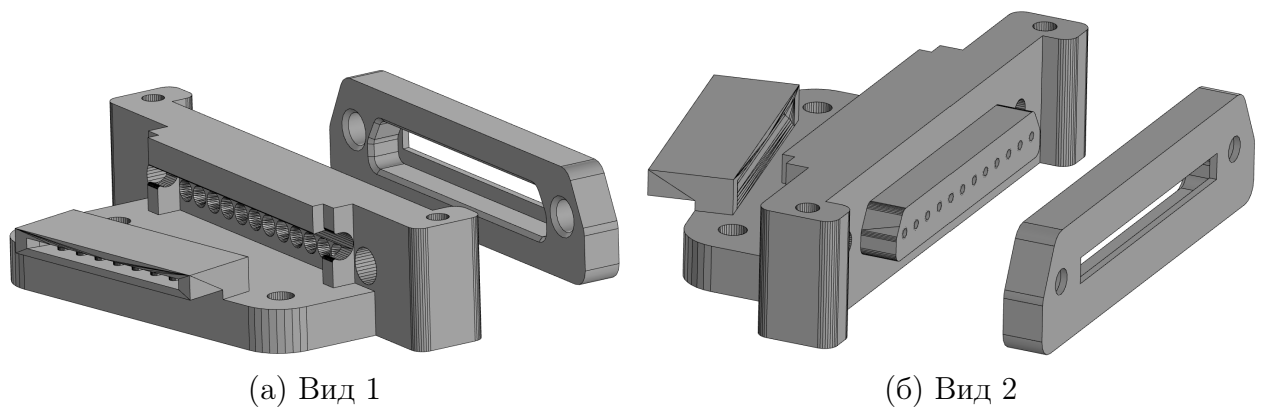


Рисунок 2.18 — Модели коннекторов для волокна и для платы

Диаметр спектросмещающего волокна равен 1 мм, при этом чувствительная область SiPM составляет 1×1 мм. При таких параметрах необходимо обеспечить высокую степень соосности взаимного расположения волокна и фотоприемника. Это необходимо для эффективной регистрации всех фотонов, выходящих из волокна, и минимальных оптических потерь.

В ходе работы была замечена несоосность между спектросмещающими волокнами и SiPM. Коннектор, располагающийся на плате, был поднят и закреплен чуть выше поверхности SiPM. Волокна, еще не вклеенные в секторный коннектор, были доведены до соприкосновения с SiPM.

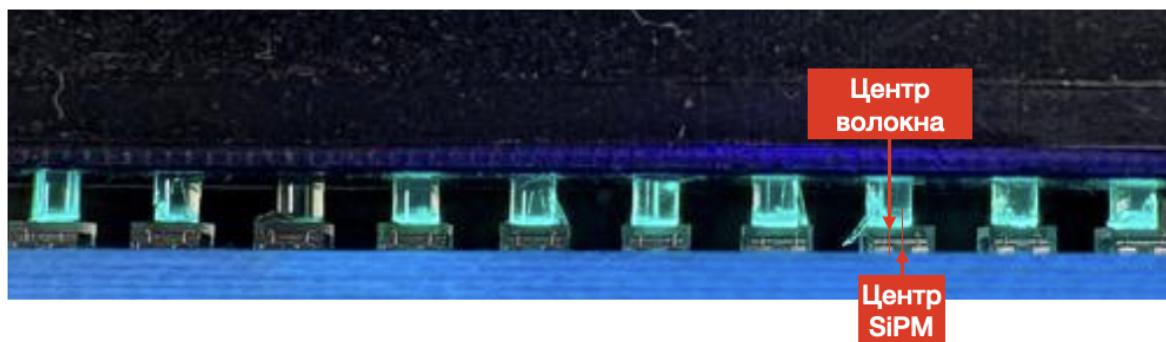


Рисунок 2.19 — Спектросмещающие волокна, подведенные к SiPM на плате

Фотоумножители на печатной плате расположены с высокой точностью позиционирования. Значит, несоосность может возникать из-за секторного коннектора. На рисунке 2.21 представлены изготовленные коннекторы со вклеенными спектросмещающими волокнами. На рисунке 2.21а видна асимметрия в расположении волокон относительно горизонтальной линии и замечено разное расстояние между центрами некоторых соседних волокон. Наблюдаемые отклонения обусловлены диаметром отверстий для волокон, который в модели составил 1,25 мм. Выбранный диаметр необходим для

компенсации усадки пластика при печати на фотополимерном 3d-принтере и для протекания клея в отверстия при наличии в нем волокна. Но такой диаметр привел к нецентральному расположению волокна в отверстии, а вследствие нарушению соосности с SiPM.

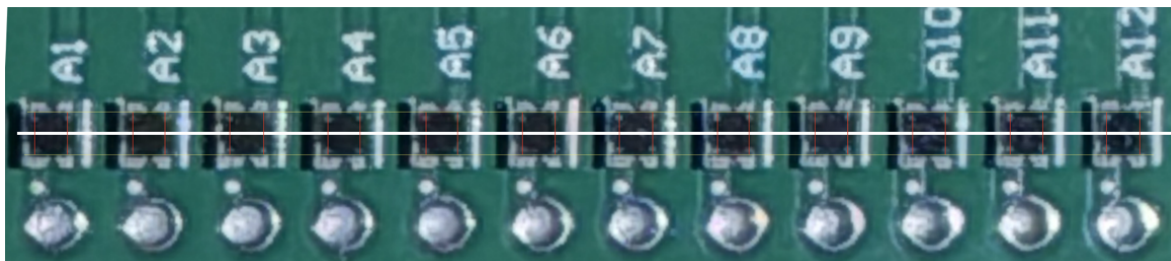


Рисунок 2.20 — Расположение SiPM на печатной плате



(а) Коннектор с выраженной асимметрией



(б) Коннектор с высокой точностью позиционирования волокон

Рисунок 2.21 — Модели коннекторов для волокна и для платы

Для дальнейшей работы был выбран коннектор, представленный на рисунке 2.21б.

Для 10-ти используемых SiPM определено пробойное напряжение. Результаты представлены на рисунке 2.22. Для рабочего режима выбрано перенапряжение 5 В. Значения рабочих напряжений находятся в таблице 2.10.

Канал DT5202	Рабочее напряжение, В
18	29,48
20	29,50
22	29,72
24	29,67
26	30,05
28	29,75
30	29,66
32	29,61
34	29,60
36	29,75

Таблица 2.10 — Рабочее напряжение SiPM Onsemi

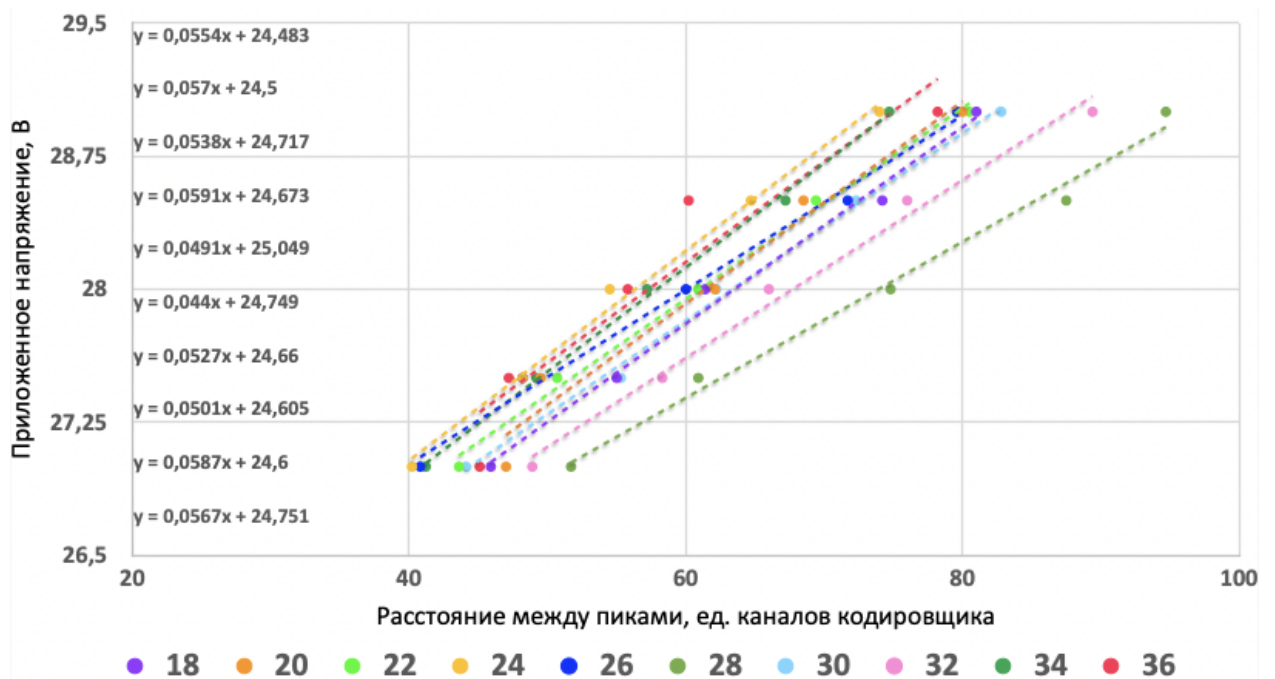


Рисунок 2.22 — Зависимость напряжения на SiPM Onsemi от расстояния между пиками

Оценка светосбора SiPMом при расположении волокна в коннекторе, представленном на рисунке 2.21б, выполнена с помощью стронция ^{90}Sr . Каждый тайл облучался радиоактивным ^{90}Sr , испускающим электроны с непрерывным β -спектром. Время набора данных спектров импульсов для каждого детектора составляло 150 сек.

На рисунке 2.23 представлены спектры импульсов детекторов. В качестве параметра оценки качества оптического соединения спектросмещающего волокна и фотоприемника была выбрана точка пересечения продолжения прямолинейного участка распределения с осью X. Для данной цели на линейную часть спада распределения накладывалась линейная аппроксимация. В качестве количественного критерия был выбран параметр b , соответствующий точке пересечения фита с осью X, то есть значению, при котором функция обращается в ноль. Данный параметр является оценкой качества светосбора и дает возможность сравнить используемые тайлы. Результаты полученных значений b для каждого из спектров записаны в таблицу 2.11.

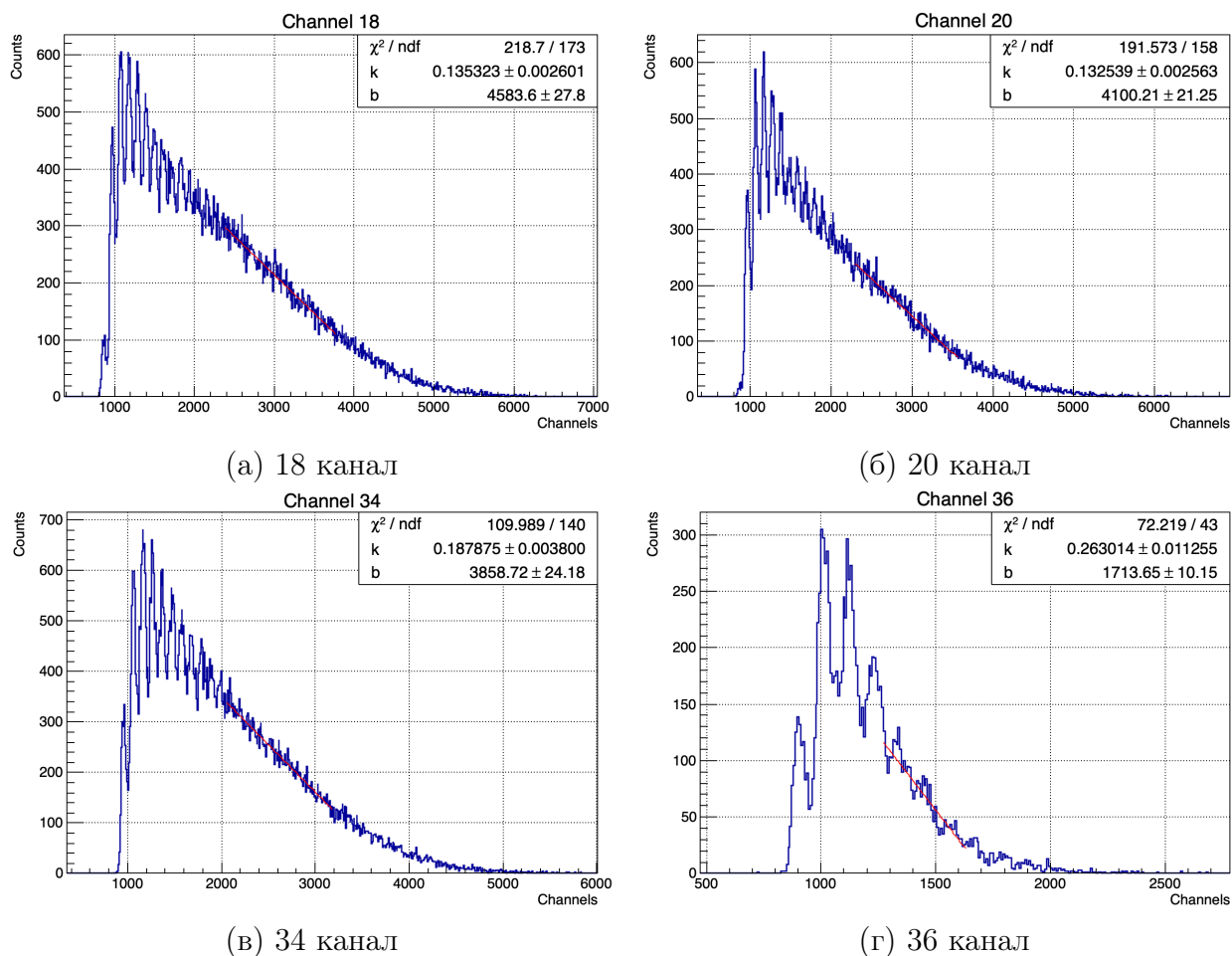


Рисунок 2.23 — Спектры импульсов детектора от ^{90}Sr

Тайл	Значение b , каналы
1	4584
2	4100
3	5445
4	4000
5	4193
6	4592
7	4155
8	4233
9	3859
10	1714

Таблица 2.11

Среднее значение b (без учета 36 канал): 4351,2

Стандартное отклонение (без учета 36 канал): 466,1

Значение параметра b для 10-го - триггерного тайла не укладывается в 3σ , значит данный тайл обладает дефектом и не может работать

исправно. Для того, что бы повысить эффективность телескопа, к триггерным каналам был добавлен 9-ый тайл.

Для калибровки шкалы амплитудного режима были набраны одноэлектронные спектры сигналов SiPM при рабочем напряжении. Пример представлен на рисунке 2.24.

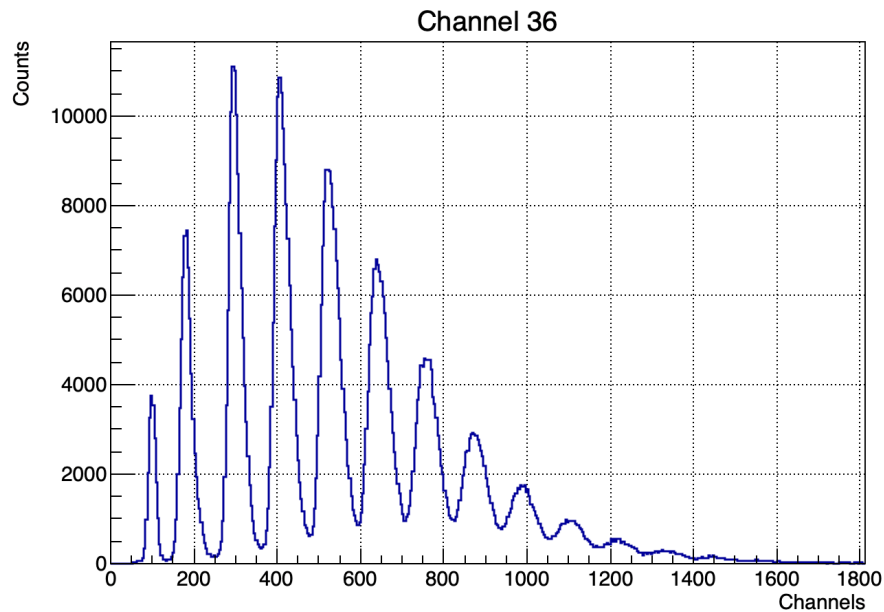
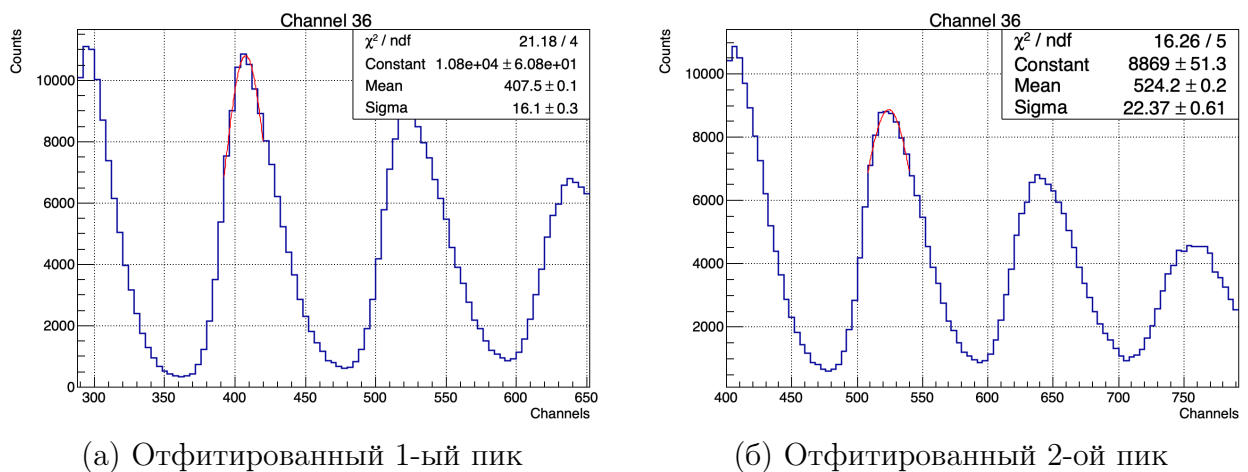


Рисунок 2.24 — Одноэлектронный спектр сигналов SiPM Onsemi для 36 канала DT5202



(а) Отфитированный 1-ый пик

(б) Отфитированный 2-ой пик

Рисунок 2.25 — Пики одноэлектронного спектра, аппроксимированные функцией Гаусса

Данные калибровки занесены в таблицу 2.12.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.26. Измерения проводились в амплитудном и временном режимах. В данном

Канал DT5202	Расстояние между соседними пиками в ед. к. кодировщика
18	108
20	111
22	116
24	109
26	100
28	116
30	112
32	103
34	109
36	111

Таблица 2.12 — Калибровка каналов DT5202 в амплитудном режиме

эксперименте был проанализирован сигнал с предусилителя низкого усиления. Триггером для системы служило мажоритарно совпадение 2-ух каналов из 3-ёх каналов (18, 34 и 36), реализованное посредством внутренней логики DT5202.

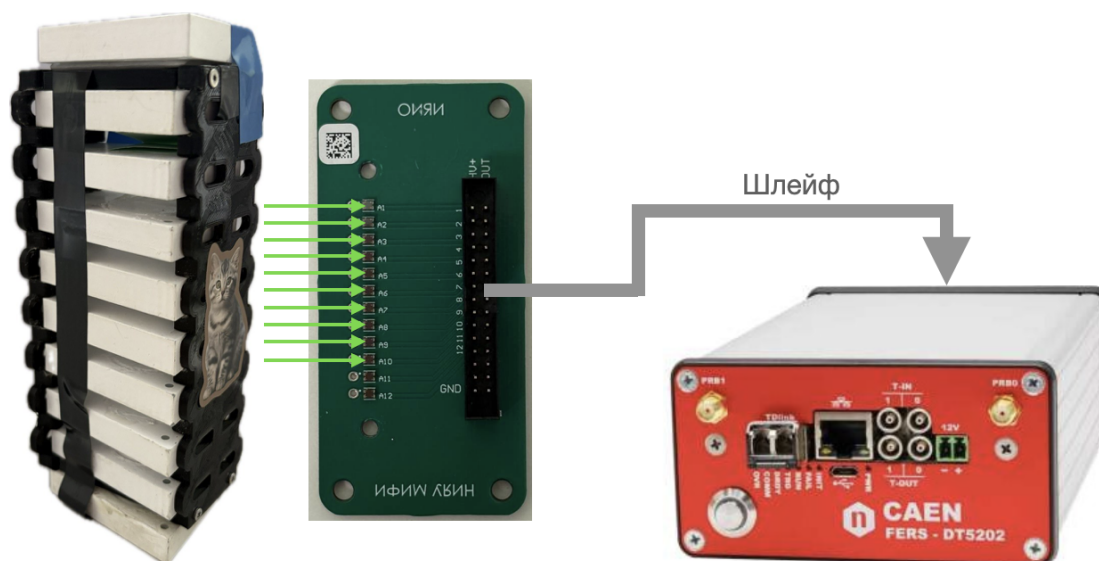


Рисунок 2.26 — Экспериментальная установка с платой Onsemi

В амплитудном режиме измерений были получены спектры энергетических потерь мюонов в тайлах. После калибровки амплитудной шкалы спектры аппроксимировались свёрткой Ландау и Гаусса. Результаты представлены на рисунке 2.27. Наиболее вероятные отклики тайлов занесены в таблицу 2.13.

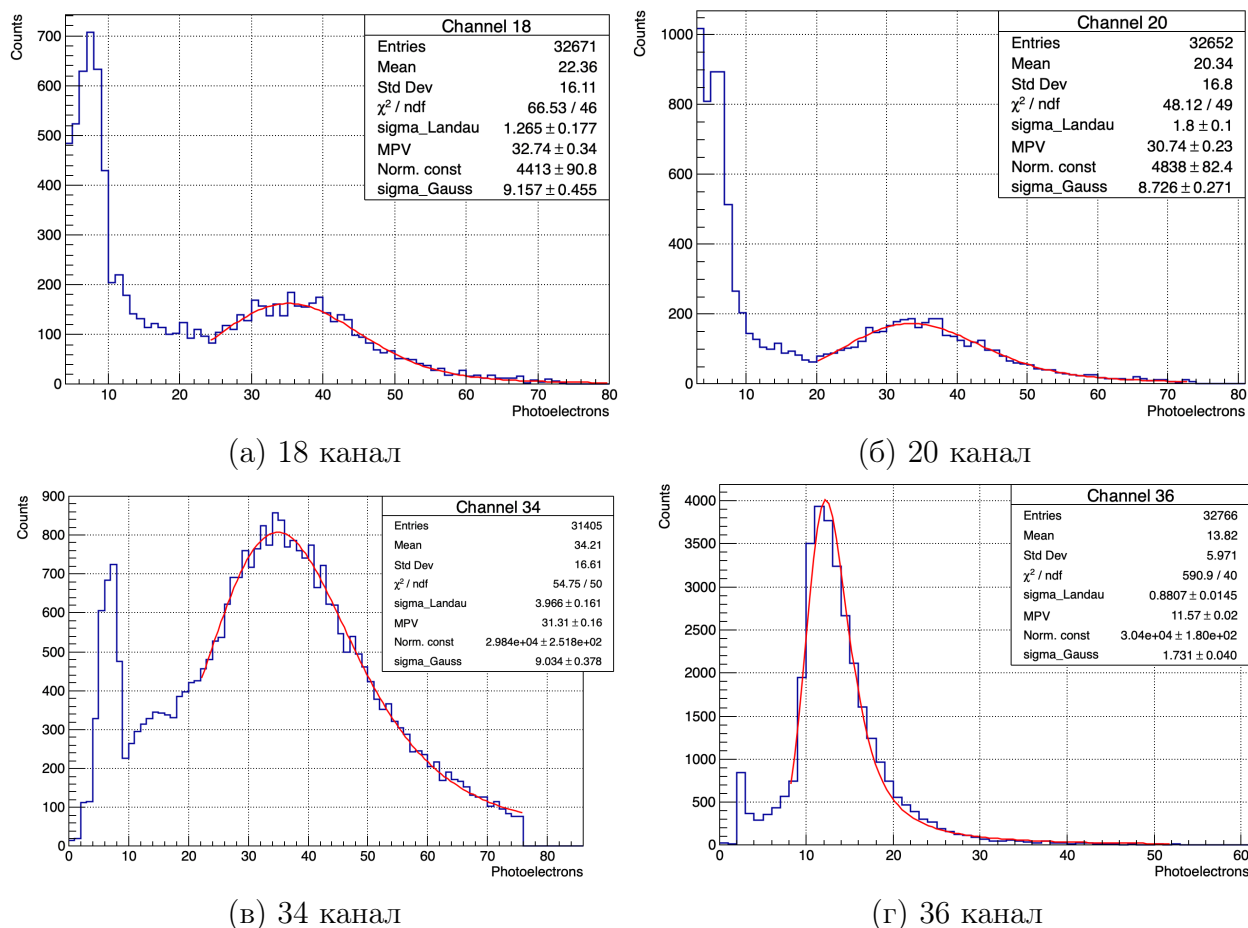


Рисунок 2.27 — Спектры энергетических потерь мюонов в амплитудном режиме измерений

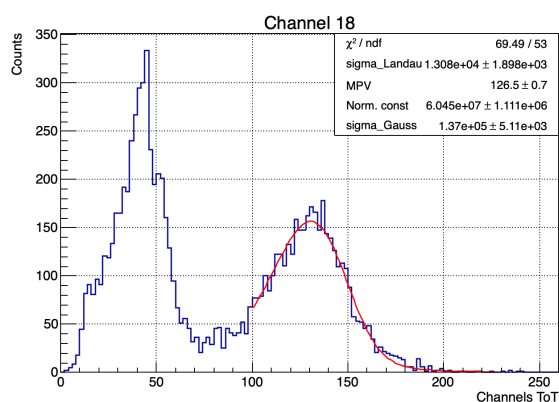
Тайл	MPV, фэ
1	33
2	31
3	34
4	29
5	37
6	35
7	32
8	35
9	31
10	12

Таблица 2.13 — Значения MPV тайлов телескопа с отверстиями для волокна в коннекторе 1.25 мм

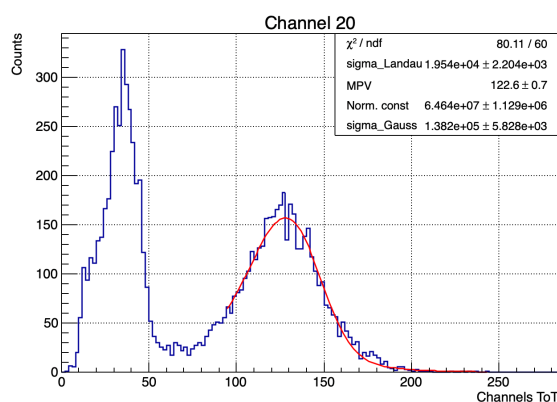
Наиболее вероятный средний отклик тайлов составил (33 ± 2) фэ. MPV для 10-го тайла не укладывается в разброс среднего для остальных

тайлов, что свидетельствует о возможных дефектах сцинтиллятора, волокна или соединении волокно-фотоприемник.

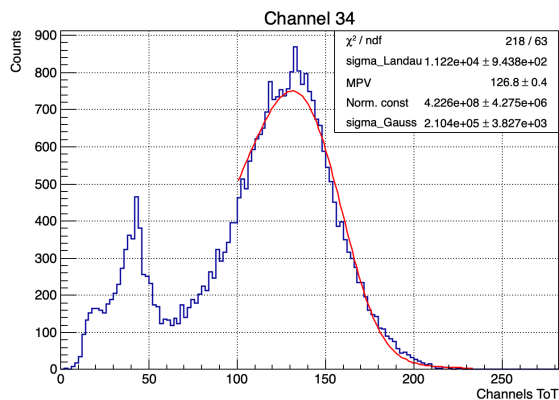
Аналогичные спектры энергетических потерь получены и для временного режима измерений Time-over-Threshold. Для аппроксимации распределений была использована модифицированная свёртка, учитывающая нелинейность. Результаты представлены на рисунке 2.28. В режиме ToT также выделяется 36 канал (рисунок 2.28г). Для данного канала наблюдается значительно пониженный отклик, полезный сигнал смещен в область шумового пика и частично сливается с ним. В результате, полезную часть сигнала невозможно проанализировать.



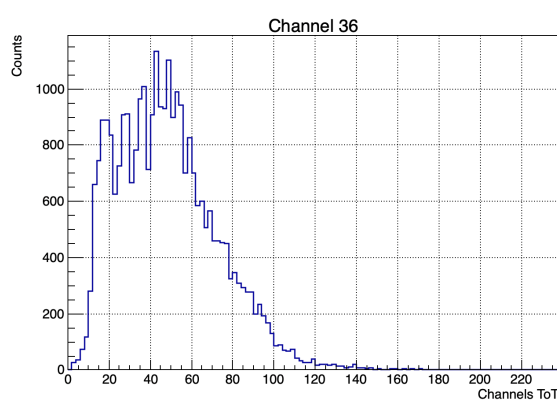
(а) 18 канал



(б) 20 канал



(в) 34 канал



(г) 36 канал

Рисунок 2.28 — Спектры энергетических потерь мюонов во временном режиме измерений

Для более точного расположения спектросмещающих волокон дизайн коннектора был изменен. По результатам тестов с различными диаметрами отверстий установлено, что диаметр 1,15 мм является минимальным, при котором волокно без затруднений проходит в отверстие и зазор между волокном и стенкой коннектора полностью заполняется клеем.

Так же, 10-ый тайл, ранее признанный дефектным, был заменен. В качестве дополнительного исследования в сцинтиллятор той же геометрии вкручено тверское спектросмещающее волокно OSL8 с пиком высвечивания 501 нм. Изучение характеристик данного волокна имеет практический интерес с точки зрения поиска альтернативных более доступных материалов для детектора BBC. Полученные результаты позволят сравнить светосбор волокном OSL8 с используемым в настоящее время спектросмещающим волокном SG BCF-92.

Для проверки нового коннектора был использован стронций. Полученные спектры импульсов представлены на рисунке 2.29.

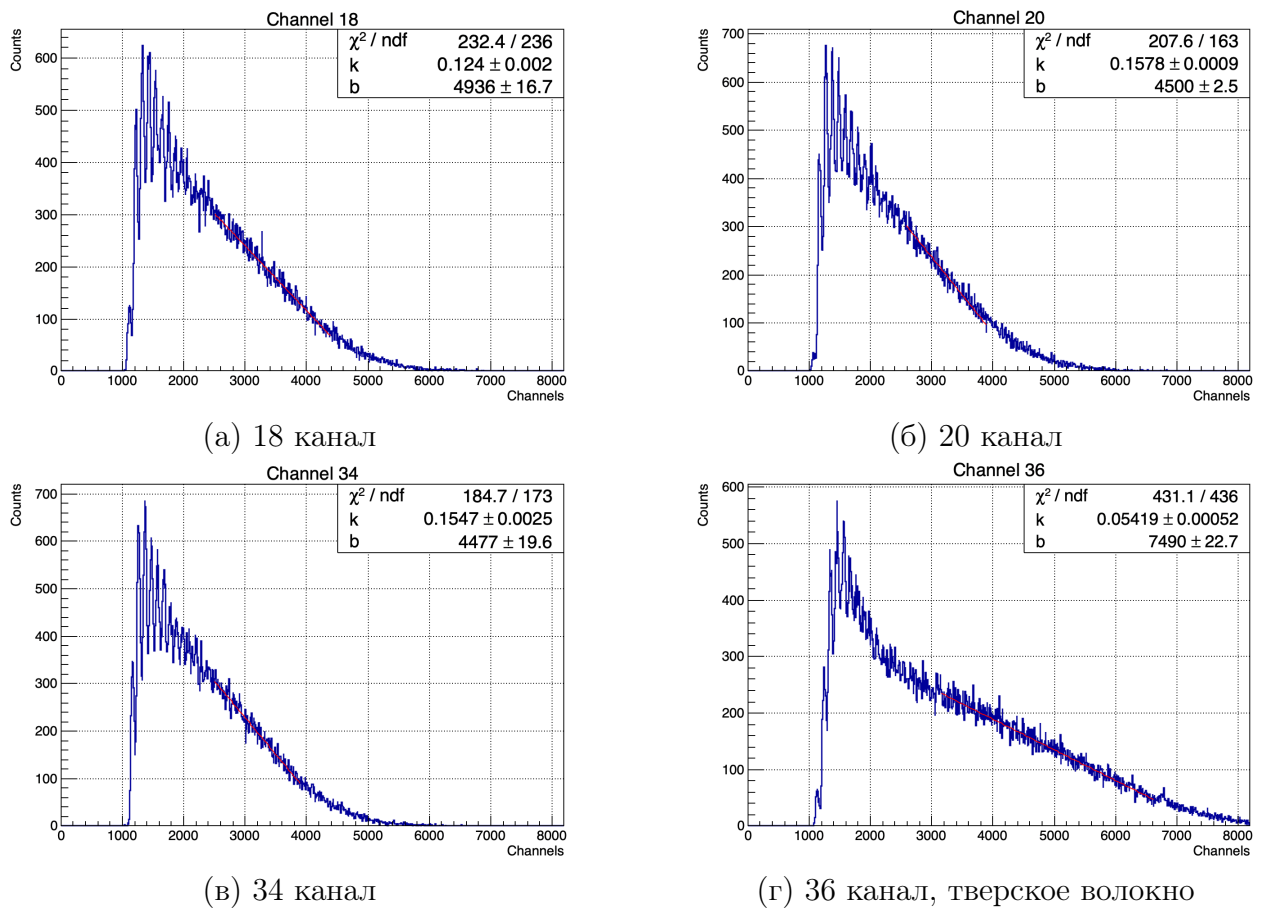


Рисунок 2.29 — Спектры импульсов детектора при проверке коннектора с отверстиями 1,15 мм

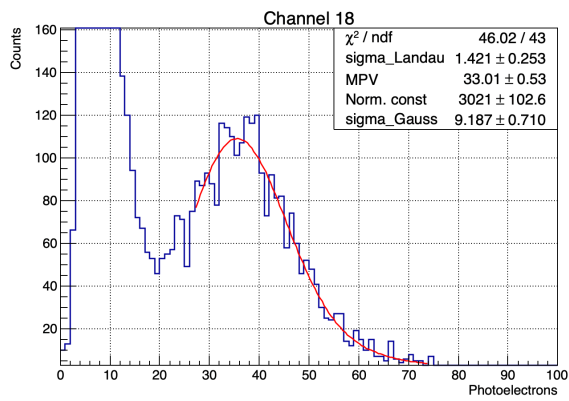
Тайл	Значение b , каналы
1	4936
2	4500
3	5538
4	4610
5	4534
6	5166
7	4500
8	4803
9	4477
10	7490

Таблица 2.14

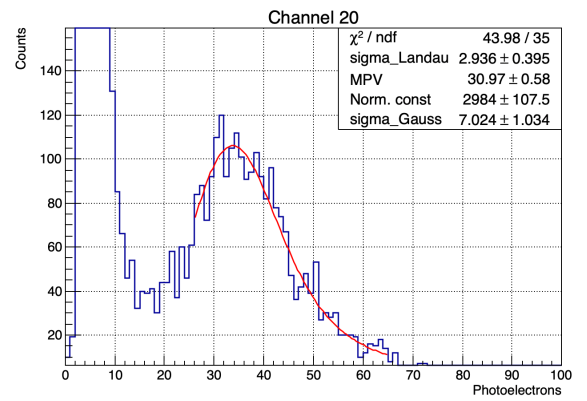
Для тайлов со спектросмещающим волокном SG BCF-92 среднее значение точки пересечения продолжения прямолинейного участка бета-спектра с энергетической осью составляет 4785 каналов кодировщика. Для тайла с тверским волокном OSL8 данное значение равно 7490 каналам АЦП. Полученный результат указывает на более высокий уровень регистрируемого сигнала для волокна OSL8 по сравнению с SG BCF-92, что может быть связано с более высоким коэффициентом захвата или малых потерях на длине и сгибах.

Далее в амплитудном и временном режимах были получены спектры энергетических потерь мюонов в сцинтилляторе. На рисунке 2.31 представлены спектры набранные в амплитудном режиме, на рисунке 2.30 - во временном режиме. Значения наиболее вероятных энергетических потерь приведены в таблице 2.15. Для тайлов с спектросмещающим волокном SG BCF среднее значение отклика составляет (33 ± 3) фэ. Амплитуда сигнала для тайла с тверским волокном на 48,5 % больше среднего отклика других тайлов.

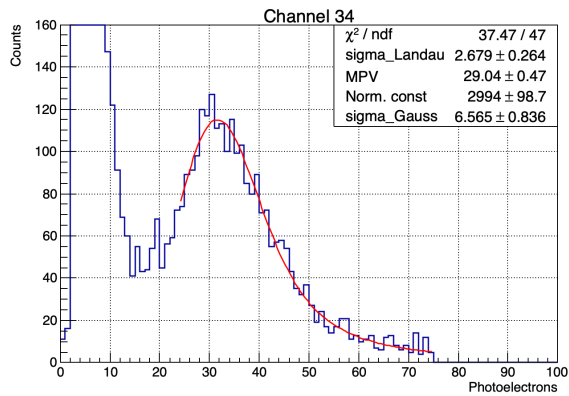
Средний отклик тайлов на мюоны для коннекторов с отверстиями 1.25 мм и 1.15 мм оказался одинаковым. Однако стоит отметить, что отклик всех тайлов при использовании коннектора нового образца превышет 30 фэ. А также значение параметра b при измерениях со стронцием выросло в среднем на 400 каналов по сравнению с предыдущими результатами.



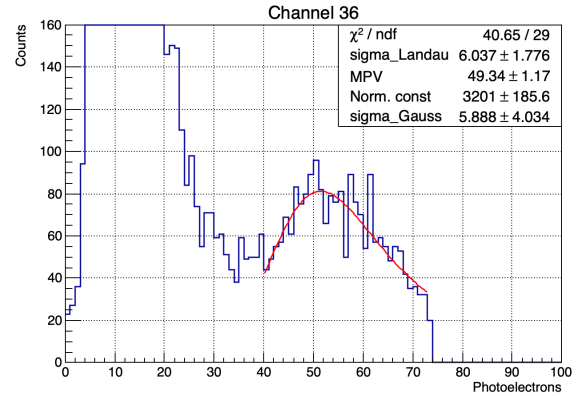
(а) 18 канал



(б) 20 канал



(в) 34 канал

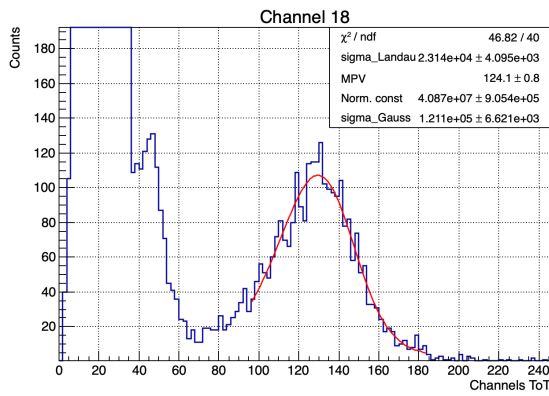


(г) 36 канал, твердое волокно

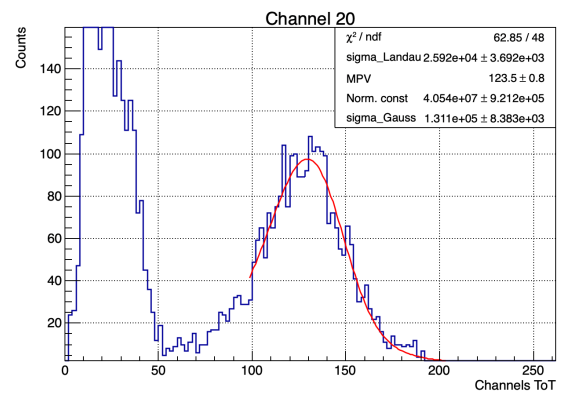
Рисунок 2.30 — Спектры энергетических потерь мюонов в амплитудном режиме при использовании коннектора с отверстиями 1.15 мм

Тайл	MPV, фэ
1	33
2	31
3	34
4	31
5	37
6	35
7	31
8	33
9	30
10	49

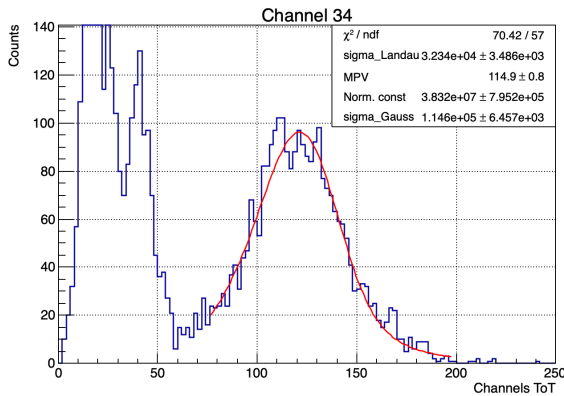
Таблица 2.15 — Значения MPV тайлов телескопа при использовании коннектора с отверстиями 1.15 мм



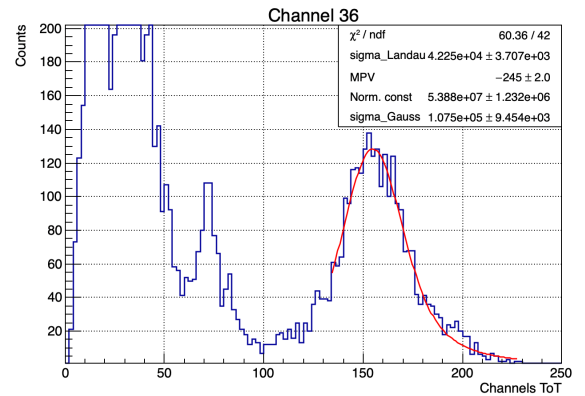
(а) 18 канал



(б) 20 канал



(в) 34 канал



(г) 36 канал, твердое волокно

Рисунок 2.31 — Спектры энергетических потерь мюонов во временном режиме при использовании коннектора с отверстиями 1.15 мм

Полный детектор ВВС планируется использовать еще один тракт передачи фотонов - чистое оптическое волокно. Для оценки величины регистрируемого сигнала был проведен эксперимент, в котором конфигурация прошлой установки была дополнена.

10 чистых волокон длиной $\sim 2,4$ м помещены в шланг, для компактности и защиты от внешних повреждений. Торцы волокон помещены и вклеены в коннекторы с диаметром отверстий 1,15 мм и заполированы с двух сторон, согласно разработанной методике полировки. Шифтеры телескопа соединены с чистыми оптическими волокнами посредством соединительного коннектора (рисунок 2.32). Для уменьшения потерь фотонов место соединения промазано оптической смазкой Pate-7. Противоположные концы чистых волокон выходят на SiPM.

Амплитудные спеткры, полученные при регистрации космических мюонов, представлены на рисунке 2.33. Наиболее вероятный отклик для каждого тайл приведен в таблице 2.16.

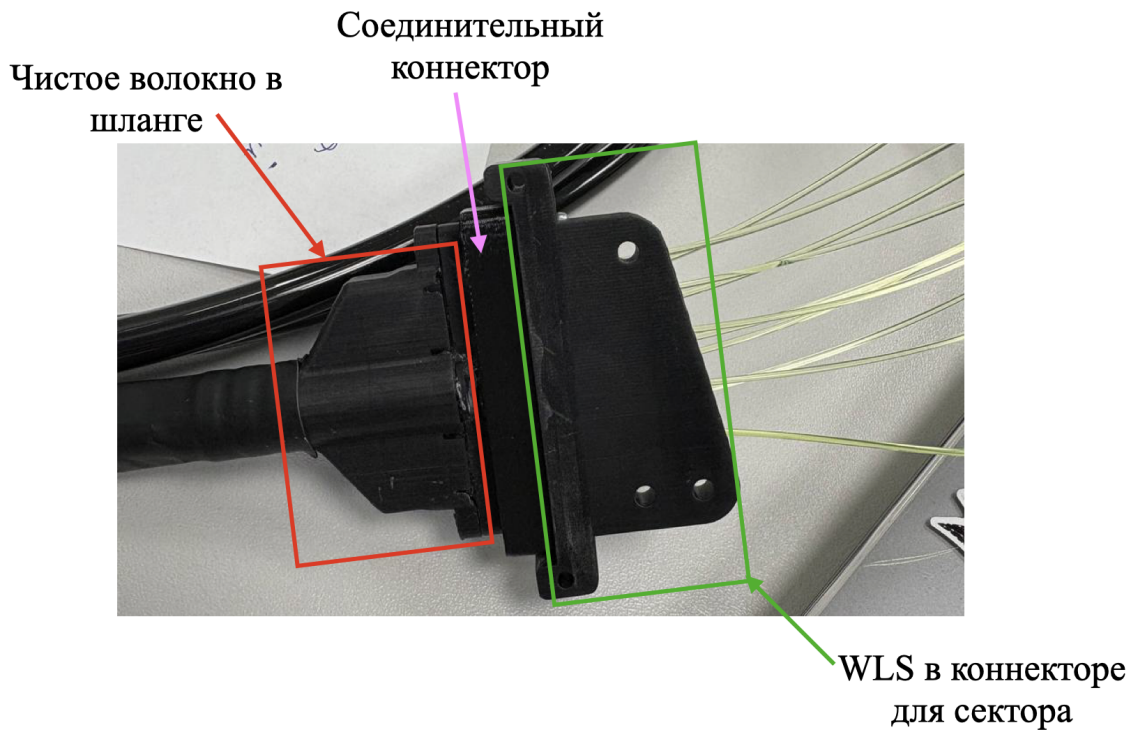


Рисунок 2.32 — Соединение спектросмещающих волокон с чистыми оптическими волокнами

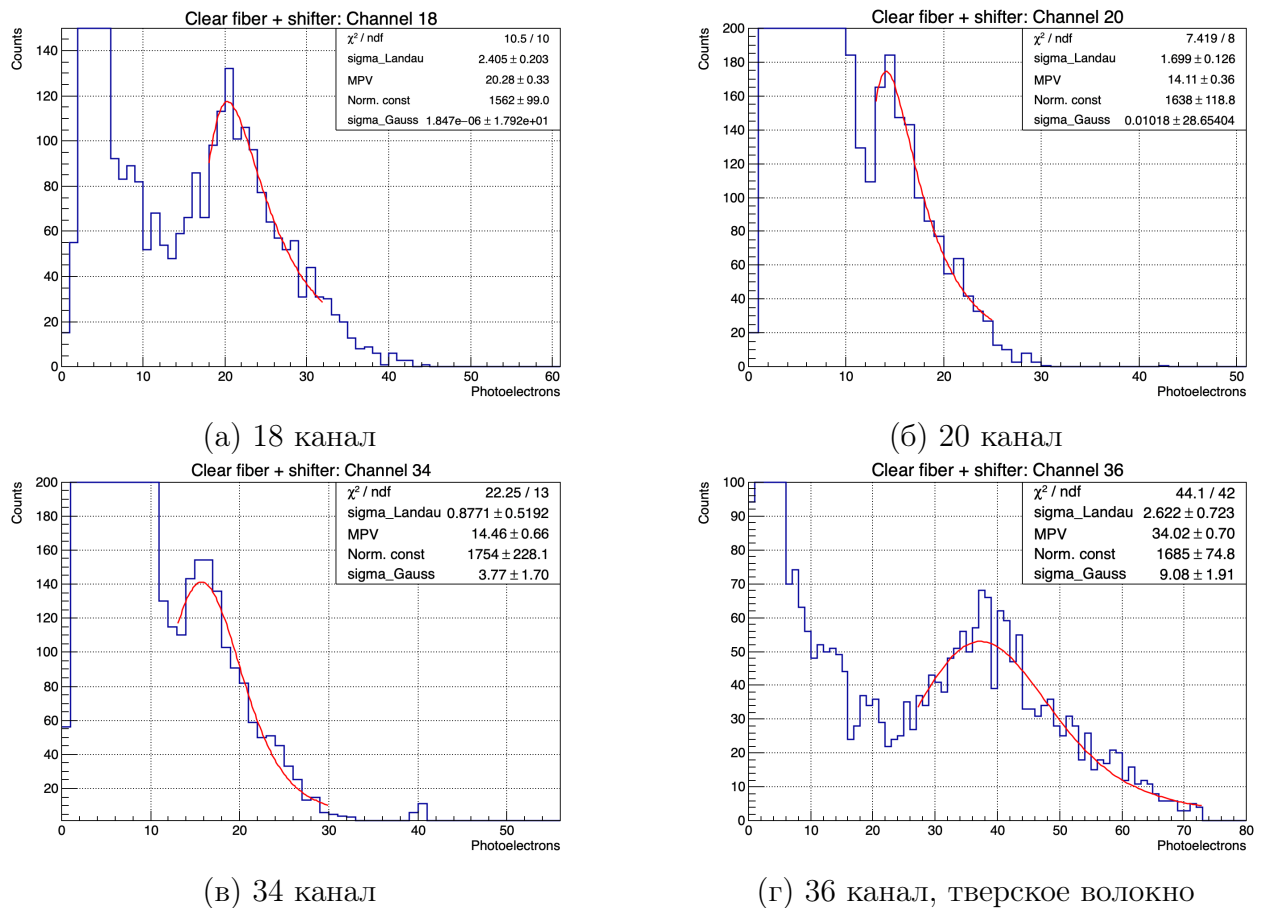


Рисунок 2.33 — Спектры энергетических потерь мюонов в амплитудном режиме при использовании чистого волокна

Тайл	MPV, фэ
1	20
2	14
3	12
4	13
5	15
6	19
7	20
8	19
9	14
10	34

Таблица 2.16 — Значения MPV тайлов телескопа

Средний отклик для тайлов с волокном SG BCF-92 составил (16 ± 3) фэ. Амплитуда отклика сигнала при добавлении тракта из чистого волокна упала на 51 %, но все еще превышает амплитуду шумов.

2.4.2 ПЛАТА С SiPM НАМАМАТСУ

Одним из возможных фотоприемников детектора ВВС являются SiPM Hamamatsu S14160-1315PS. Основные характеристики данных SiPM представлены в таблице 2.17. Для каждого используемого SiPM было определено пробойной напряжение. Для дальнейшей работы было выбрано перенапряжение 8 В. Итоговые напряжения представлены в таблице 2.18.

Параметр	S14160-1315PS
Эффективная фоточувствительная область	$1,3 \times 1,3$ мм
Шаг пикселя	15 мкм
Количество пикселей	7284
Коэффициент заполнения	49 %
Показатель преломления материала окна	1,57
Коэффициент усиления ($U_{\text{перенапр}} = 8$ В)	$6,5 \times 10^5$

Таблица 2.17 — Характеристики SiPM Hamamatsu S14160-1315PS

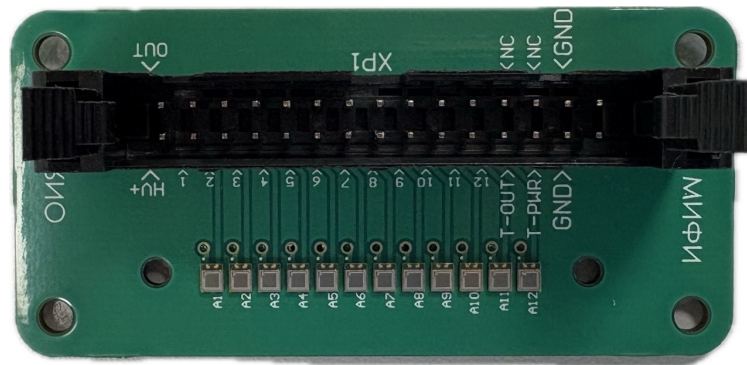


Рисунок 2.34 — Печатная плата с SiPM Hamamatsu

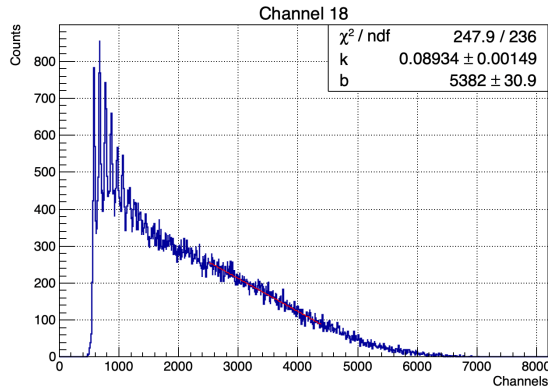
Канал DT5202	Рабочее напряжение, В
18	45,70
20	45,63
22	45,76
24	45,31
26	45,39
28	45,89
30	45,79
32	45,64
34	45,43
36	45,24

Таблица 2.18 — Рабочее напряжение SiPM Hamamatsu

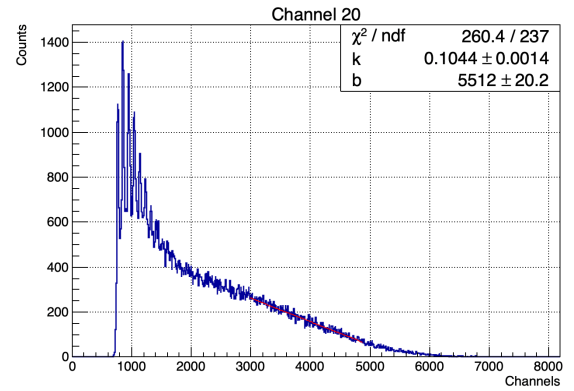
Установка проводимого эксперимента идентична установке, описанной в разделе 2.4.1, за исключением замены печатной платы с SiPM Onsemi на плату с SiPM Hamamatsu. Коэффициент усиления SiPM Hamamatsu в ~ 10 раз ниже усиления Onsemi, следовательно амплитуда выходного сигнала падает в 10 раз. Итогового значения амплитуды не хватает для превышения порога дискриминатора при работе по низкому усилению DT5202. По этой причине работа с SiPM Hamamatsu будет идти по высокому усилению DT5202. Также, ввиду изменения геометрии SiPM ответная часть коннектора, располагающаяся на плате, была скорректирована для соблюдения соосности спектросмещающих волокон с чувствительной областью фотоприемника.

Перед набором космики выполнена оценка соосности WLS и фотоприемника с использованием ^{90}Sr . Спектры амплитуд импульсов, зарегистрированных детектором при облучении ^{90}Sr , представлены на рисунках 2.35. Для тайлов с волокном SG BCF92 измерения проводились при коэффициенте усиления равном 50 по тракту предусилителя высокого усиления.

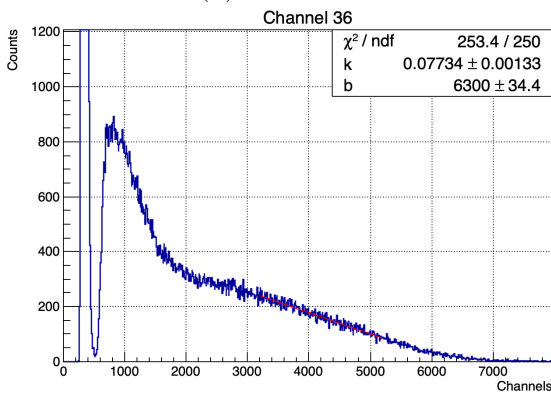
Для тайла с тверским волокном коэффициент усиления был подобран таким образом, чтобы обеспечить расположение верхней границы β - спектра в пределах динамического диапазона АЦП. Значение коэффициента усиления составило 40.



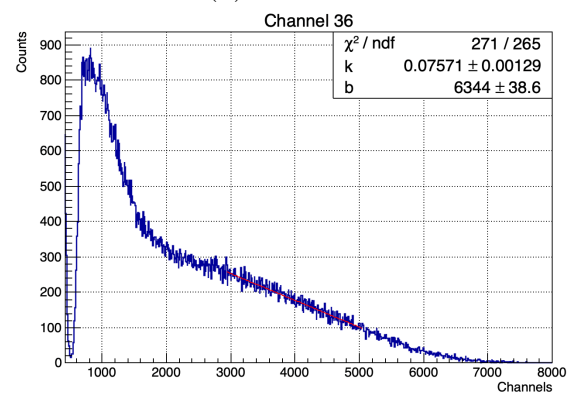
(а) 18 канал



(б) 20 канал



(в) 34 канал



(г) 36 канал, тверское волокно

Рисунок 2.35 — Спектры импульсов детекторов при облучении тайлов ^{90}Sr

Тайл	Значение b , каналы
1	5382
2	5512
3	6362
4	5210
5	5694
6	5795
7	5663
8	6611
9	6300
10	6344

Таблица 2.19

Спектры энергетических потерь мюонов в амплитудном режиме пред-

ставлены на рисунке 2.36. Полученные наиболее вероятные энергопотери частиц занесены в таблицу 2.20. Среднее значение MPV составило (43 ± 4) , что на 23% больше среднего отклика тайлов при измерениях с SiPM Onsemi. Для тайла с тверским волокном отклик на 44% больше среднего отклика остальных тайлов и на 36% больше отклика при измерении на SiPM Onsemi.

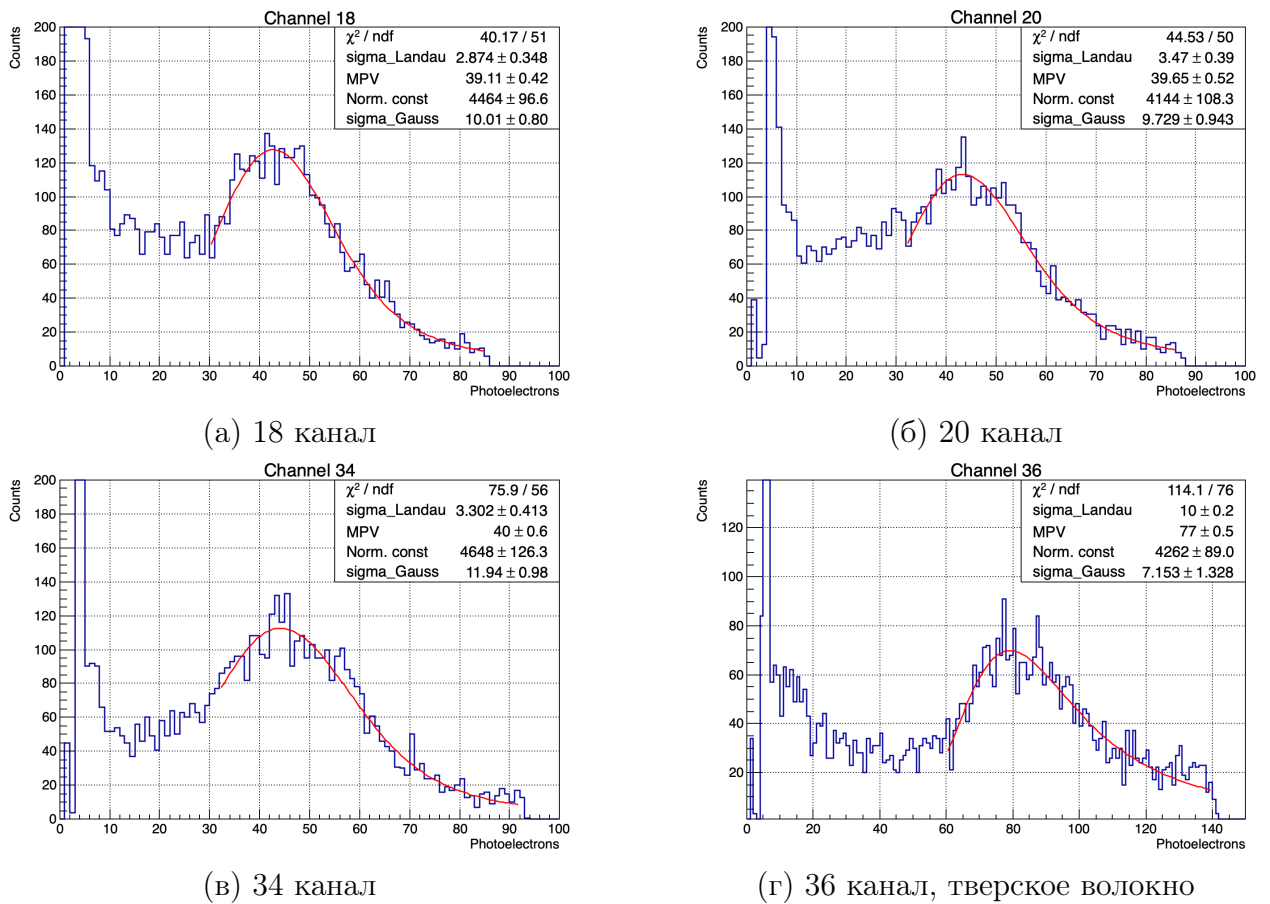


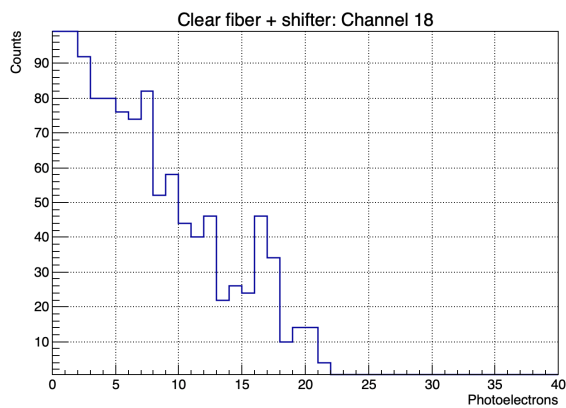
Рисунок 2.36 — Спектры энергетических потерь мюонов при использовании SiPM Hamamatsu

Тайл	MPV, фэ
1	39
2	40
3	44
4	41
5	49
6	46
7	43
8	49
9	40
10	77

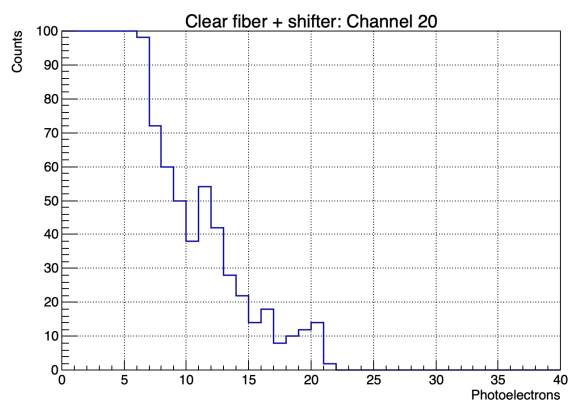
Таблица 2.20 — Значения MPV тайлов телескопа

Далее были проведены измерения с использованием дополнительного тракта передачи фотонов - чистые волокна. Для проведения измерений был использован шланг с чистыми волокнами, изготовленный для аналогичного эксперимента из раздела 2.4.1. Для тайлов со спектрмещающим волокном SG VCF92 коэффициент усиления был увеличен до 60.

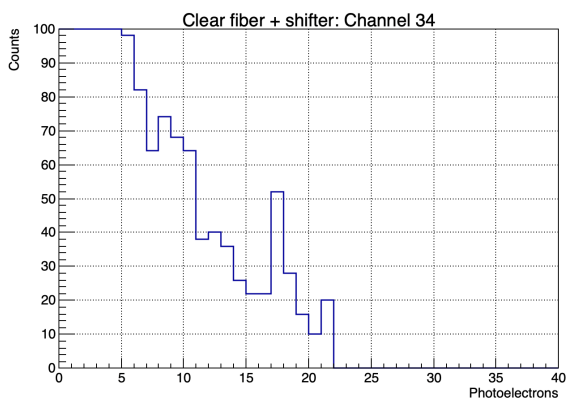
Амплитудные спектры энергетических потерь мюонов представлены на рисунке 2.37. Полученные распределения не имеют выраженных пиков. Вероятней всего, при распространении фотонов на большой длине чистого волокна и на оптическом соединении спектрсмещающих и чистых оптических волокон возникли потери фотонов. Итогового числа фотонов, достигающих фотоприемника, не хватает для формирования сигнала выше уровня шумов. Дополнительным фактором может являться меньший коэффициент усиления SiPM Hamamatsu по сравнению с ранее использовавшимся SiPM Onsemi, что приводит к снижению амплитуды регистрируемых импульсов. В результате часть полезного сигнала находится в шумовом пике, что не позволяет обнаружить наиболее вероятные потери частицы.



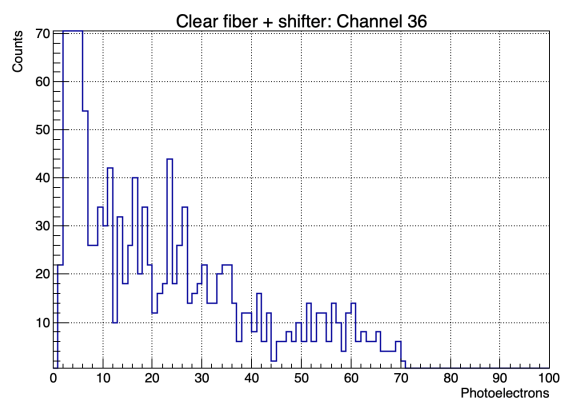
(а) 18 канал



(б) 20 канал



(в) 34 канал

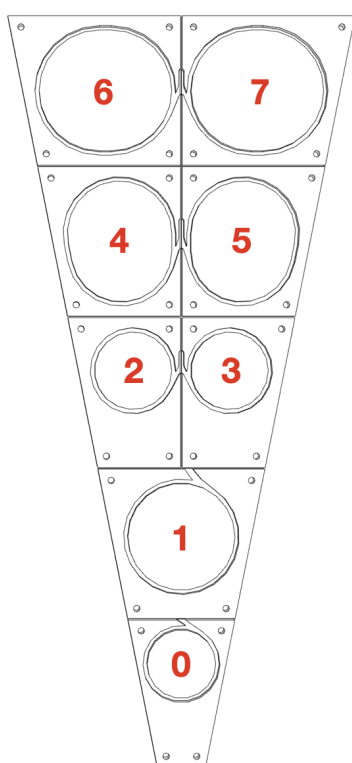


(г) 36 канал, твердое волокно

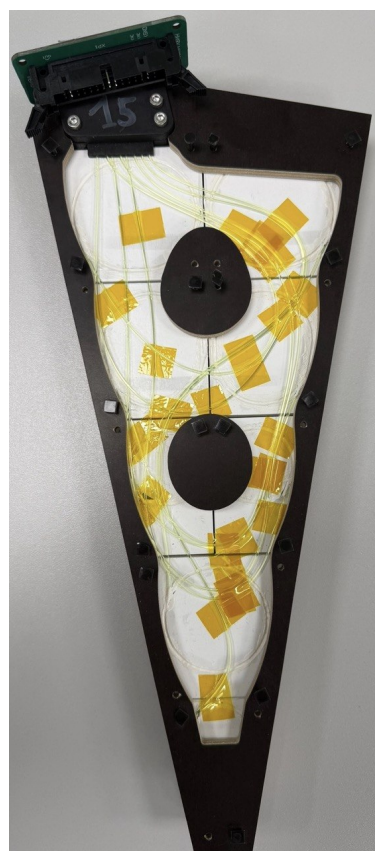
Рисунок 2.37 — Спектры энергетических потерь мюонов при использовании тракта из чистого оптического волокна на SiPM Hamamatsu

2.5 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОТОТИПОВ СЕКТОРОВ ВВС В РЕЖИМЕ ТЕЛЕСКОП

Для тестовых измерений на ускорителе будет стоять прототип детектора ВВС, который представляет из себя колеса, состоящие из усеченных секторов по 8 тайлов в каждом. На рисунке 2.38а изображена модель усеченного сектора с нумерацией тайлов, а на рисунке 2.38б представлен изготовленный прототип сектора ВВС.



(а) Модель усеченного сектора ВВС с нумерацией тайлов



(б) Изготовленный усеченный сектор ВВС

Рисунок 2.38 — Усеченный сектор детектора ВВС

Для оценки ожидаемого отклика каждого тайла усеченного сектора был собран телескоп из 3-ёх секторов (рисунок 2.39). Расстояние между секторами составило $\sim 1,8$ см. Регистрация фотонов осуществлялась с помощью SiPM Hamamatsu S14160-1315PS, расположенных на печатной плате. Выходные сигналы SiPM регистрировались с помощью DT5202.

Для каждого используемого SiPM было определено напряжение пробоя. Набор данных осуществлялся при перенапряжении 8 В и коэффи-

циенте усиления 50 по каналу высокого усиления. При обработке данных гистограмма для каждого тайла заполнялась событиями, в которых одновременно регистрировались сигналы в соответствующих тайлах всех трёх секторов, что обеспечивало отбор преимущественно вертикальных космических мюонов.

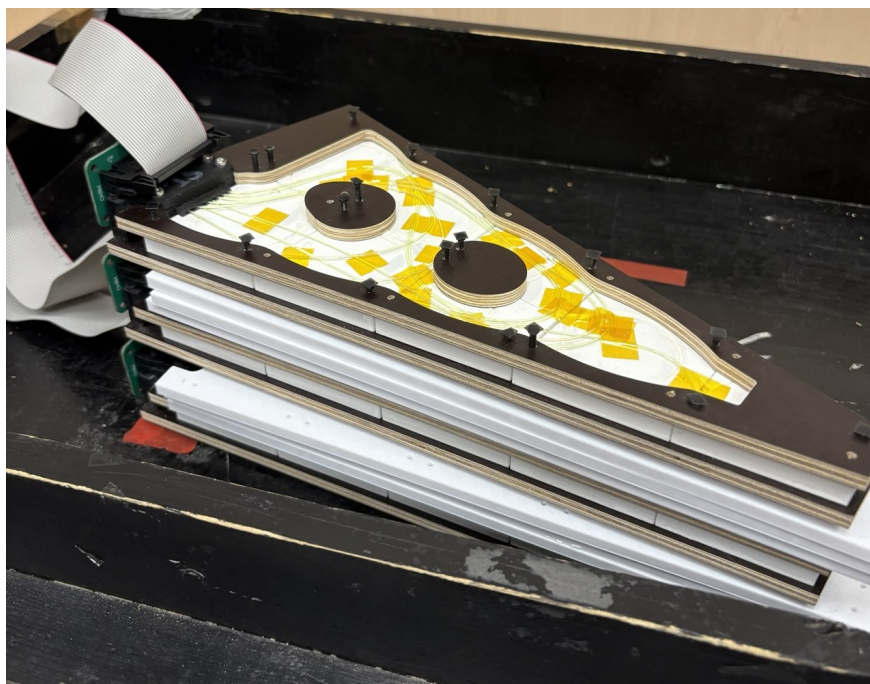
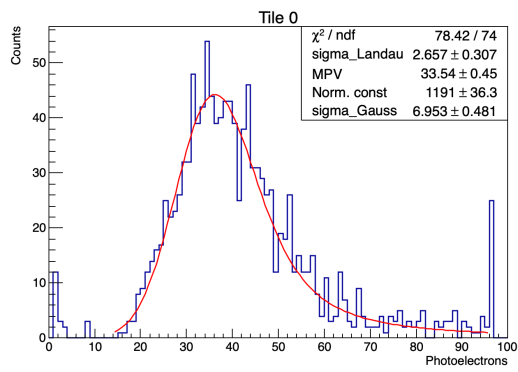
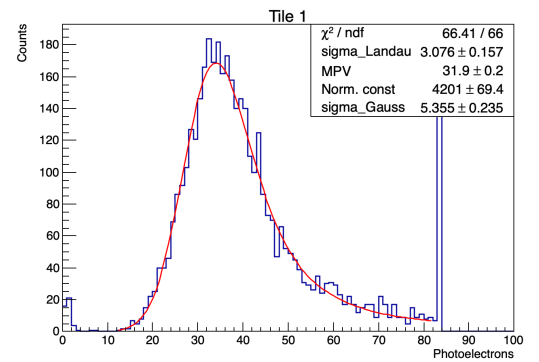


Рисунок 2.39 — Телескоп из прототипов секторов детектора ВВС

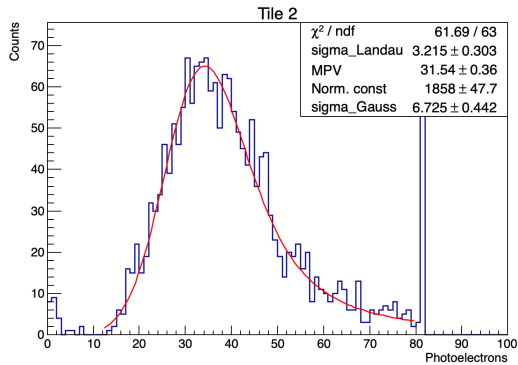
На рисунке 2.40 представлены спектры энергетических потерь мюонов для каждого тайла второго (центрального) сектора. В таблице 2.21 приведены значения наиболее вероятных энергетических потерь мюонов. Отклик каждого тайла является достаточным для регистрации полезной части сигнала.



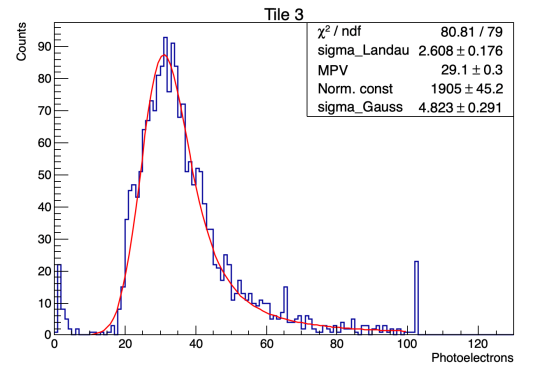
(а) Тайл 0



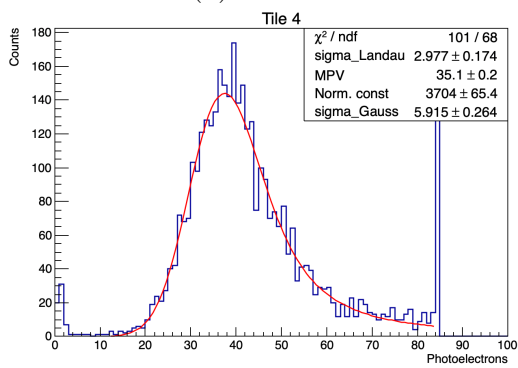
(б) Тайл 1



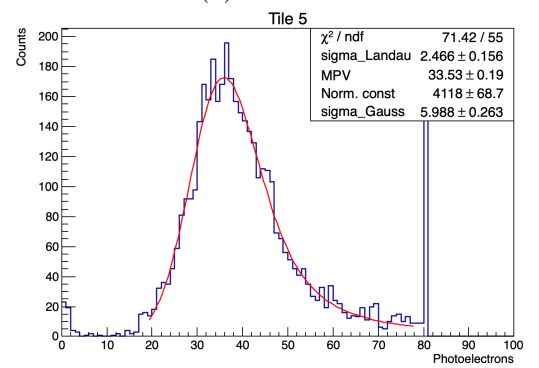
(в) Тайл 2



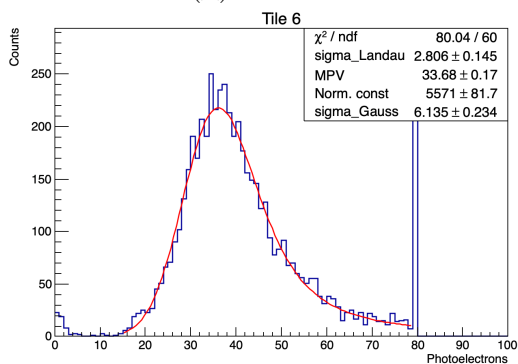
(г) Тайл 3



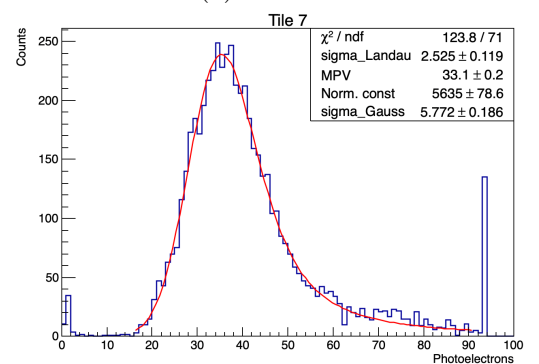
(д) Тайл 4



(е) Тайл 5



(ж) Тайл 6



(з) Тайл 7

Рисунок 2.40 — Спектры энергетических потерь мюонов для тайлов 2-го сектора ВВС

Тайл	MPV, фэ
0	34
1	32
2	32
3	30
4	35
5	34
6	34
7	33

Таблица 2.21 — Ожидаемый отклик тайлов прототипа сектора ВВС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы выполнено несколько задач. Для каждого из тайлов телескопа получена величина отклика и определён разброс величины отклика тайлов при регистрации космических мюонов. Наиболее вероятный средний отклик тайлов составил (31 ± 3) фотоэлектронов, разброс составил 8 фотоэлектронов. Данной амплитуды сигнала достаточно для превышения шумовых сигналов электроники. Оценена средняя эффективность телескопа по космическим мюонам, она составила $(99 \pm 2)\%$. Полученное значение указывает на то, что светосбора на уровне 30 фотоэлектронов достаточно для эффективной регистрации частиц.

Получены распределения сигналов детектора при регистрации мюонов в режиме Time-over-Threshold. Функция аппроксимации была модифицирована с поправкой на нелинейность шкалы ТоТ. Для восьми каналов DT5202 в режиме ТоТ проведена калибровка одного канала кодировщика в фотоэлектроны.

Оценивалось влияние компонентов детекторной сборки на светосбор. Измерения проводились с двумя вариантами фотоприемников: SiPM Onsemi и SiPM Hamamatsu. При использовании SiPM Hamamatsu средний отклик при регистрации космического излучения на 23% больше среднего отклика, полученного с SiPM Onsemi. Добавление тракта передачи фотонов в виде чистых оптических волокон привело к уменьшению отклика на 51% для измерений с SiPM Onsemi. При использовании SiPM Hamamatsu полезная часть сигнала находилась в шумах, что не позволило определить положение пика наиболее вероятных энергетических потерь. Вероятной причиной этого является меньший коэффициент усиления SiPM Hamamatsu по сравнению с SiPM Onsemi.

Дополнительные измерения для тайла с твердым волокном OSL8 показали амплитуду сигнала на 48,5% больше среднего отклика тайлов с волокном SG BCF92 при измерении на SiPM Onsemi и на 44% больше при

измерении на Hamamatsu.

Исследован отклик тайлов прототипа сектора ВВС в режиме телескопа. Для каждого тайла наиболее вероятное значение отклика детектора при регистрации мюонов превышает 30 фотоэлектронов, что удовлетворяет условиям регистрации частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA / V. Abazov [et al.]. — 2024. — arXiv: 2404.08317 [hep-ex].
2. The polarized proton and antiproton beam project at U-70 accelerator / V. V. Abramov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2018. — Vol. 901. — P. 62–68. — arXiv: 2001.01251 [physics.acc-ph].
3. Single Spin Asymmetry A_N in Polarized Proton-Proton Elastic Scattering at $\sqrt{s} = 200$ GeV / L. Adamczyk [et al.] // Phys. Lett. B. — 2013. — Vol. 719. — P. 62–69. — arXiv: 1206.1928 [nucl-ex].
4. Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [et al.]. — 2021. — arXiv: 2102.00442 [hep-ex].
5. *Kuraray*. Plastic Scintillating Fibers. — Japan.
6. *Saint-Gobain Crystals*. Plastic Scintillating Fibers. — 2021. — Product Sheet.
7. Material Selection of the SPD Beam-Beam Counter Scintillation Detector Prototype / A. M. Zakharov [et al.] // Phys. Part. Nucl. — 2024. — Vol. 55, no. 4. — P. 1091–1098.
8. Optimization of light yield by injecting an optical filler into the co-extruded hole of the plastic scintillation bar / A. Artikov [et al.] // JINST. — 2016. — Vol. 11, no. 05. — T05003. — arXiv: 1604.02260 [physics.ins-det].
9. *CAEN*. A5202/DT5202 User Manual. UM7945. Rev. 4. — 2023.
10. *CAEN*. UM7946 – Janus User Manual. Rev. 2. — 2023.
11. *CAEN*. FERS-5200 Front-End Readout System. — Italy, 2023. — Rev. 4.
12. MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) arrays: S13361-3050 series. — Hamamatsu City, Japan : Hamamatsu Photonics K.K., 2024.

13. *Onsemi*. C-Series SiPM Sensors. — 2022. — Rev. 9.