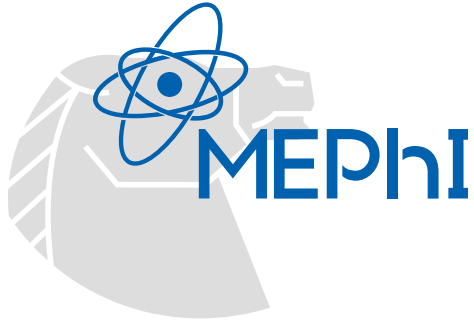




ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТЕКТОРА И ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОТКЛИК И РАЗРЕШЕНИЕ ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD

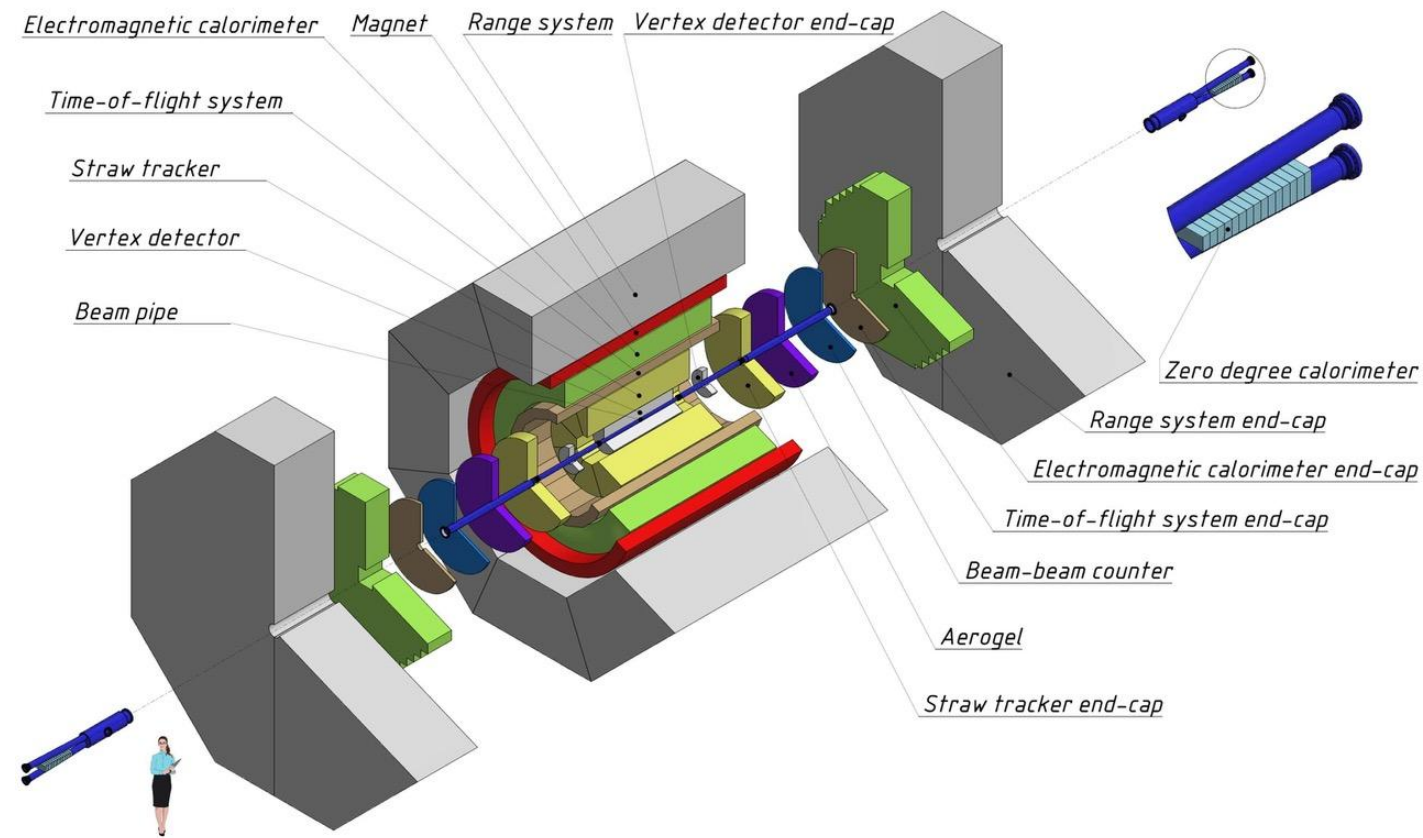
Научный руководитель: Тетерин Пётр Евгеньевич, доц., к.ф.-м.н.

Консультант: Дубинин Филипп Андреевич, старший преподаватель кафедры 40

Студент: Шафикова Дина Рашидовна М24-114

26.06.2026

ЭКСПЕРИМЕНТ SPD



Строение детекторной системы SPD

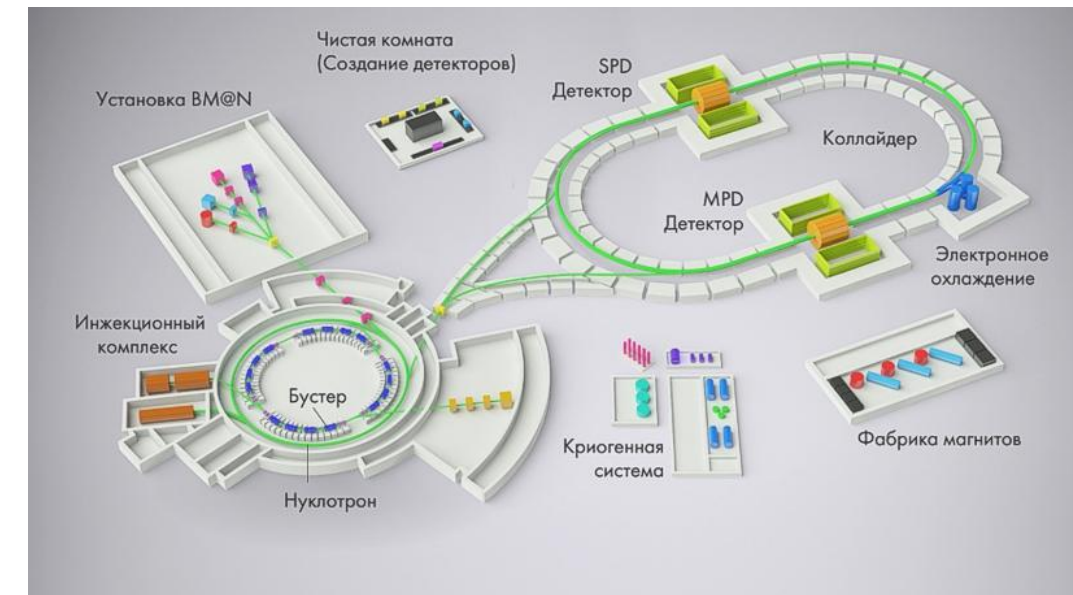
Эксперимент Spin Physics Detector (**SPD**) планируется к проведению на базе ускорительного комплекса **NICA** (ОИЯИ, Дубна).

Цель эксперимента: измерение вклада глюонов в спин протона и дейтрона.

Энергия столкновений до $\sqrt{s} = 27$ ГэВ.

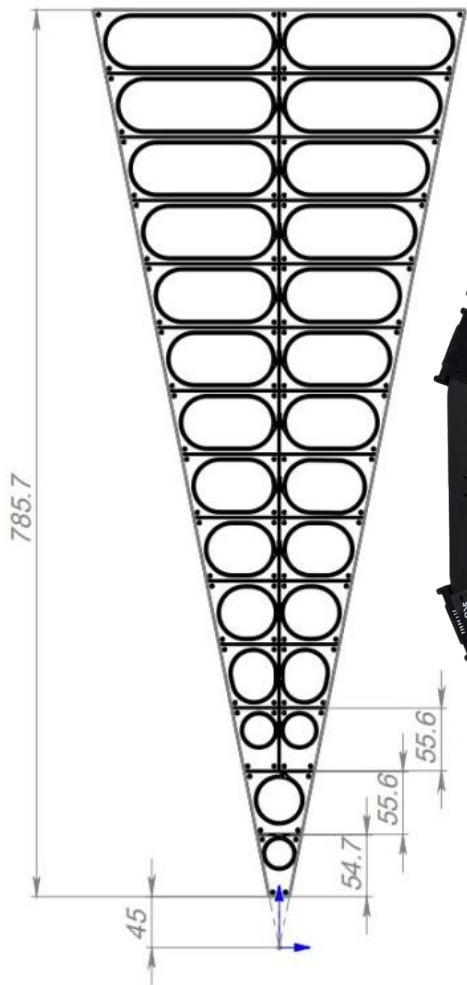
Частота взаимодействий до 4 МГц.

Максимальная светимость до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

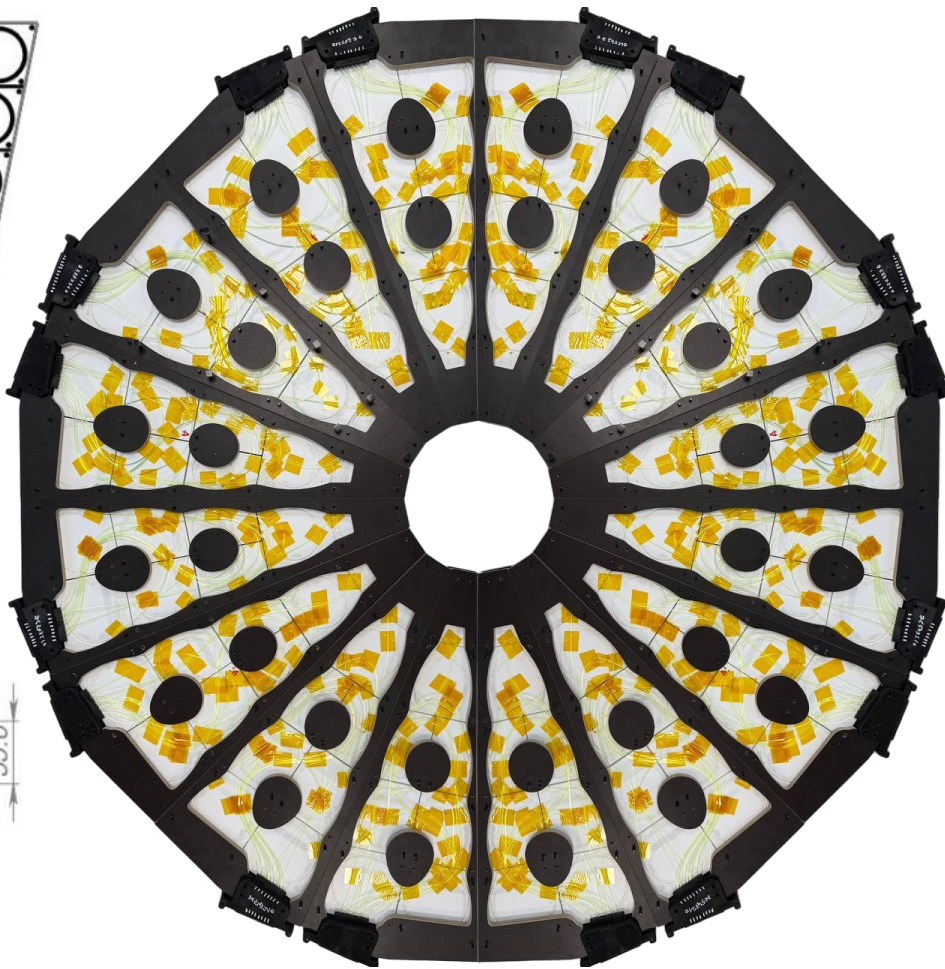


Ускорительный комплекс NICA

СЧЕТЧИК ПУЧКОВ BBC



Сектор BBC



Прототип колеса BBC

Детектор Beam-Beam Counter (**BBC**) состоит из:

- **16 секторов**, в каждом секторе **26** сцинтилляционных пластин (**тайлов**) из **полистирола**, покрытых отражателем;
- Свет от тайла захватывается спектросмещающим оптическим волокном (**WLS-волокном**) и передается к фотоприемнику (**SiPM**);
- Сигнал обрабатывается многоканальной системой сбора данных **CAEN FERS-5200**.

Задачи детектора BBC:

- Оценка центральности и множественности событий;
- Восстановление плоскости событий;
- Мониторинг поляризации пучков.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель: определение оптимальных параметров системы, состоящей из сцинтилляционного тайла и спектросмещающего оптоволокну, обеспечивающих наилучший светосбор.

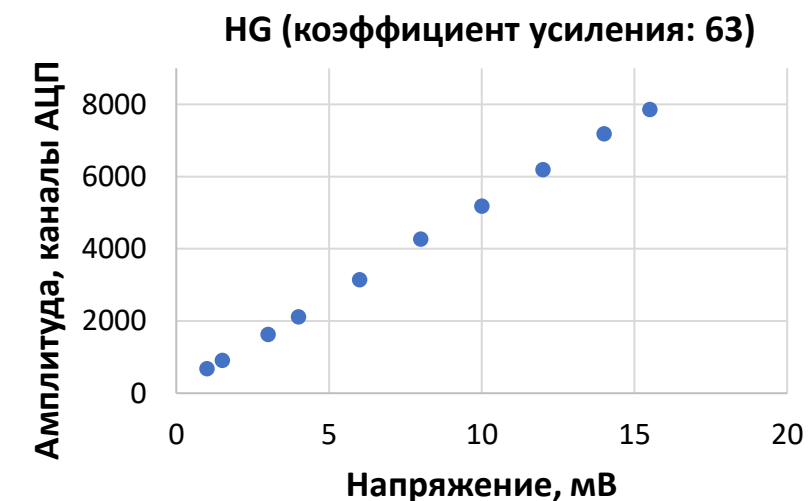
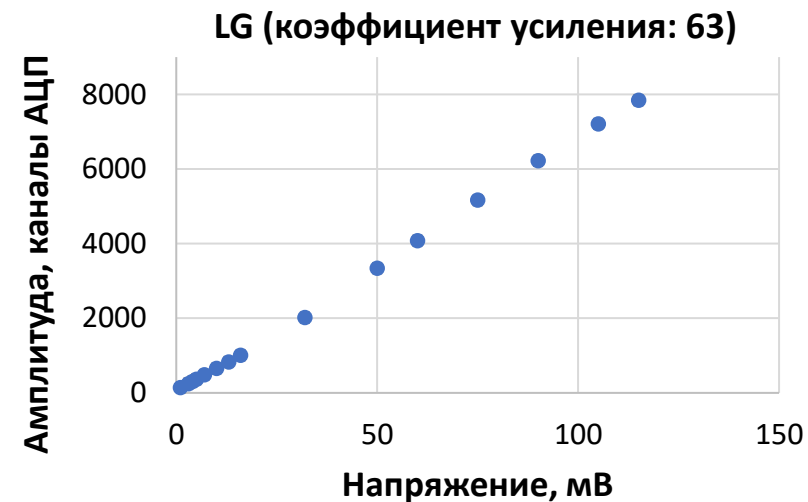
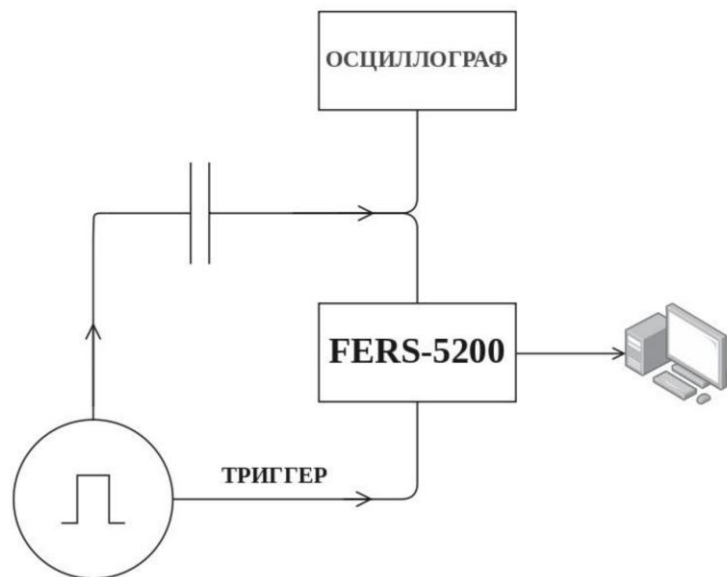
Задачи:

- Провести калибровку многоканальной системы сбора данных CAEN FERS-5200;
- Провести подбор индивидуальных пробойных напряжений SiPM;
- Измерить зависимость средней амплитуды сигнала от числа витков WLS-волокна внутри тайла с использованием импульсного светодиода;
- Измерить амплитудные спектры потерь энергии мюонов для тайлов различной конфигурации;
- Проанализировать полученные данные и оценить ожидаемый отклик элементов детектора BBC.

КАЛИБРОВКА FERS-5200

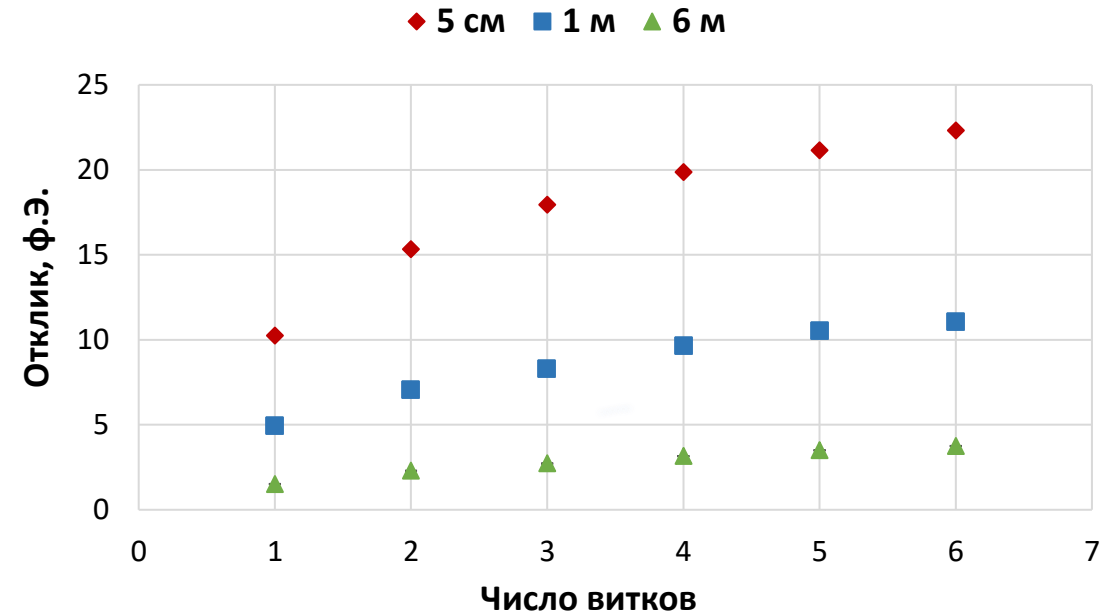
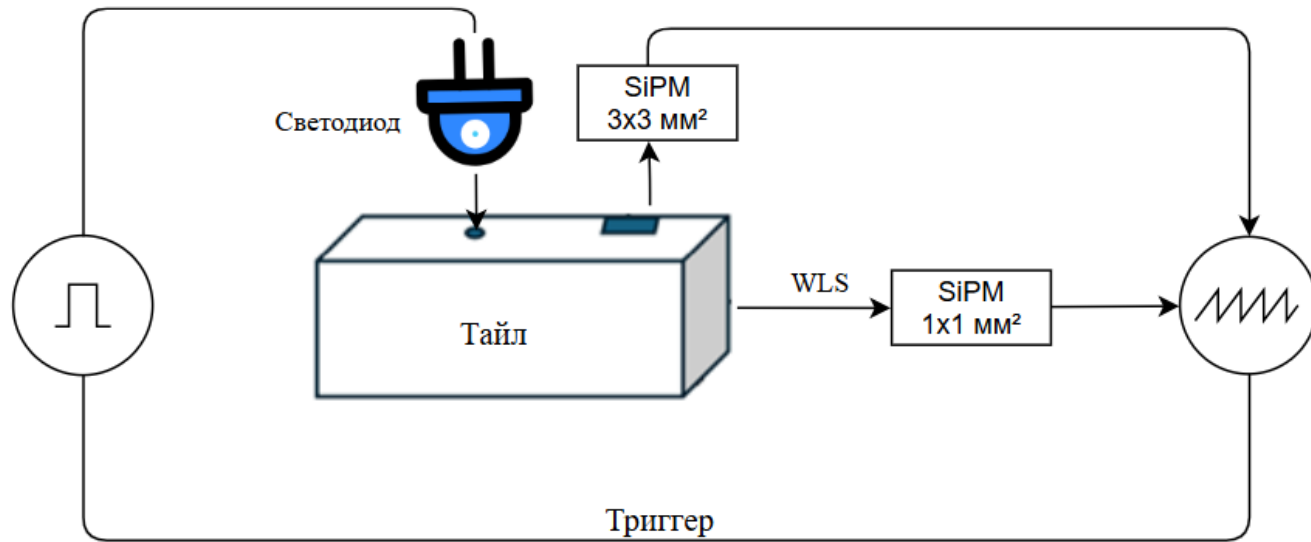
Методика калибровки канала №60 сигналом внешнего генератора:

- Сигнал генератора подается на разделительную емкость;
- Для мониторинга параметров сигнала используется вывод на осциллограф;
- Прошедший через емкость сигнал подается на канал FERS-5200;
- Прошедший каскад усиления сигнал оцифровывается;
- Фиксируется среднее значение амплитуды при известном напряжении.



При максимальном коэффициенте усиления 63 влияние эффектов, вносящих нелинейность, выражено слабо.

ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА ОТ ЧИСЛА ВИТКОВ И ДЛИНЫ WLS-ВОЛОКНА



- В тайле просверлено отверстие, в которое вкладывается оптоволокно;
- При помощи коннектора к волокну крепится светодиод, на который подаются прямоугольные импульсы;
- Конструкция позволяет менять число витков WLS-волокна внутри тайла и длину до SiPM 1x1 мм².

С увеличением числа витков до **3 – 4** отклик увеличивается **в 1,2 – 1,9 раз** относительно малого числа витков (1 – 2 витка). При дальнейшем увеличении числа витков до **5 – 6** рост сигнала становится менее выраженным (**увеличивается в 1,1 – 1,2 раз**). Увеличение оптического пути приводит к снижению уровня сигнала из-за потерь.

МЮОННЫЙ ТЕЛЕСКОП

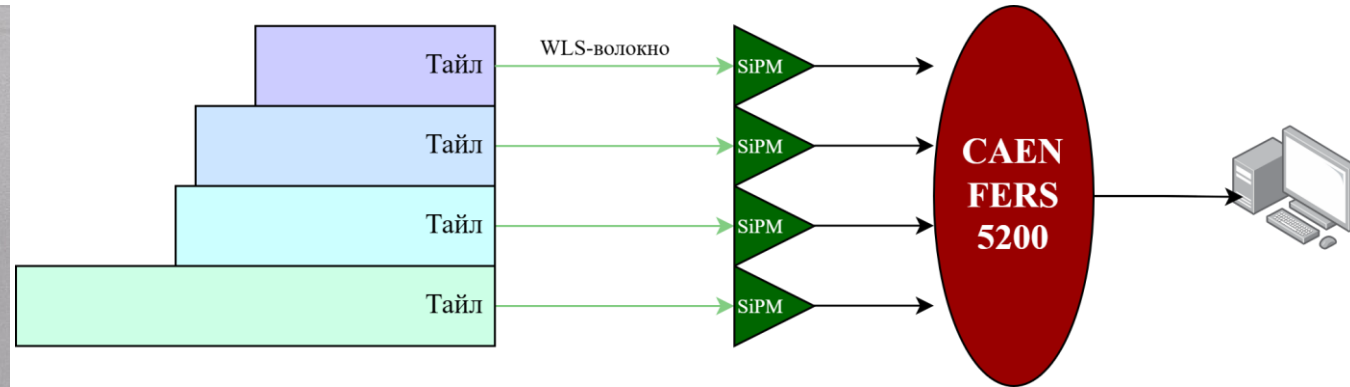
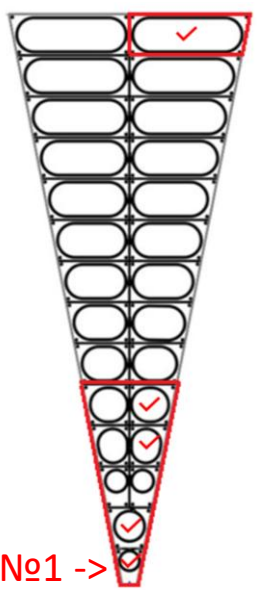
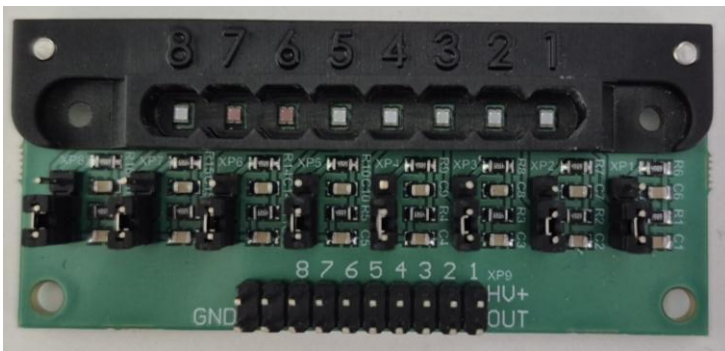


Схема экспериментальной установки

Мюонный телескоп представляет собой несколько сцинтилляторов, использующих схему логических совпадений.

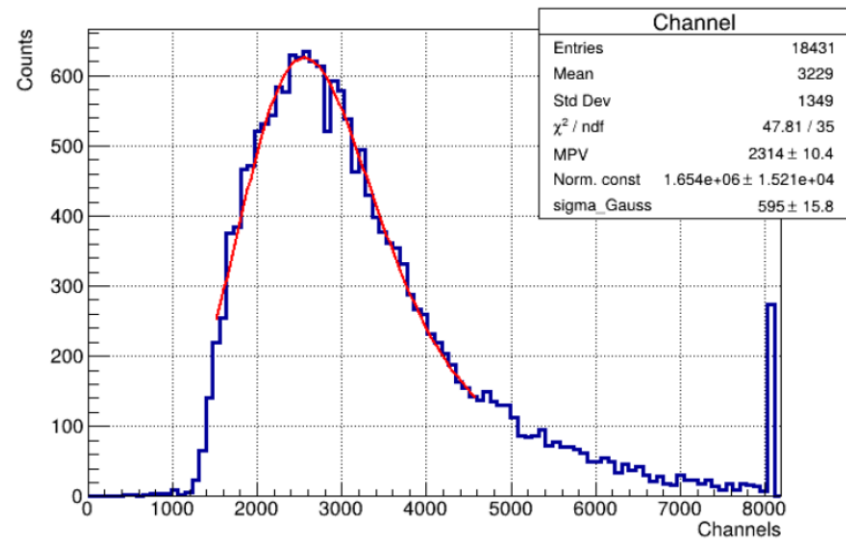
Измерения были разделены на 2 серии:

- В первой использовались тайлы под номером **2, 4, 5 и 14** со свободным концом **WLS-волокна** длиной **4 см**;
- Вторая серия состоял из тайлов под номером **1, 5 и 14** со свободным концом WLS-волокна **132 см**.

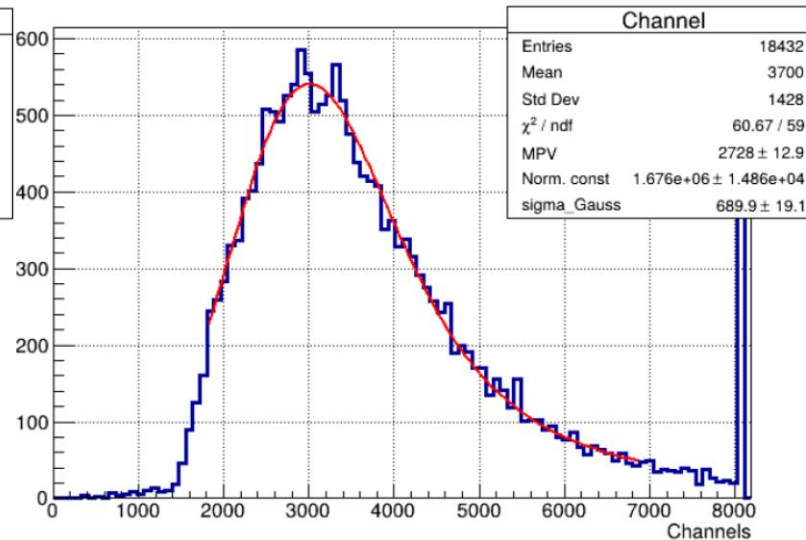


Плата на 8 SiPM
Onsemi fc10035

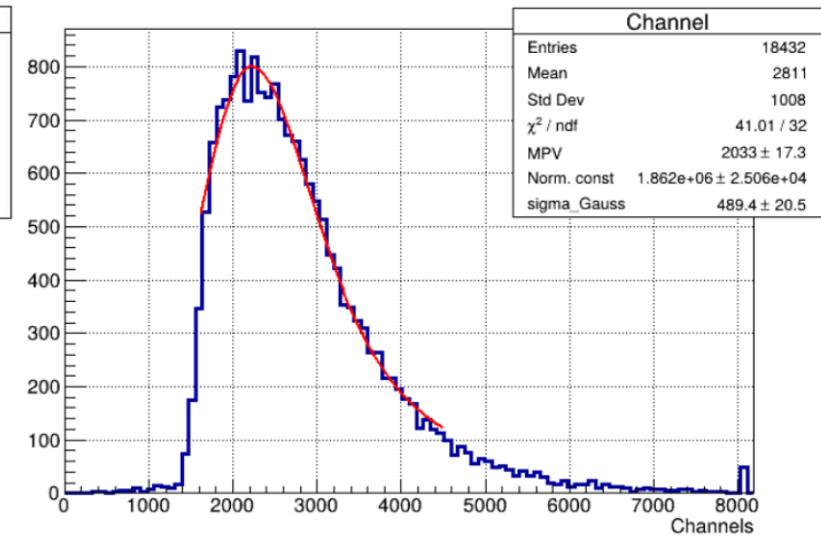
ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ



Тайл №14



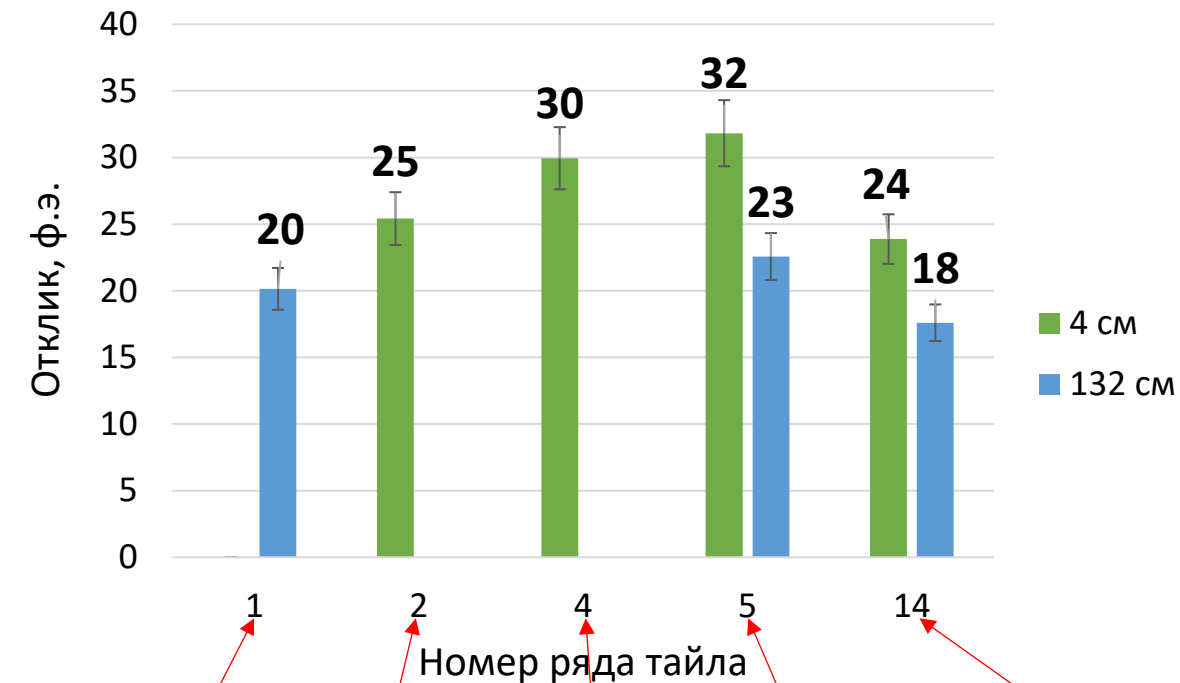
Тайл №5



Тайл №1

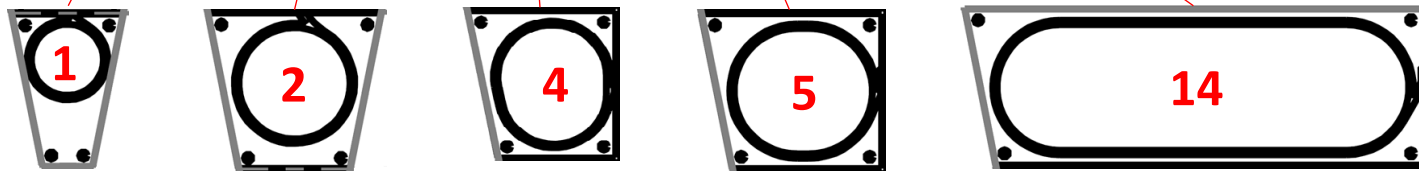
- Аппроксимация сверткой функций Ландау и Гаусса;
- Ширина распределения Ландау (σ_{Landau}) получена из моделирования и зафиксирована в фите;
- Наиболее вероятное значение переведено из каналов АЦП в фотоэлектроны при помощи однофотоэлектронных спектров SiPM.

СВЕТОСБОР ТАЙЛОВ

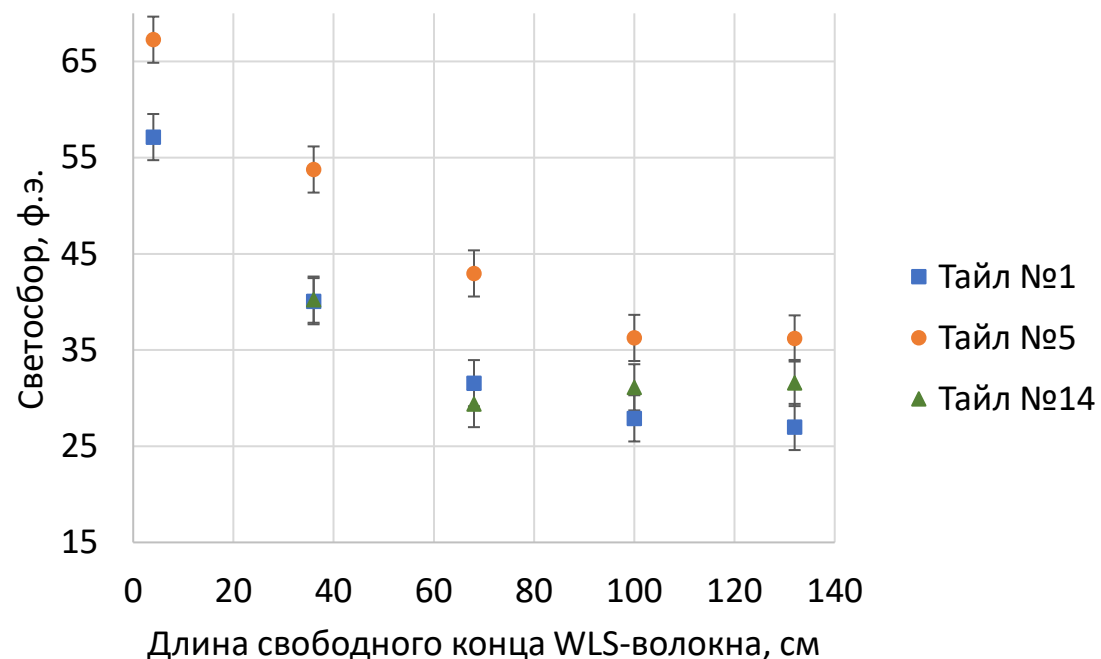


- Шкала АЦП прокалибрована в единицах фотоэлектронов;
- Ошибка соответствует статистическому разбросу откликов однотипных тайлов.

При увеличении свободного конца WLS-волокна с 4 см до 132 см светосбор тайла №5 снижается на 30%, а светосбор тайла №14 на 25%.

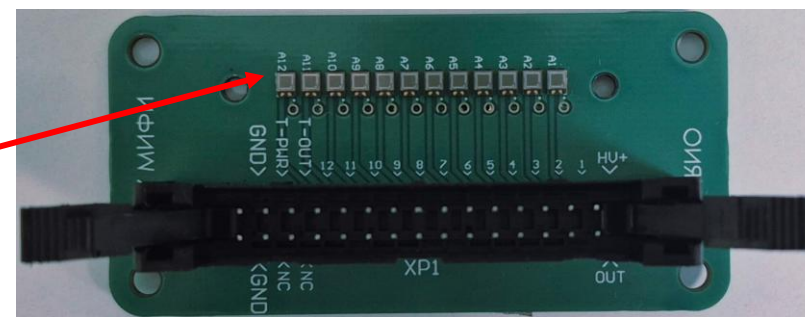
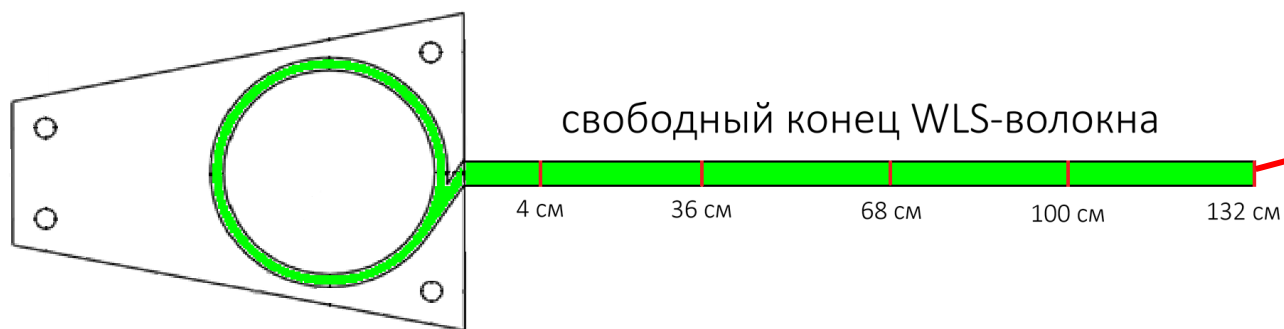


ПОТЕРИ НА ДЛИНЕ



- Длина свободного конца WLS-волокна уменьшалась с 132 см до 4 см с шагом 32 см;
- Для каждой длины проводились измерения амплитудного спектра потерь энергии атмосферных мюонов;
- Точка в 4 см для тайла №14 отсутствует из-за повреждения WLS-волокна.

Наилучший отклик достигается в конфигурации с минимальной длиной WLS-волокна: отклик тайла **№1** возрастает на **53%**, отклик тайла **№5** возрастает на **46%**, отклик тайла **№14** возрастает на **7%**.



Плата Hamamatsu
(SiPM S14160-1315 PS)

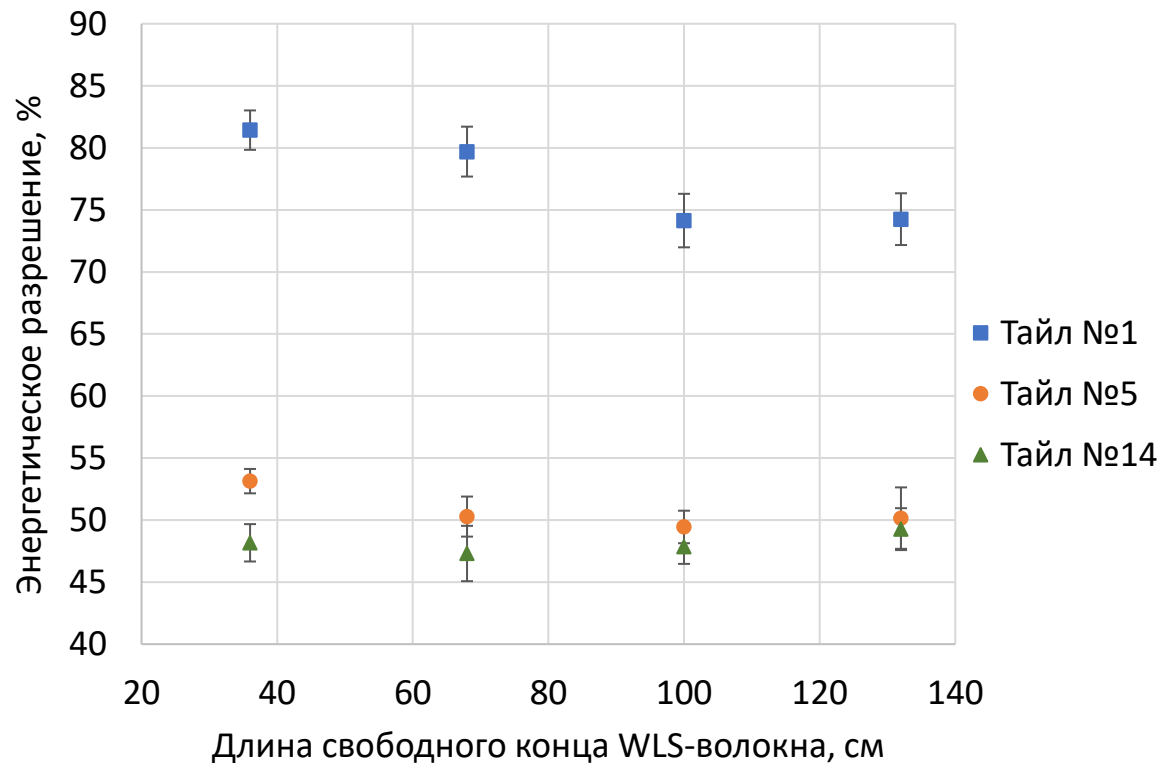
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ

Энергетическое разрешение системы
рассчитывалось как:

$$\sigma_E = \frac{2,35 \cdot \sigma_{Gauss}}{MPV}$$

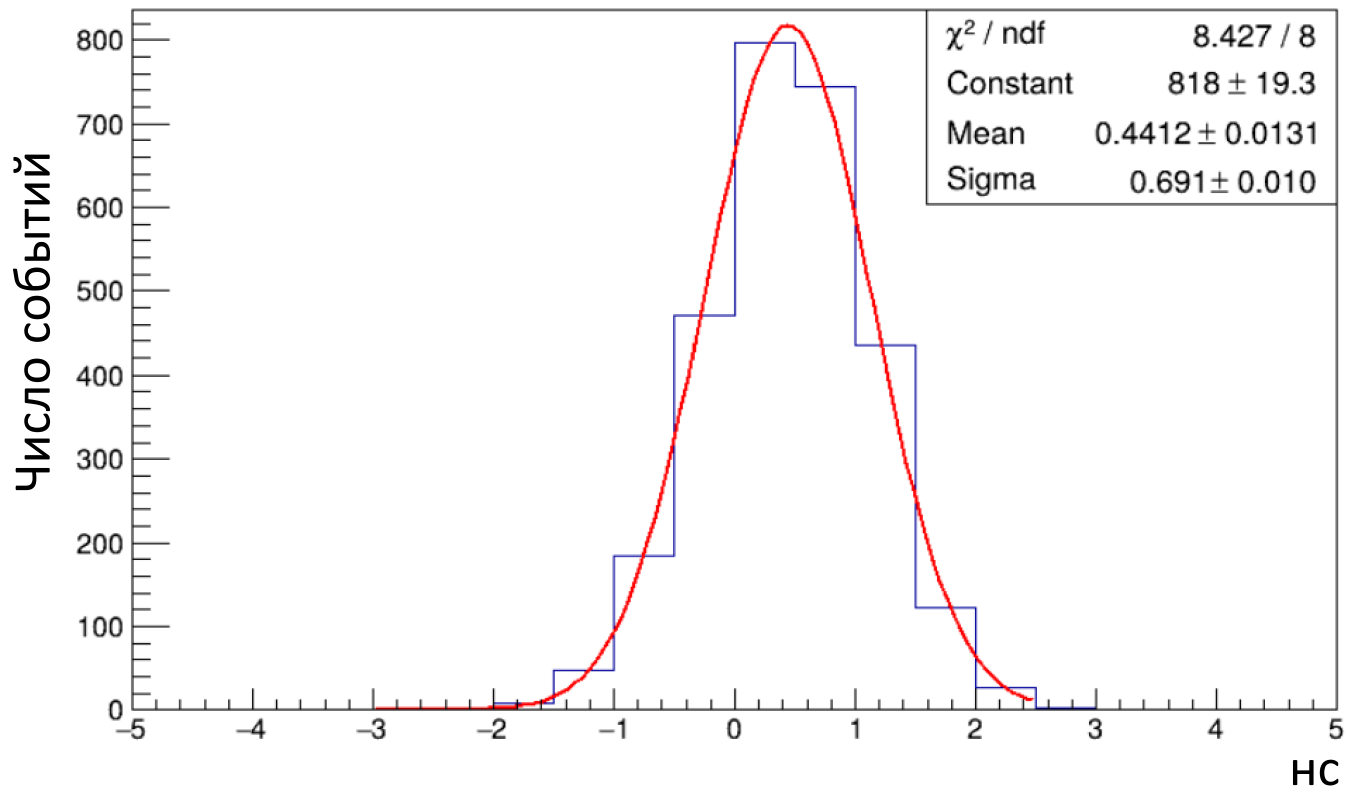
Вклад длины WLS-волокна в разрешение
выражен слабо.

Энергетическое разрешение для **тайла №1**
составляет **$(71 \pm 4)\%$** , для **тайла №5**
 $(51 \pm 2)\%$, и для **тайла №14** **$(48 \pm 1)\%$** .



ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ

Разность времени прихода сигнала (ToA) для двух каналов



Временное разрешение системы определялось через дисперсию разности времени прихода сигналов между двумя каналами как:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{\Delta t}}{\sqrt{2}}$$

Усредненное значение временного разрешения системы **$(1,78 \pm 0,12)$ нс.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

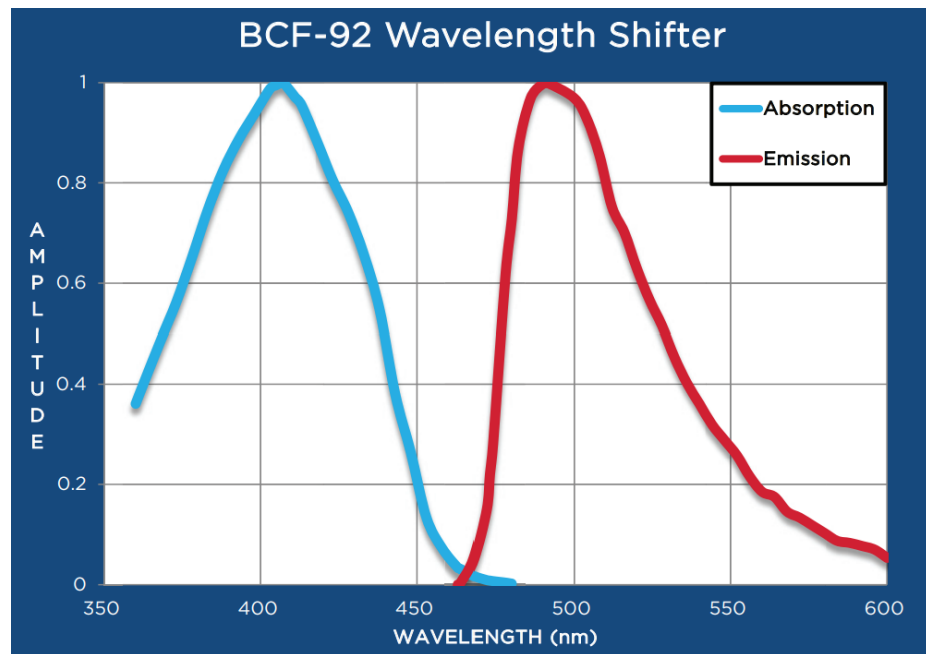
- По результатам калибровки определена линейная область работы предусилителя;
- При увеличении числа витков до 3 – 4 светосбор увеличивается в **1,9 раз** относительно 1 – 2 витков. При дальнейшем увеличении числа витков до 5 – 6 рост становится менее выраженным и увеличивается в **1,2 раз**;
- Максимальный отклик с тайлов №1, 4, 5 и 14 на плате с SiPM Onsemi составляет **25, 30, 32 и 24 ф.э.** соответственно. Увеличение длины WLS-волокна приводит к уменьшению отклика на **30%**;
- На плате Hamamatsu уменьшение длины WLS-волокна приводит к увеличению отклика тайла №1 на **53%**, отклик тайла №5 на **46%**;
- Энергетическое разрешение для тайла №1 составляет **(71±4)%**, для тайла №5 **(51±2)%**, и для тайла №14 **(48±1)%**;
- Усредненное временное разрешение системы: **(1,78±0,12) нс.**

Оптимальные параметры конфигурации тайлов: 3 – 4 витка WLS-волокна внутри сцинтиллятора и минимально возможная свободная длина оптоволокна. Полученные результаты подтверждают и обосновывают правильность выбора конфигурации элементов детектора BBC SPD.

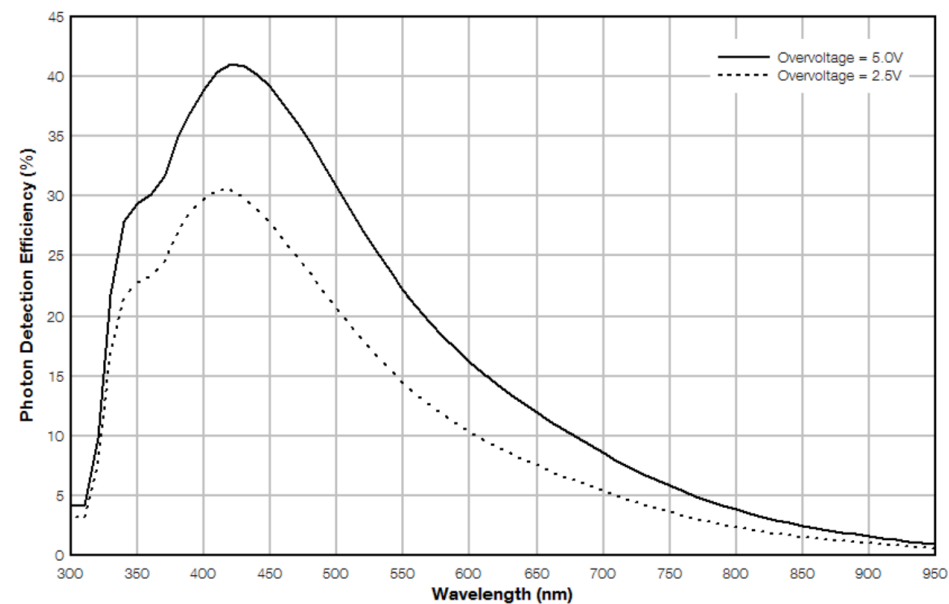
СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

BACK UP

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКНА И PDE SiPM



Спектр поглощения и излучения WLS-волокна марки SG BCF-92

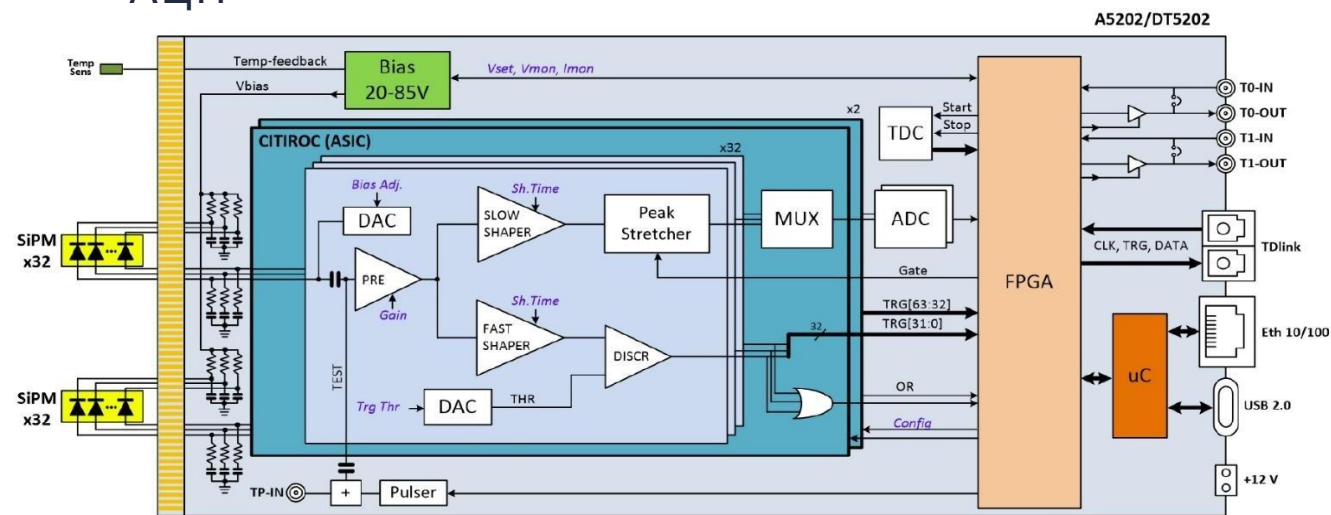


Эффективность захвата фотонов для SiPM Onsemi C-Series

СХЕМА КАНАЛА FERS-5200

Каждый канал CAEN FERS-5200 состоит из:

- Двух каскадов усиления: low gain (LG) и high gain (HG)
- Быстрого формирователя (fast shaper)
- Медленного формирователя (slow shaper)
- Пикового детектора
- АЦП



Упрощенная схема канала

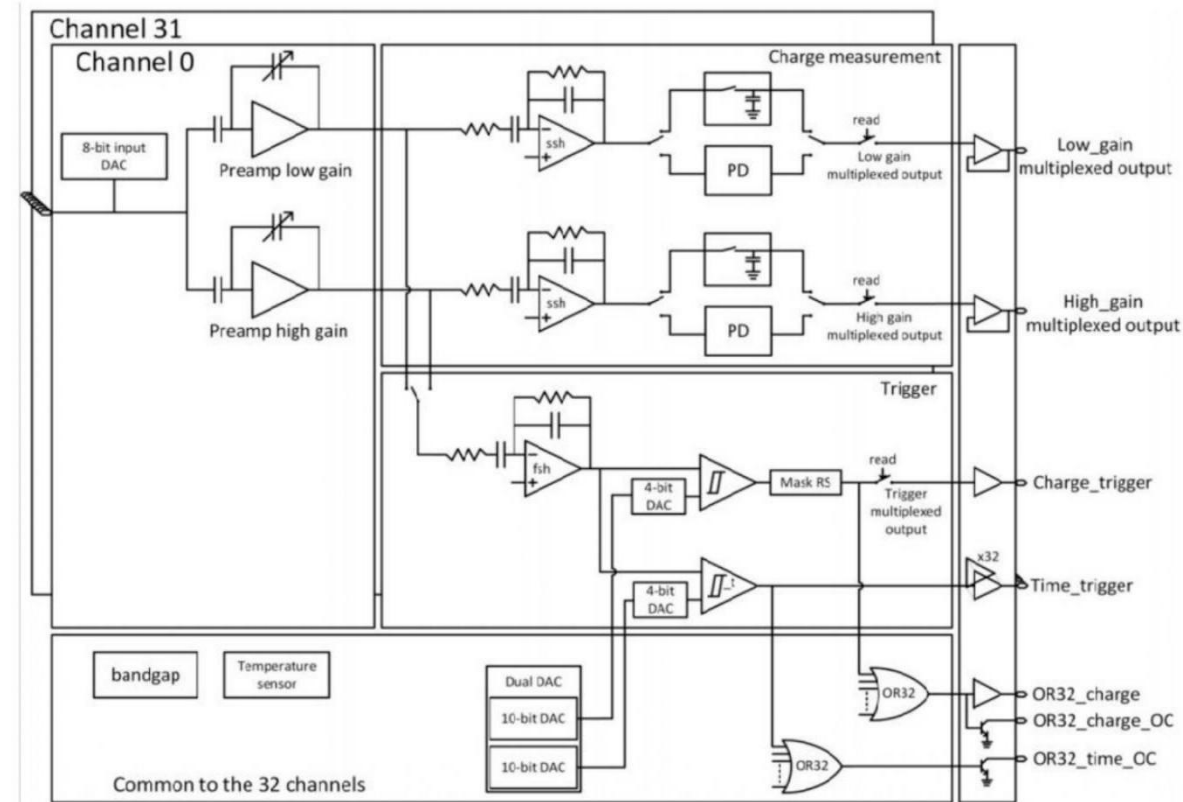
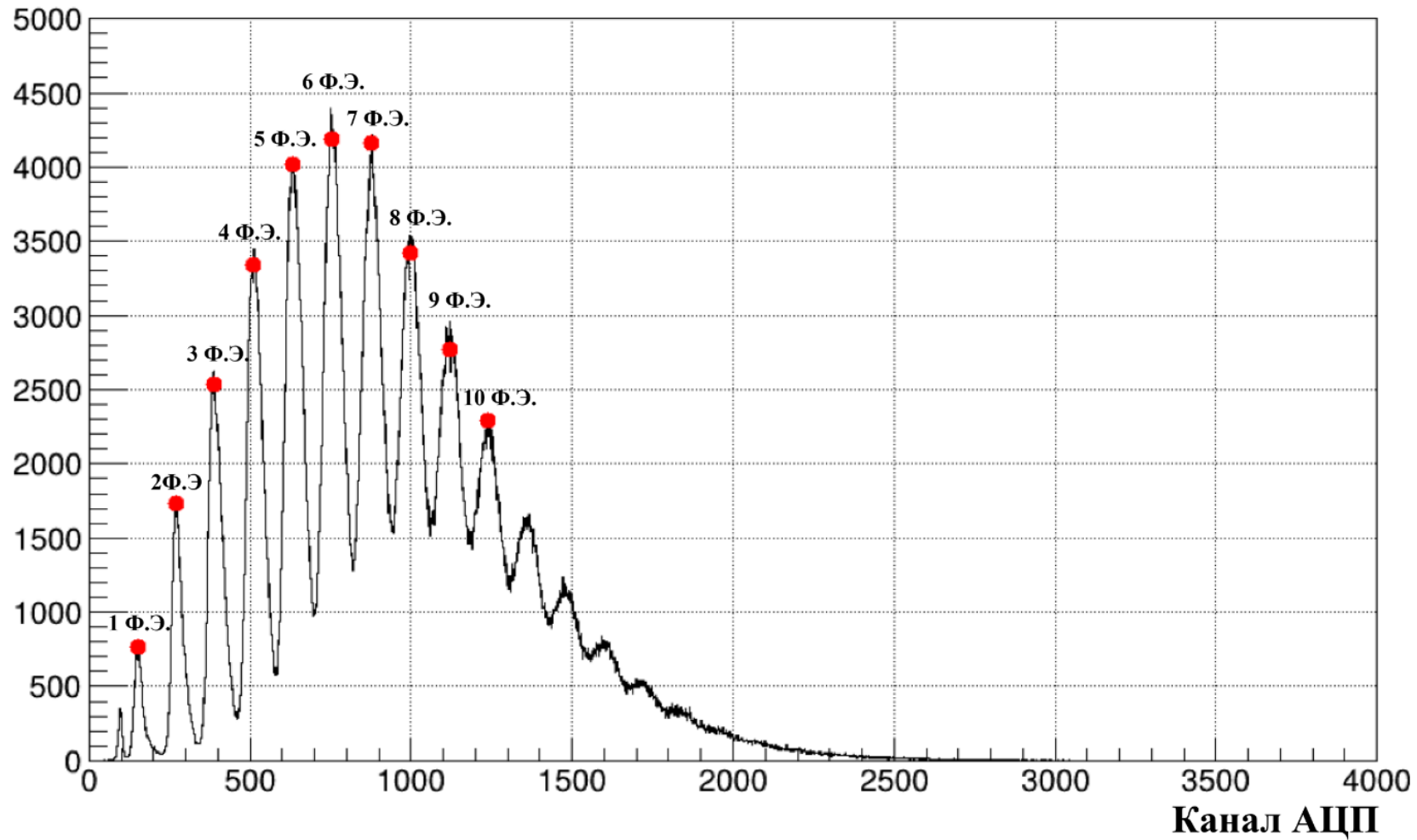


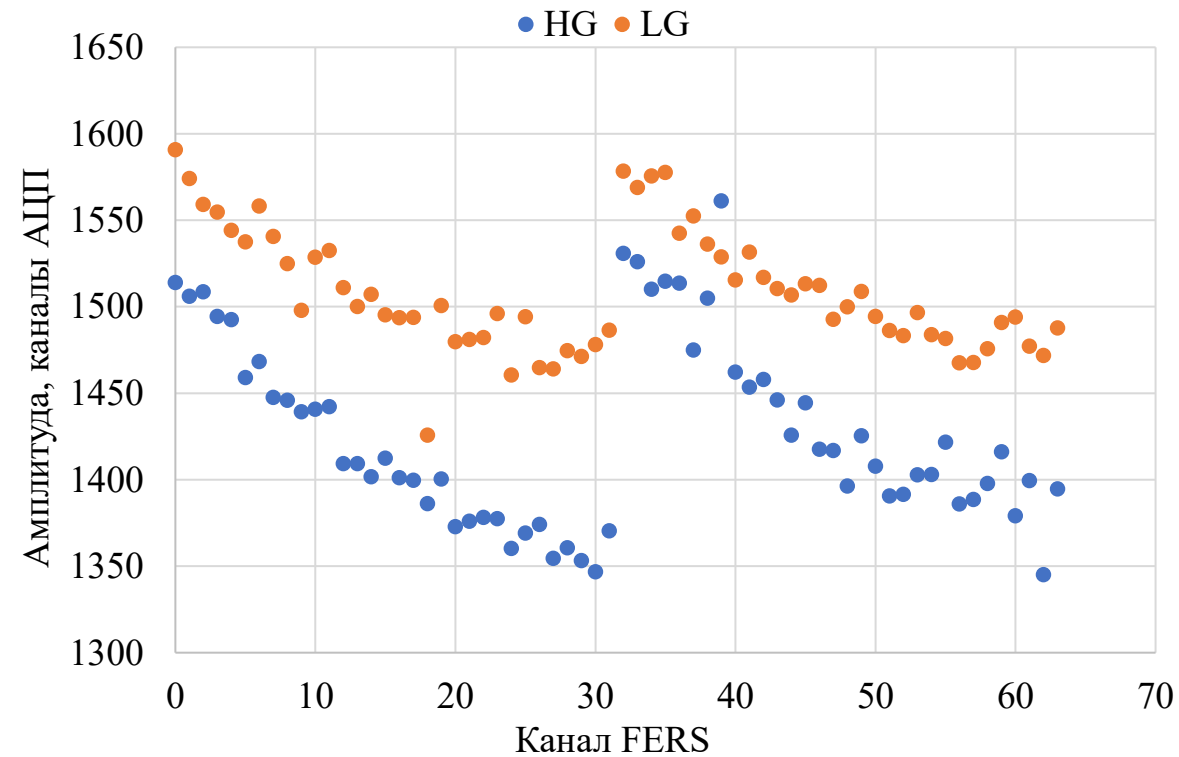
Схема чипа Citiroc-1A

ОДНОФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ СИГНАЛ SiPM

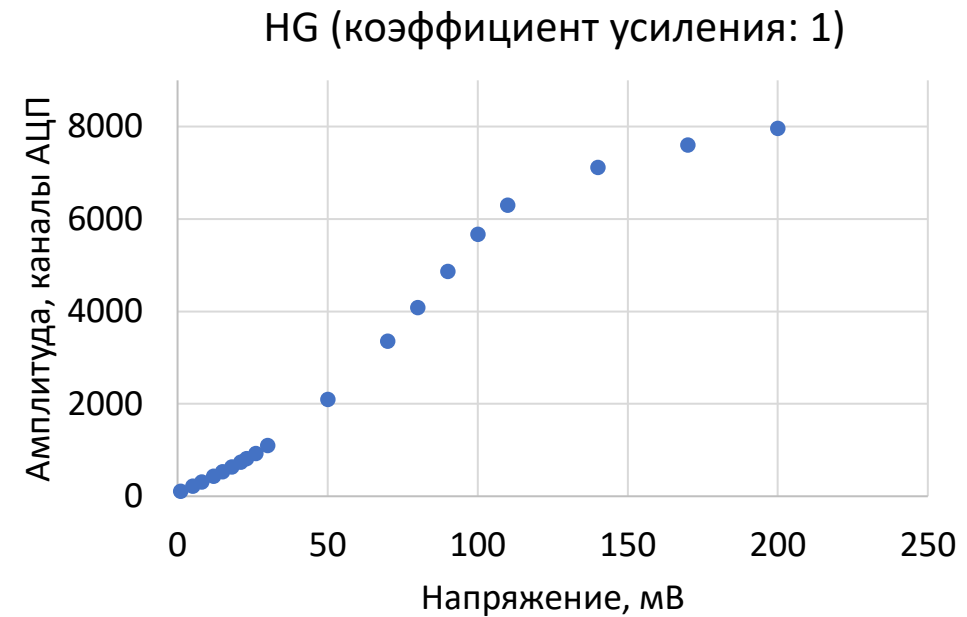
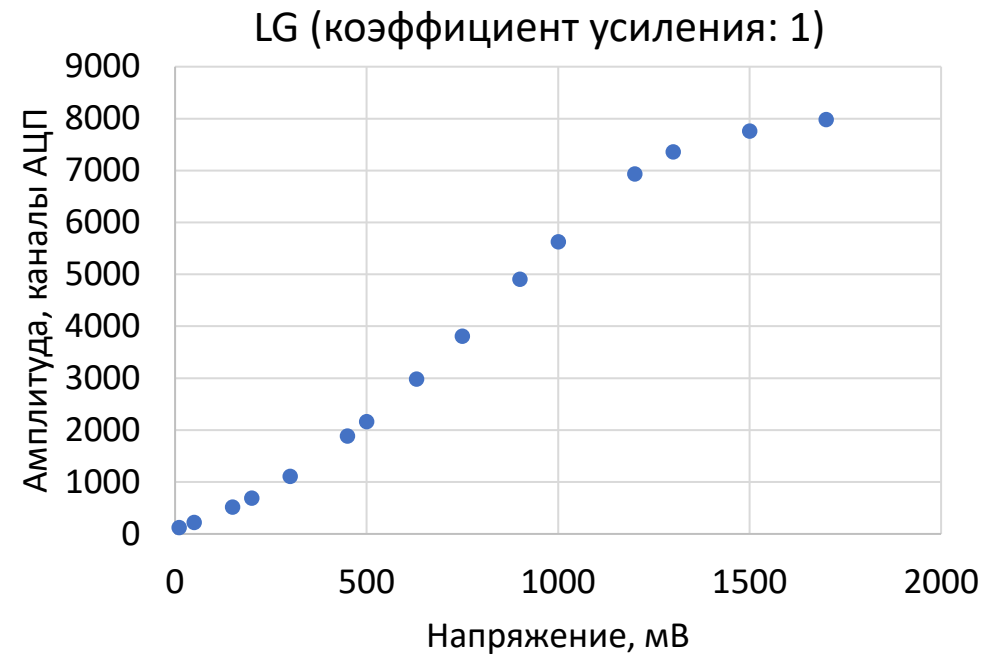


КАЛИБРОВКА СИГНАЛОМ ВНУТРЕННЕГО ГЕНЕРАТОРА

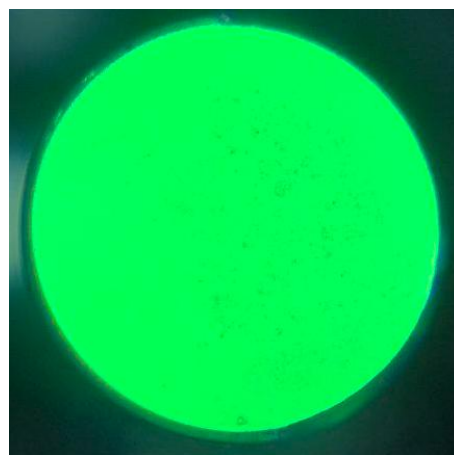
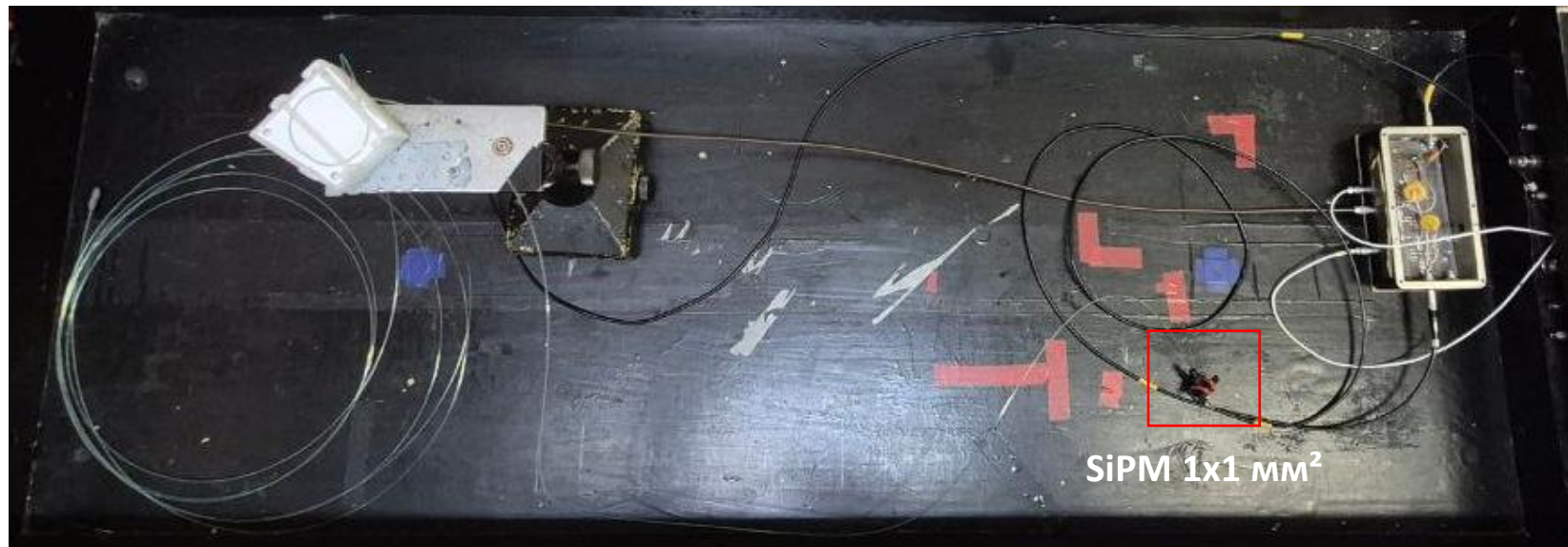
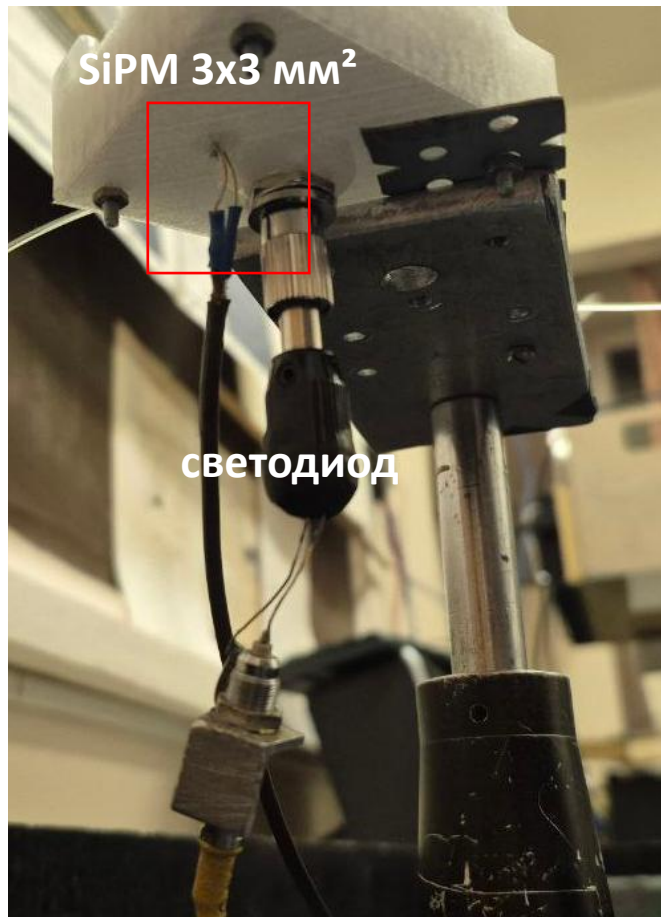
Амплитуда сигнала при калибровке канала
импульсом от внутреннего генератора



КАЛИБРОВКА КАНАЛА FERS-5200 (без усиления)

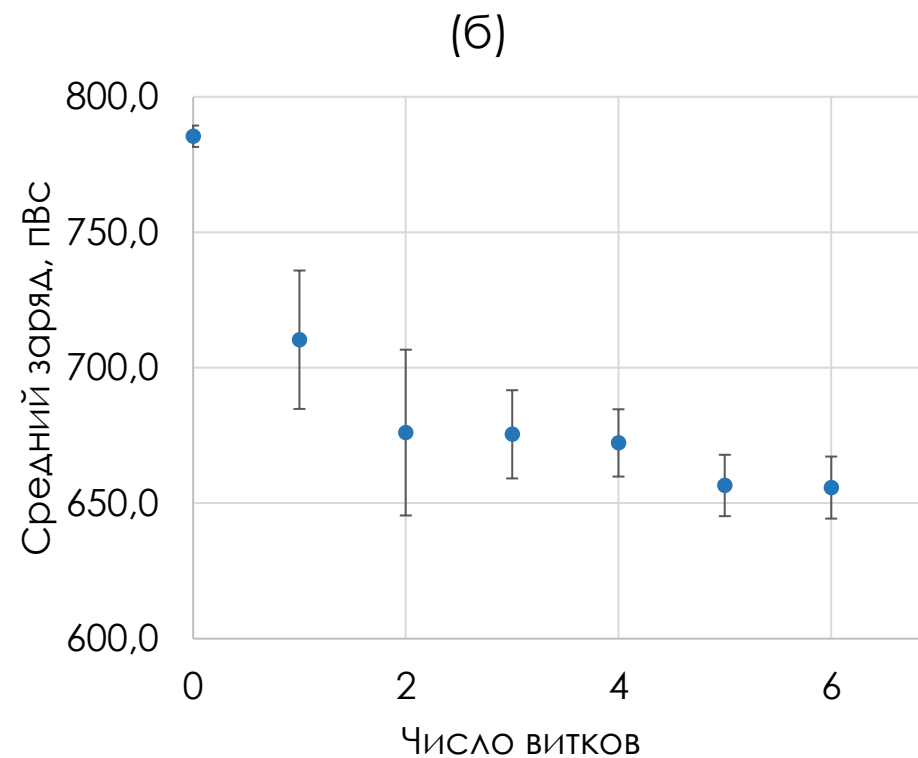
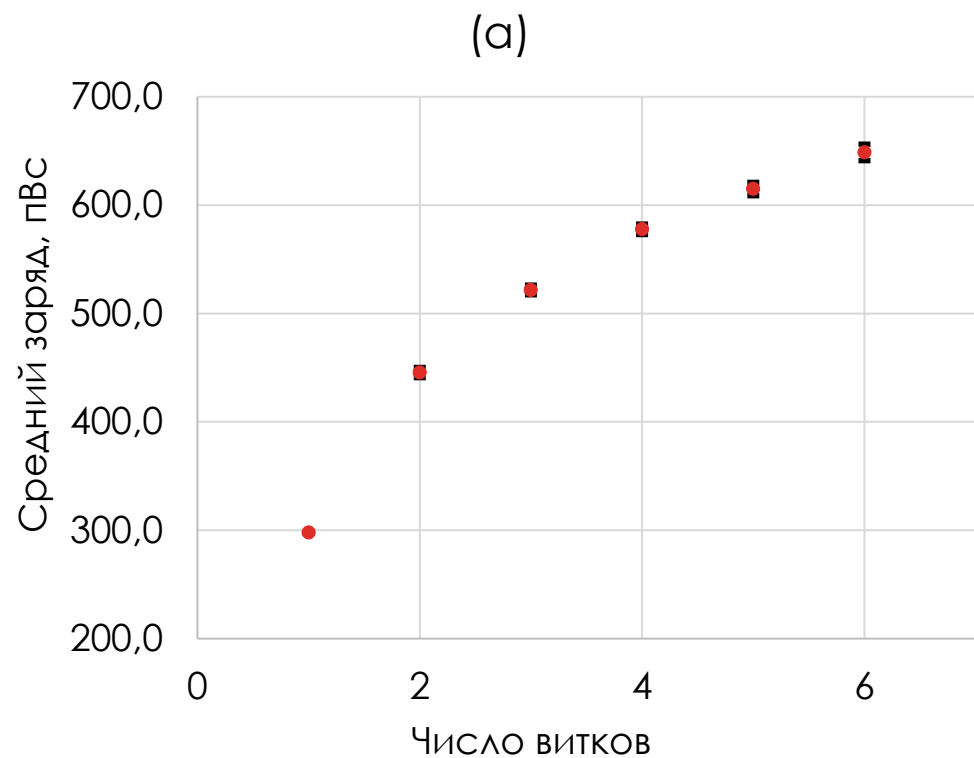


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА



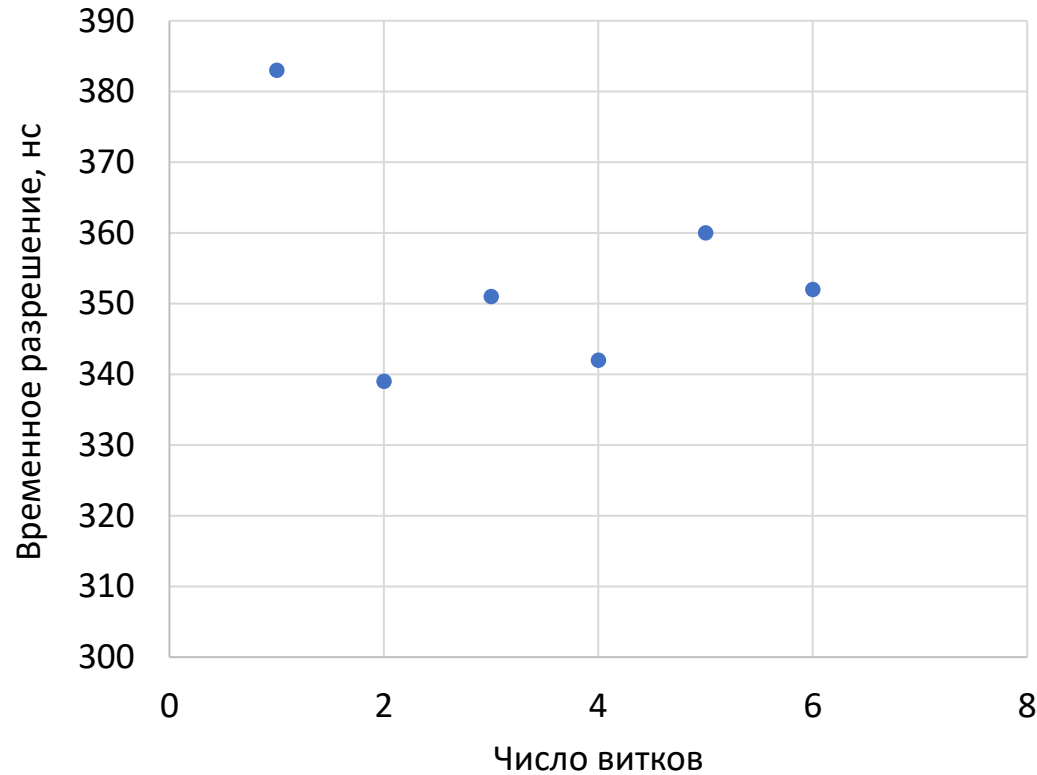
Полировка торцевой
стороны WLS

Отклик SiPM 1x1 мм² и 3x3 мм²



Отклик при различном числе витков для основного (а) и
референсного (б) сигнала

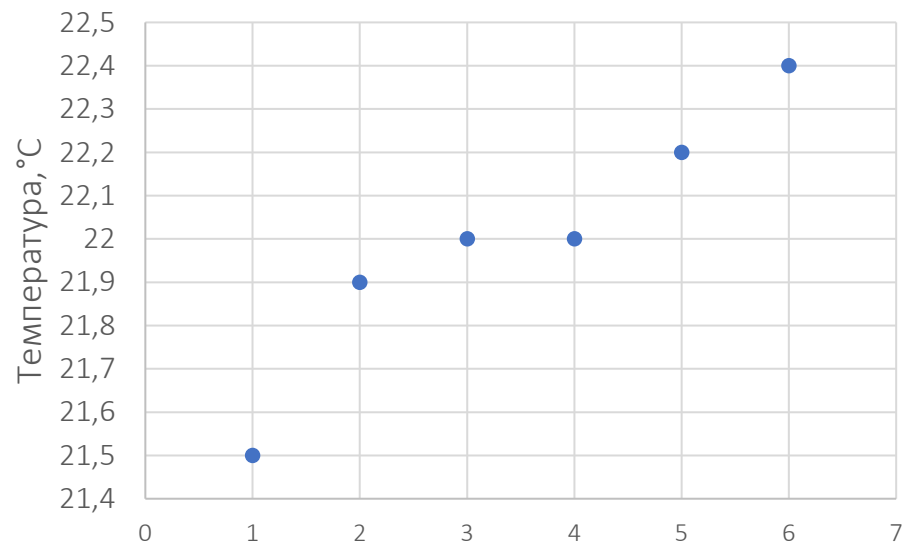
ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ТЕСТОВОГО ТАЙЛА



Временное разрешение определялось как стандартное отклонение распределения разности между сигналом и внешним триггером. Временная привязка дискриминатора осуществлялась методом следящего порога.

Оценка среднего временного разрешения:
 $(355 \pm 3) \text{ пс}$

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ SiPM



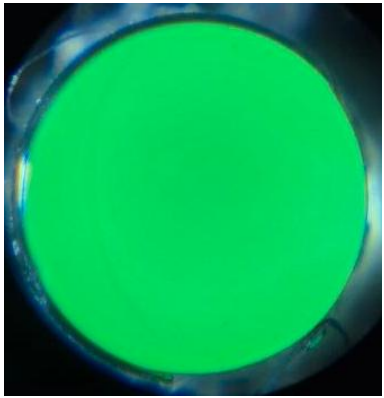
Изменение температуры в черном ящике

За температуру SiPM бралась температура в черном ящике.
Согласно справочной документации температурная зависимость отклика SiPM составляет 0,8% при изменении температуры на 1°C.

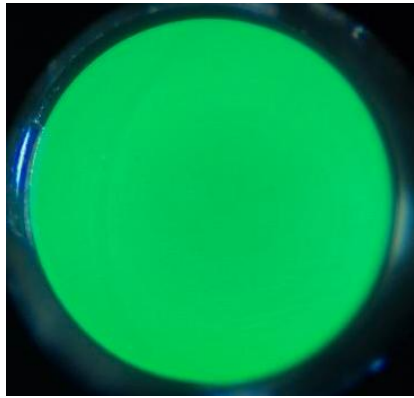
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАЙЛОВ РАЗЛИЧНЫХ РЯДОВ

Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 4 см			Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 132 см		
Номер ряда	Радиус скругления, см	Общая длина волокна, см	Номер ряда	Радиус скругления, см	Общая длина волокна, см
2	2,15	46	1	1,43	159
4	1,94	47,5	5	2,25	181,5
5	2,25	53,5	14	2,25	240
14	2,25	112			

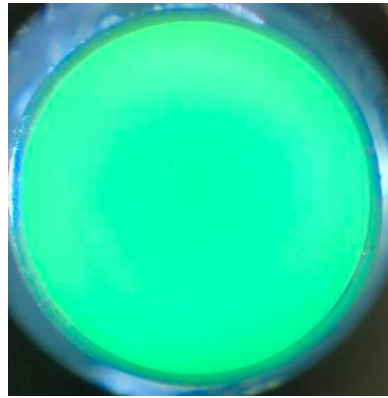
ПОЛИРОВКА ТОРЦОВ WLS-ВОЛОКНА



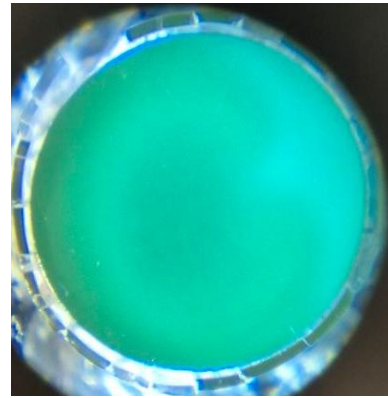
Тайл 14 (132 см)



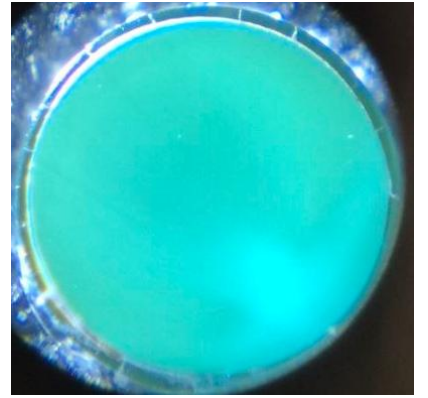
Тайл 5 (132 см)



Тайл 1 (132 см)



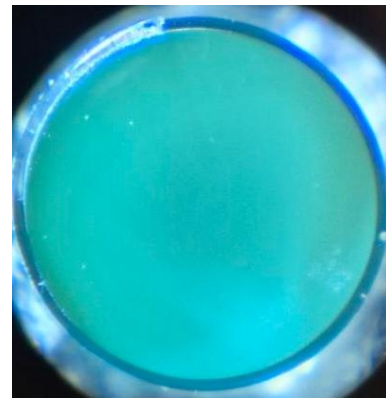
Тайл 5 (4 см)



Тайл 14 (4 см)



Тайл 2 (4 см)



Тайл 4 (4 см)

СОСТАВ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

Состав сцинтиллятора:

- 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%.

Световыход, % 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