

**Выпускная квалификационная работа магистра**

# **Фотонные детекторы ядерных излучений для прикладных задач**

**Студент: Н. С. Бойко**

**Научный руководитель: д. ф.-м. н., профессор**

**М. Д. Скорохватов**

Москва, 2023

# Цель и задачи работы

## Цель проекта

Разработка и исследование сцинтилляционных детекторов ядерных излучений на основе Si-ФЭУ для прикладных задач в областях нейтринной физики и ядерной медицины.

## Цель работы

Определить характеристики опытного образца детектора для мониторинга реакторов. Выяснить причины неоднородности отклика и энергетического разрешения 32-канального макета ПЭТ.

## Задачи

1. Оценить неоднородность отклика и энергетического разрешения детекторов в многоканальной системе макета ПЭТ
  2. Определить зависимость усиления Si-ФЭУ от температуры.
1. Оценить неоднородность отклика модуля при помощи мюонного телескопа и годоскопа УРАГАН (НЕВОД);

# Мотивация

Развитие в России перспективных плавучих атомных электростанций (ПАЭС) требует создания детекторов мониторинга работы реактора для обеспечения гарантий МАГАТЭ в соответствии с Договором о нераспространении ядерного оружия.

Позитрон-эмиссионная томография, совмещенная с МРТ, на основе новых сцинтилляционных кристаллов GAGG(Ce) в композиции с Si-ФЭУ - перспективная технология для исследований фармакокинетики препаратов.



# Макет ПЭТ

Характерные размеры:

внешний радиус - 160 мм,  
внутренний радиус - 90 мм,  
толщина - 10 мм.

Всего детекторов - 32 шт, так как анализатор рассчитан на соответственное количество Si-ФЭУ

- Неорганические сцинтилляторы GAGG(Ce), 3x3x20 мм
- SiPM Onsemi FC-30035
- Кольцо для позиционирования детекторов
- Кольцо для передней электроники (платы питания)
- Анализатор Petiroc2A

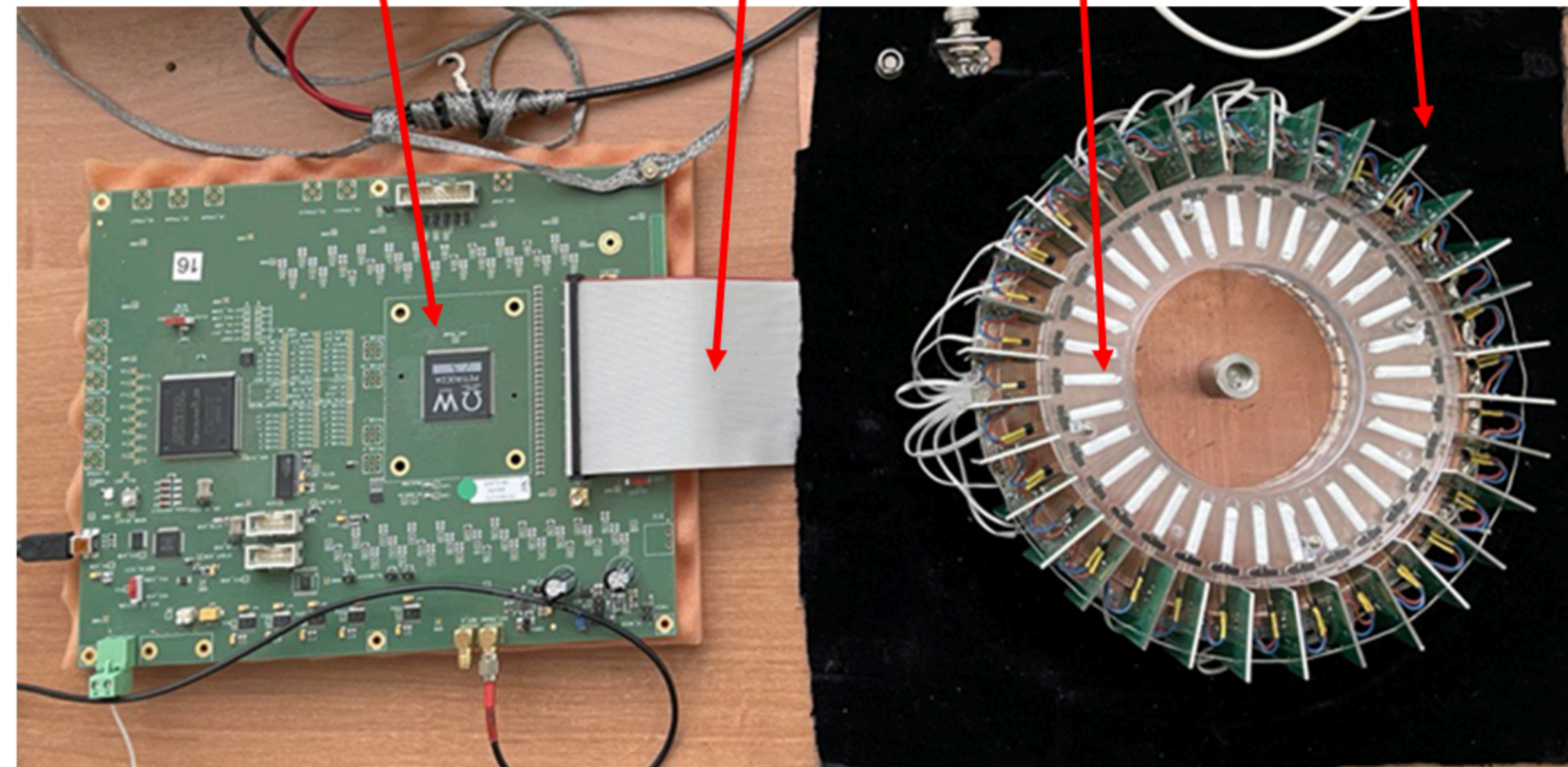


Petiroc2A

Шлейф  
(передача аналоговых сигналов)

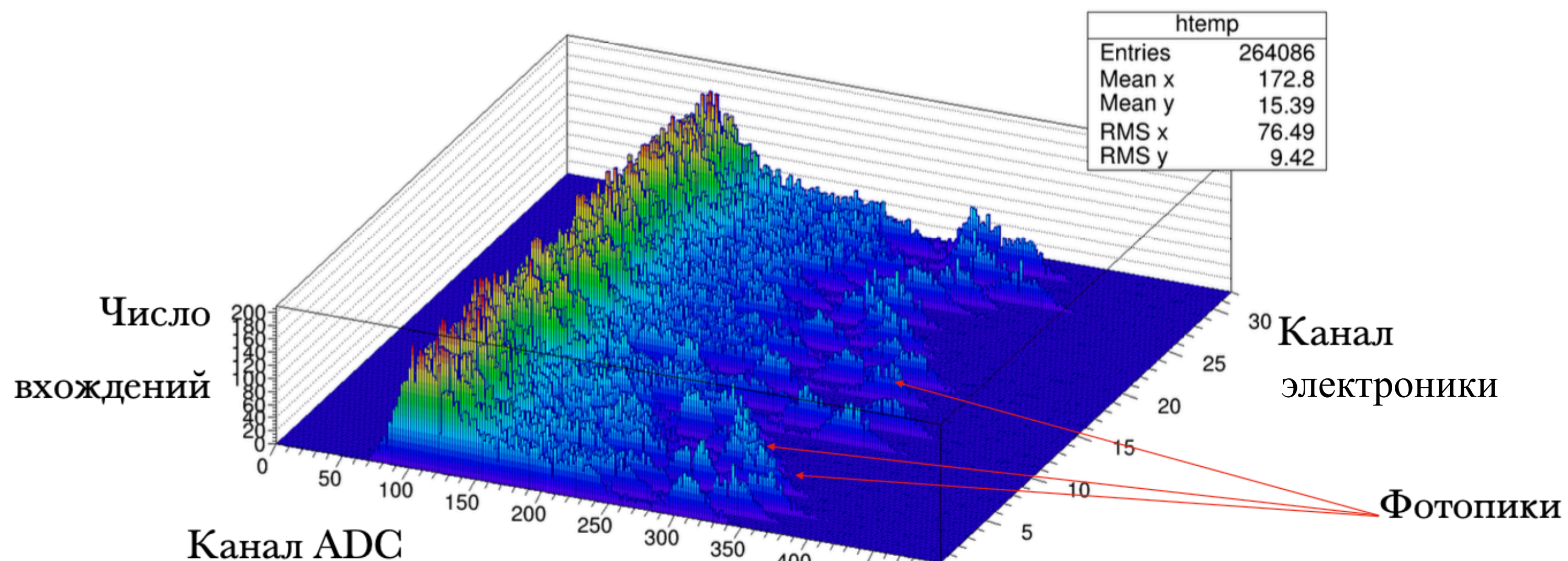
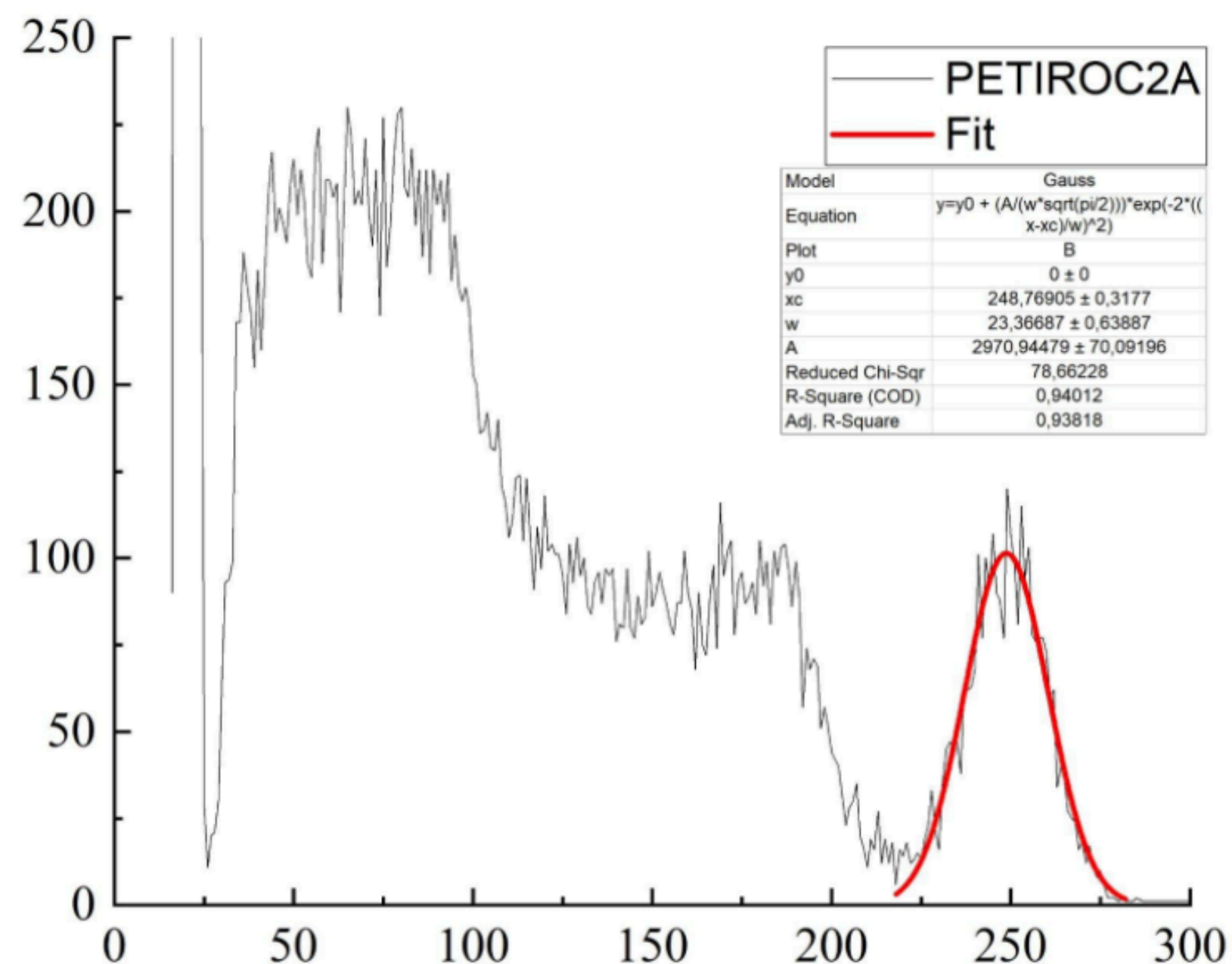
Детекторы

Платы питания





# Энергетическое разрешение

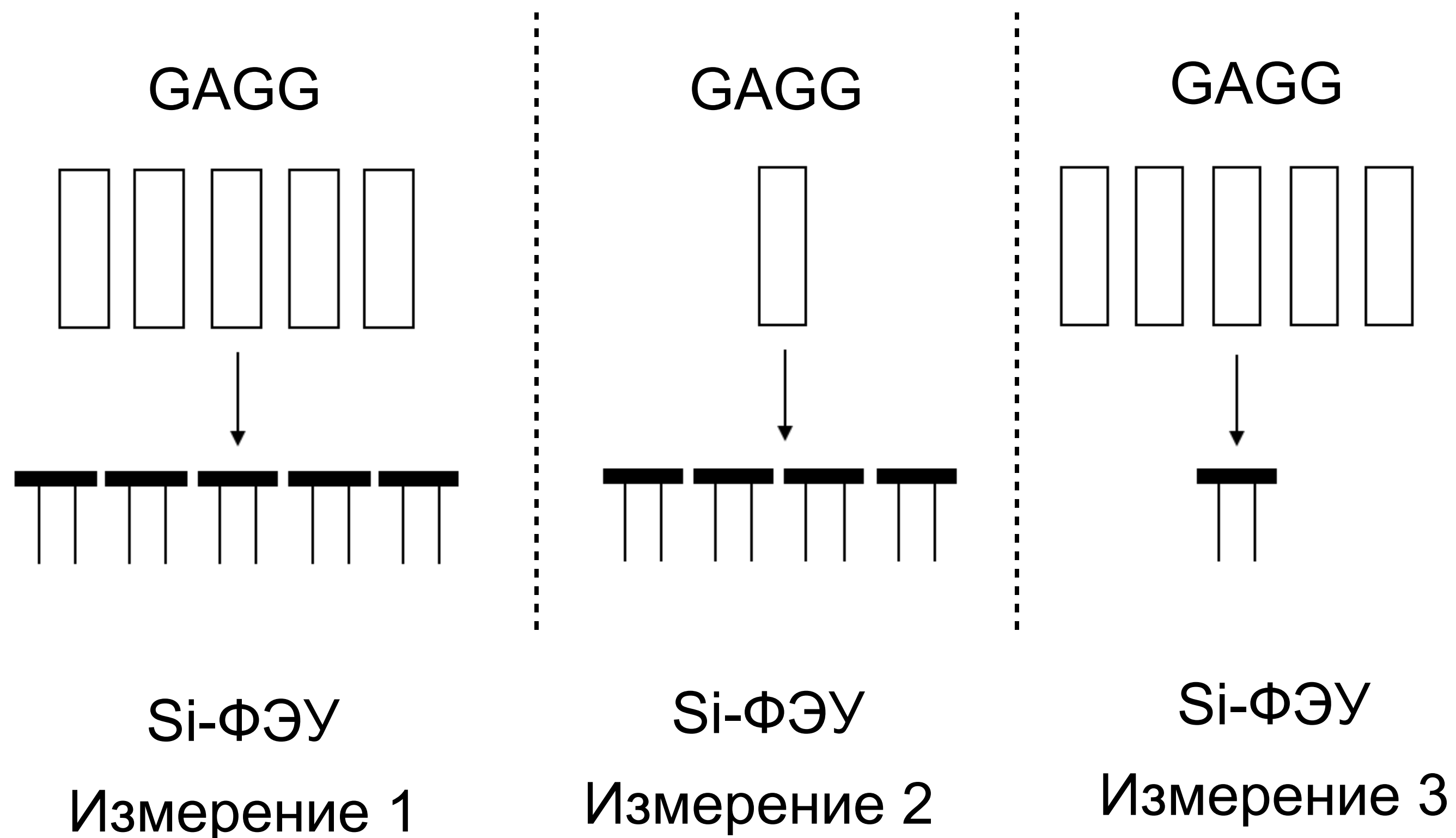


Данные собирались для всех 32 каналов одновременно, источник Cs-137 помещался в центр кольца.

**Энергетическое разрешение - 15%,**

**Неоднородность - 23%**

# Поиск неоднородности



Стандартное отклонение.  
Амплитуда

5 GAGG + 5 SiPM	0,07
1 GAGG + 4 SiPM	0,04
5 GAGG + 1 SiPM	0,09

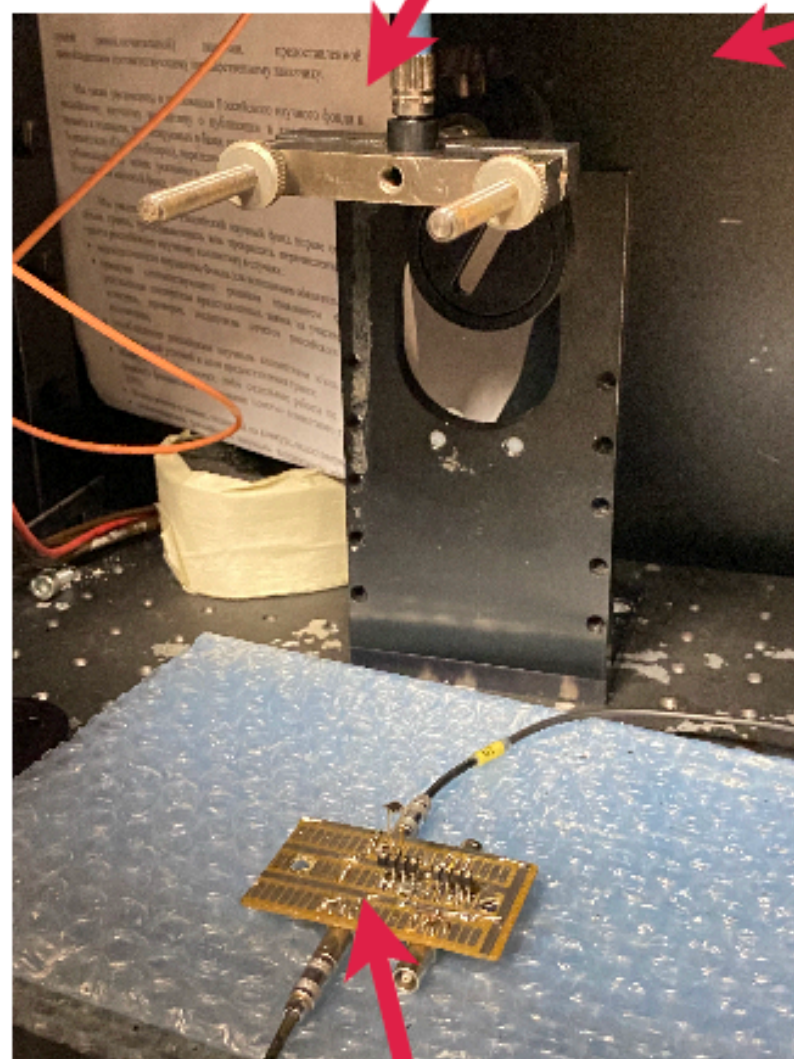
Стандартное отклонение.  
Разрешение

5 GAGG + 5 SiPM	0,004
1 GAGG + 5 SiPM	0,002
5 GAGG + 1 SiPM	0,009



# Зависимость усиления от температуры

Лазер (Picosecond optical pulse generator PLS-405-660)

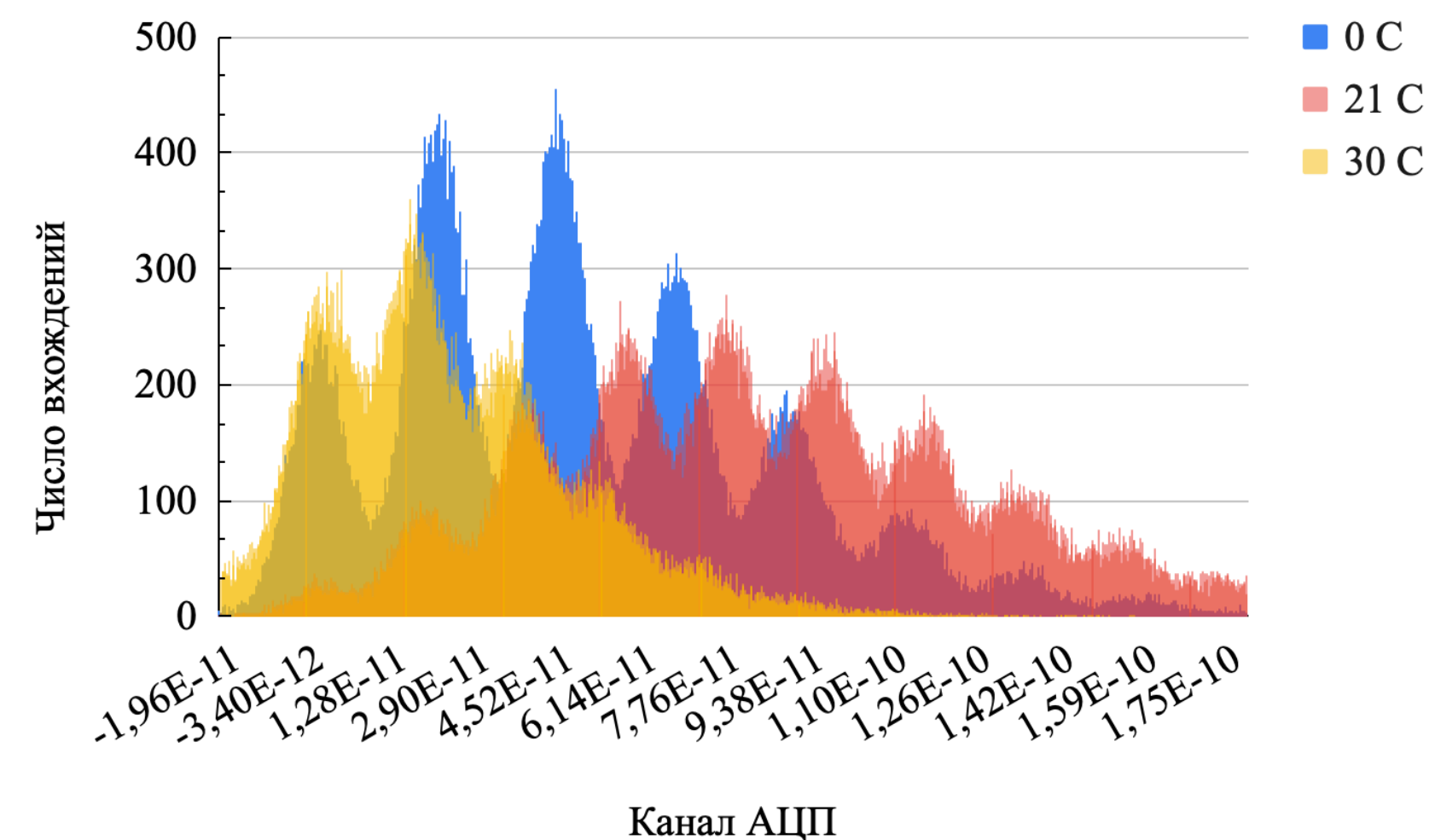


Si-ФЭУ (Onset FC-30035)



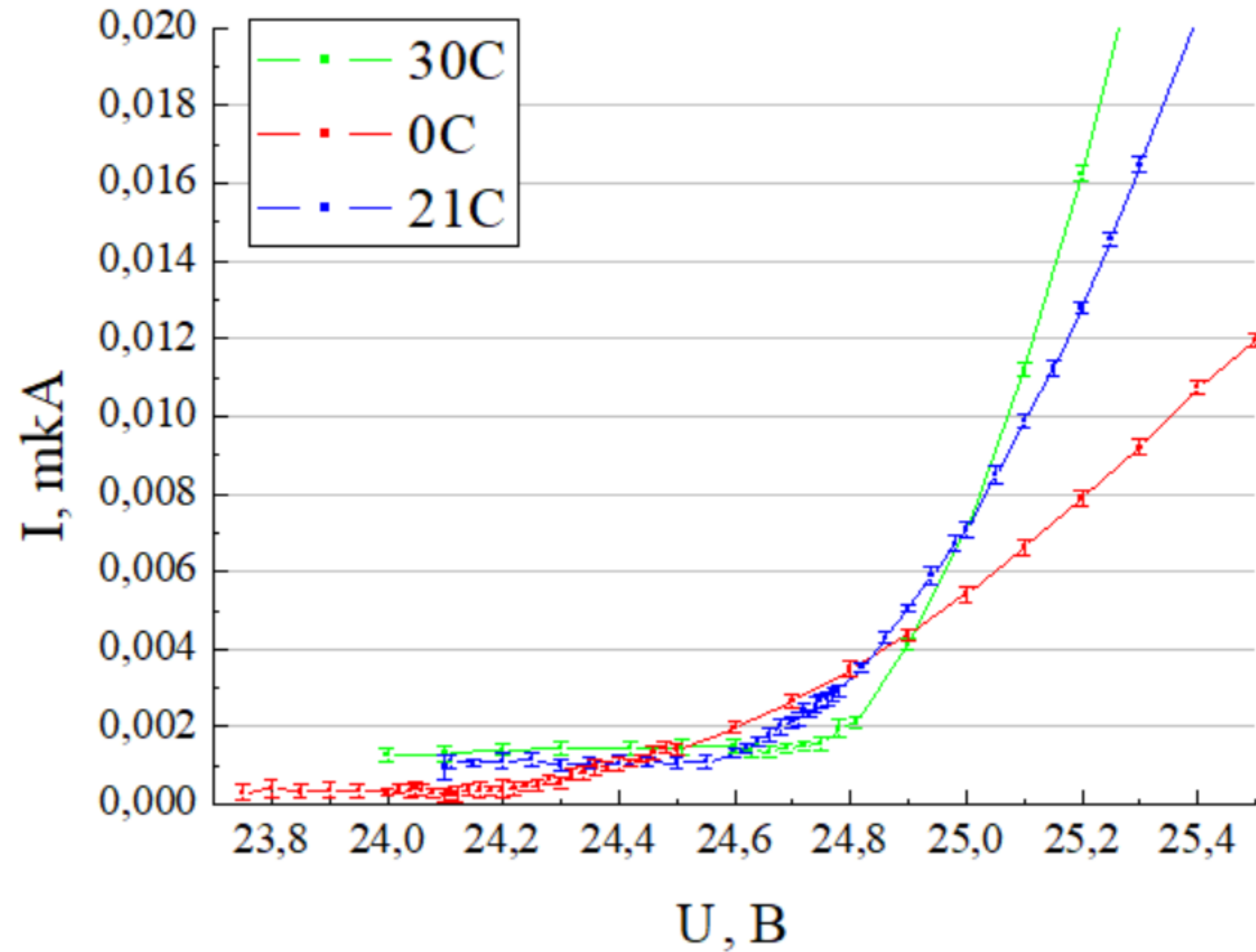
Для контроля и подстройки температуры использовалась термокамера ESPEC TAVAI

Одноэлектронные спектры





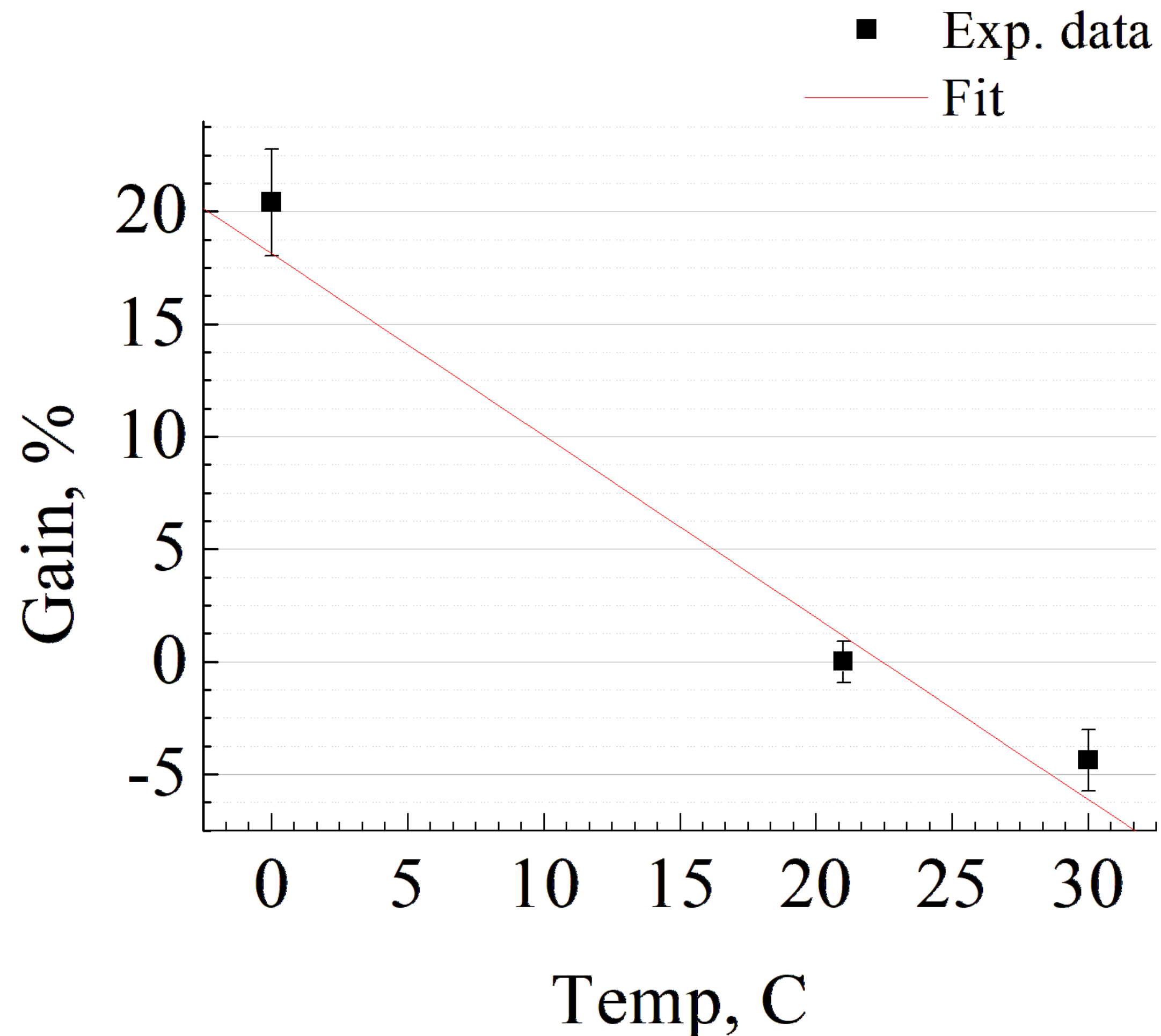
# Напряжение пробоя при разных температурах



Температура, C	$U_{br}$ , B	$U_{err}$ , B
0	24,24	0,13
21	24,62	0,04
30	24,76	0,07



# Зависимость усиления от температуры



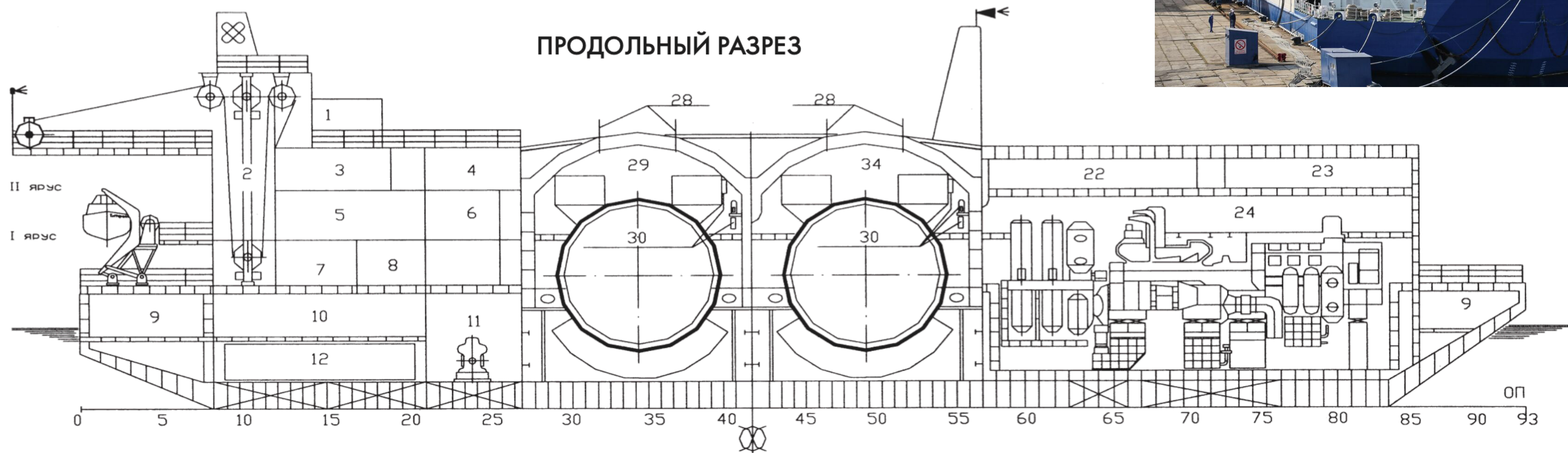
На рисунке отражена зависимость в виде отклонения усиления относительно значения при комнатной температуре в процентах, откуда можем найти коэффициент изменения усиления от температуры, который вышел равным

$$k \approx (-0,81 \pm 0,09)\%/^{\circ}\text{C},$$

что соответствует заявленному значению у производителя.



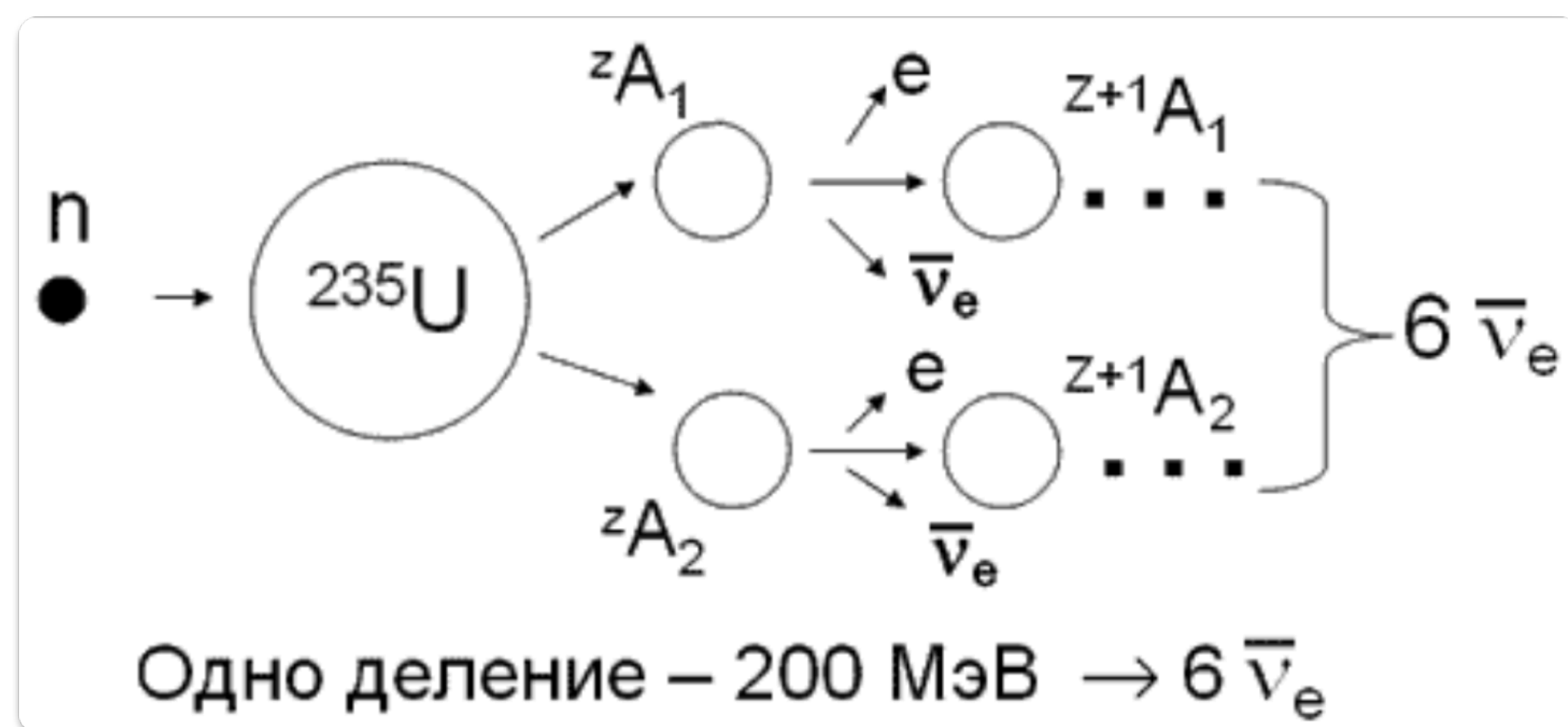
# Нейтринный детектор для плавучих атомных электростанций (ПАЭС)





# Нейтринный детектор для плавучих атомных электростанций (ПАЭС)

Реакторные антинейтрино служат индикаторами протекания цепной реакции деления в активной зоне реактора



Энергия нейтринного излучения: 8 - 10 МэВ.

В сутки в активной зоне реактора с тепловой мощностью  $P$  (МВт) происходит приблизительно:

$$F = 2,70 \cdot 10^{21} \cdot P \text{ [делений/сут].}$$

Используется реакция обратного бета-распада (ОБР)

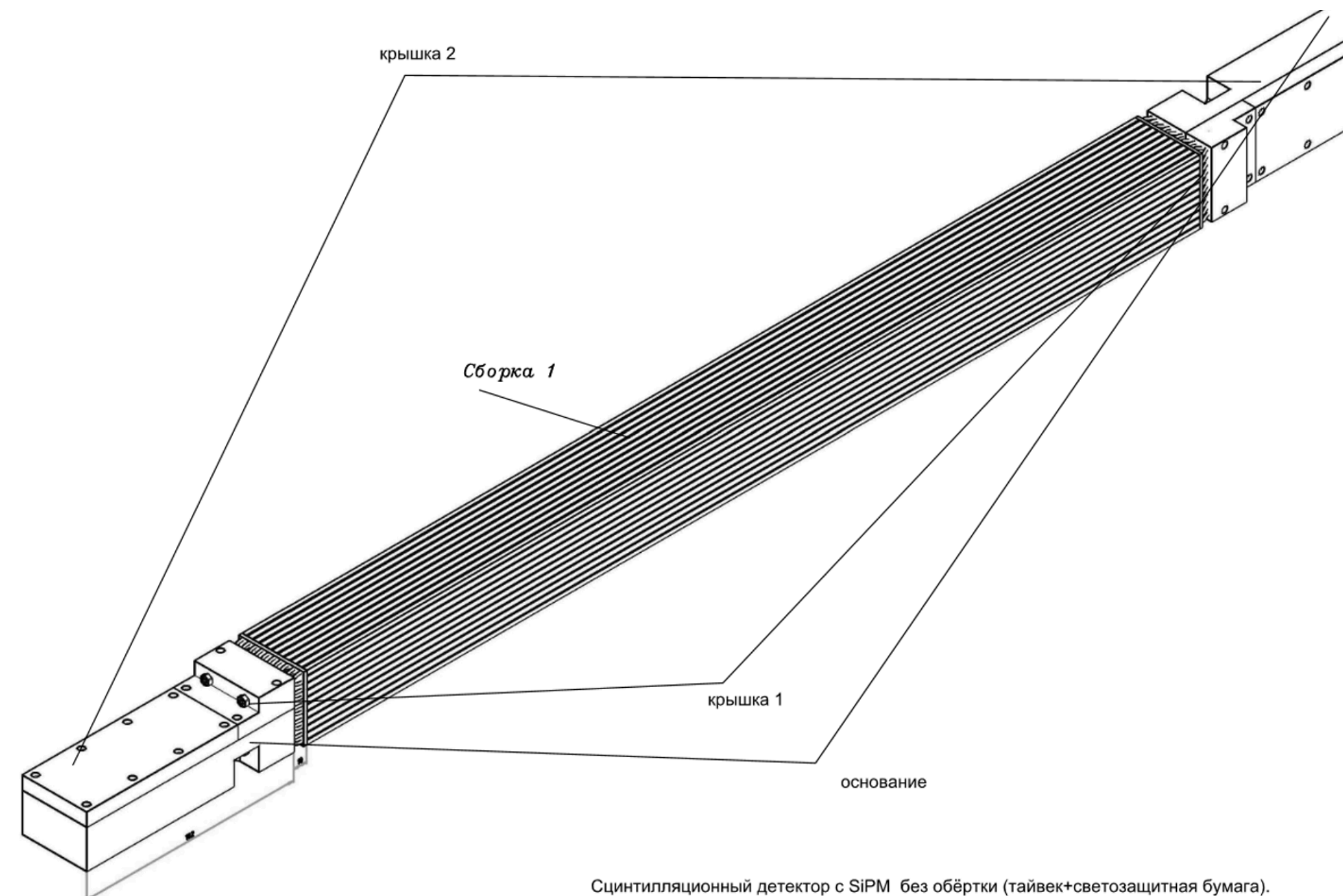
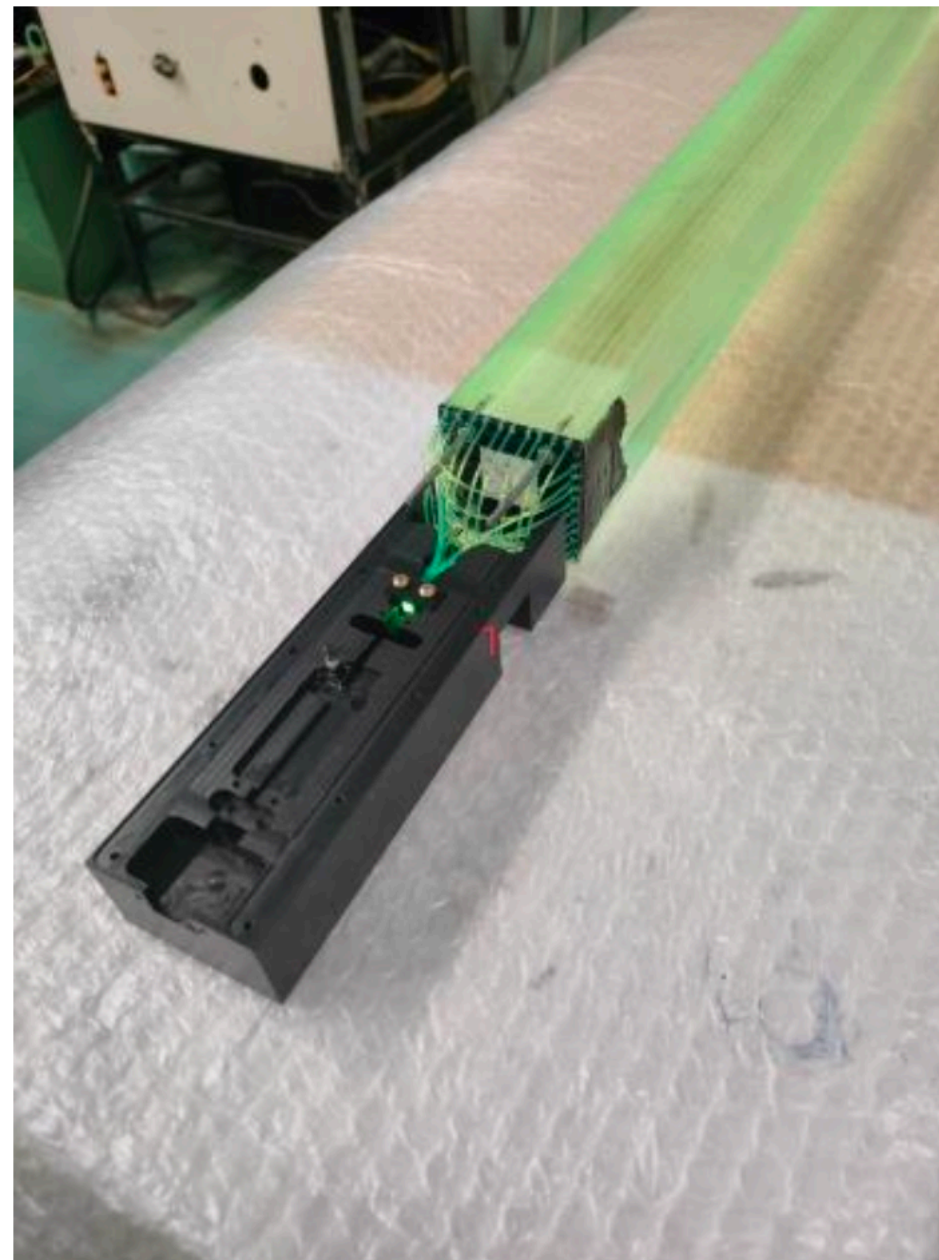


Сечение  $\langle \sigma \rangle = 6 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$   
 Число реакций ОБР от двух реакторов в 1 т мишени детектора, содержащей  $N_H \cong 7 \cdot 10^{28}$  ядер водорода, в зависимости от расстояния  $L = 10 - 20 \text{ м}$  будет лежать в диапазоне

$$n = \frac{\langle \sigma \rangle}{4\pi L^2} F N_H = (0,68 - 2,70) 10^3 \text{ (1/сут).}$$

# Образец нейтринного детектора

- Полистирольный сцинтиллятор с добавками **2 % паратерфенила + 0,05 % РОРОР**
- Размеры 50x50x700 мм
- Si-ФЭУ Onsemi FC-30035 (США), расположенные на противоположных концах сцинтиллятора.

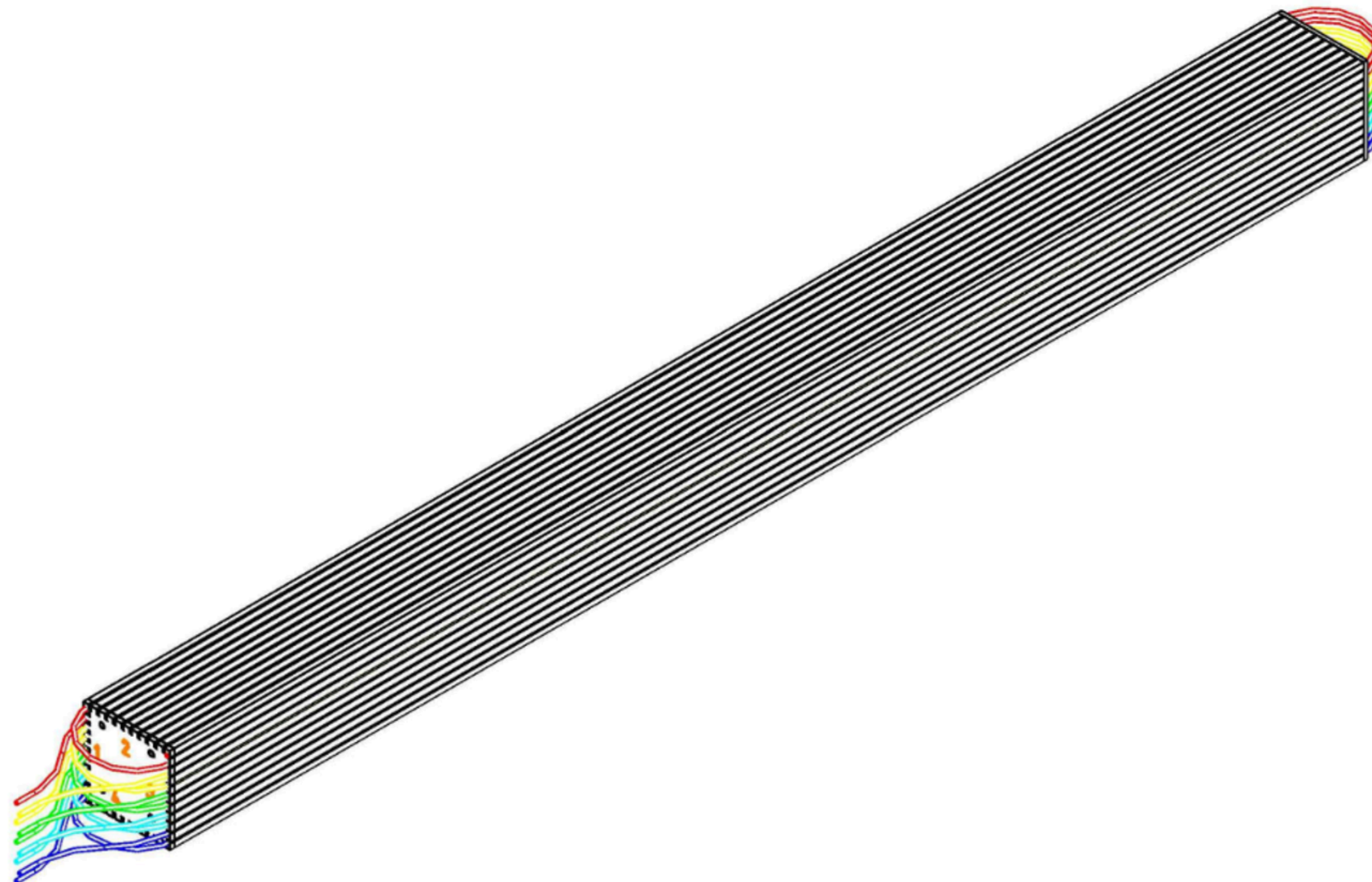


Сцинтилляционный детектор с SiPM без обёртки (тайвек+светозащитная бумага).

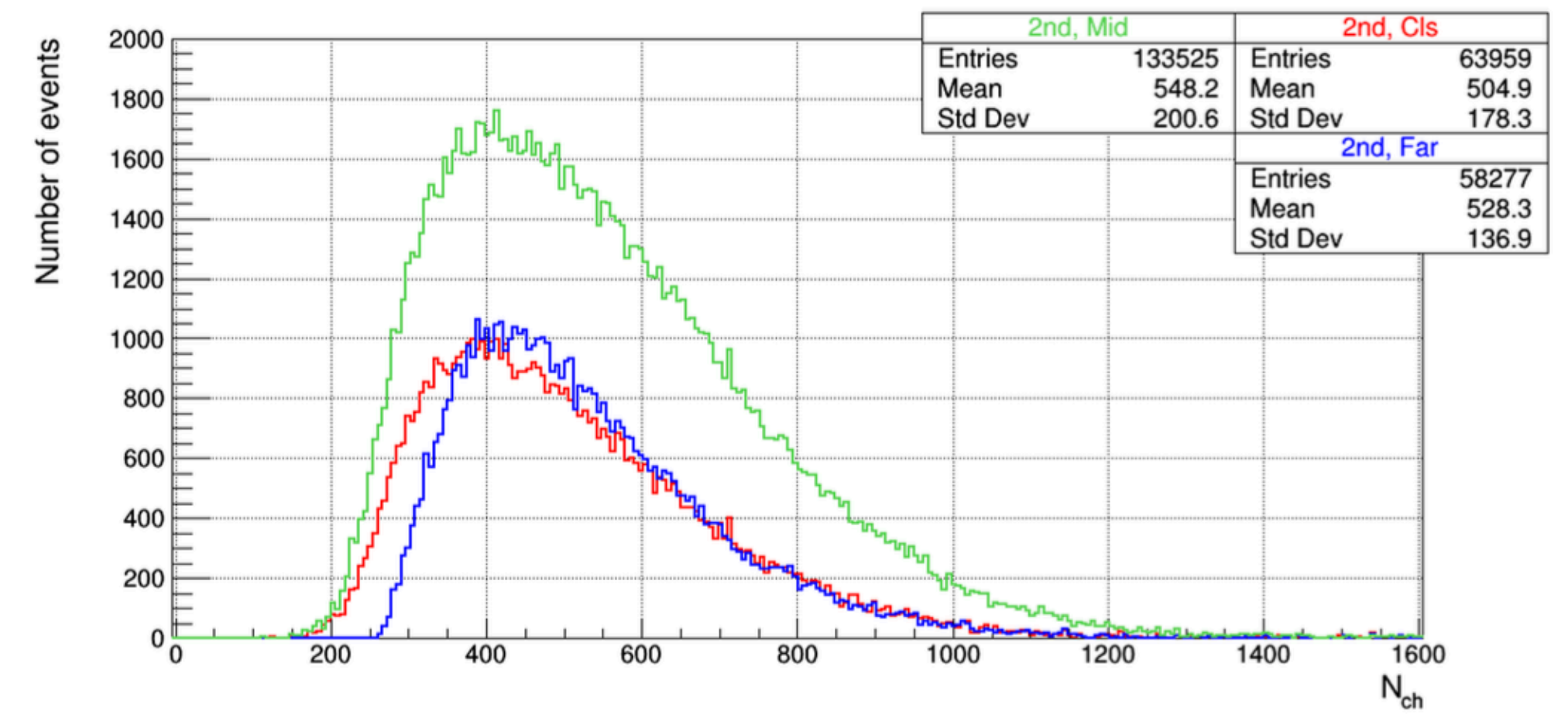
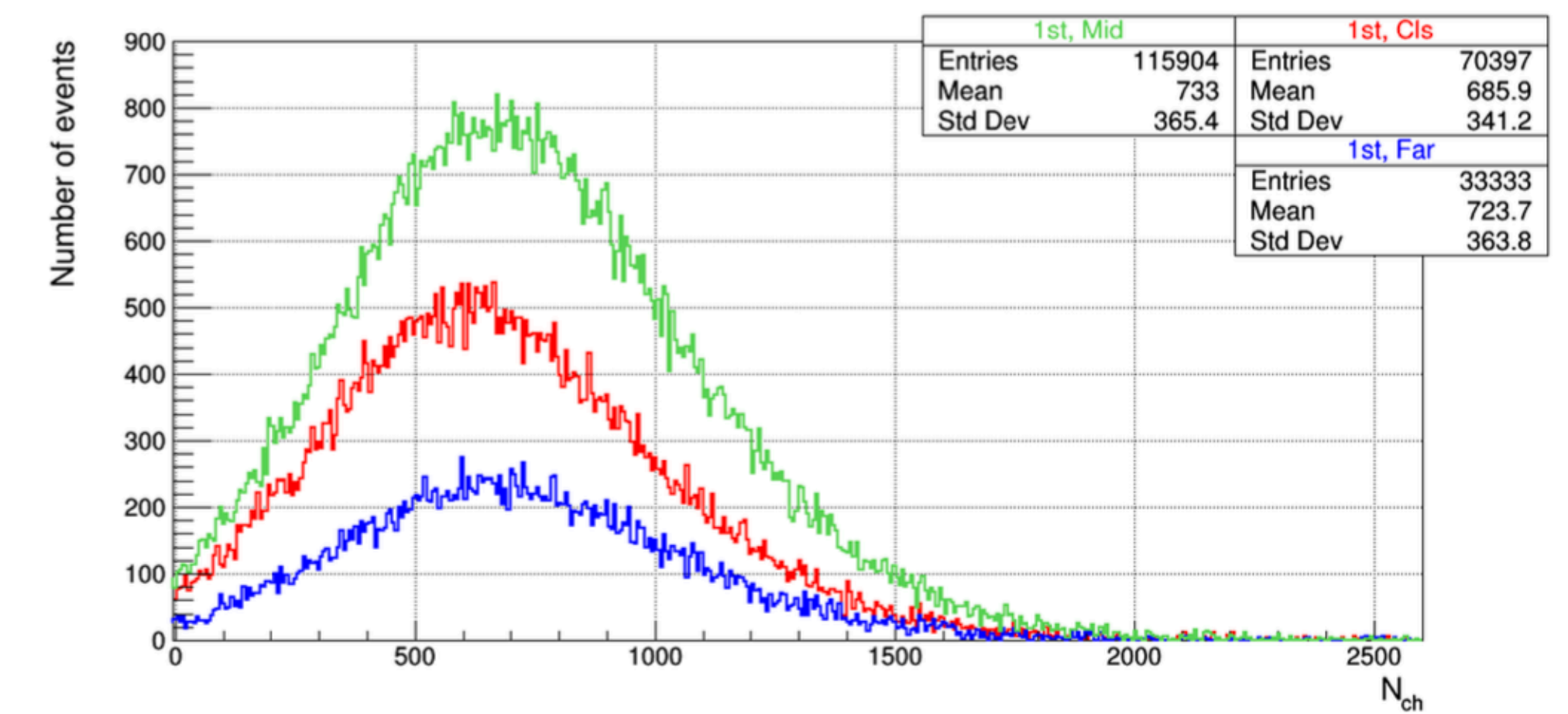
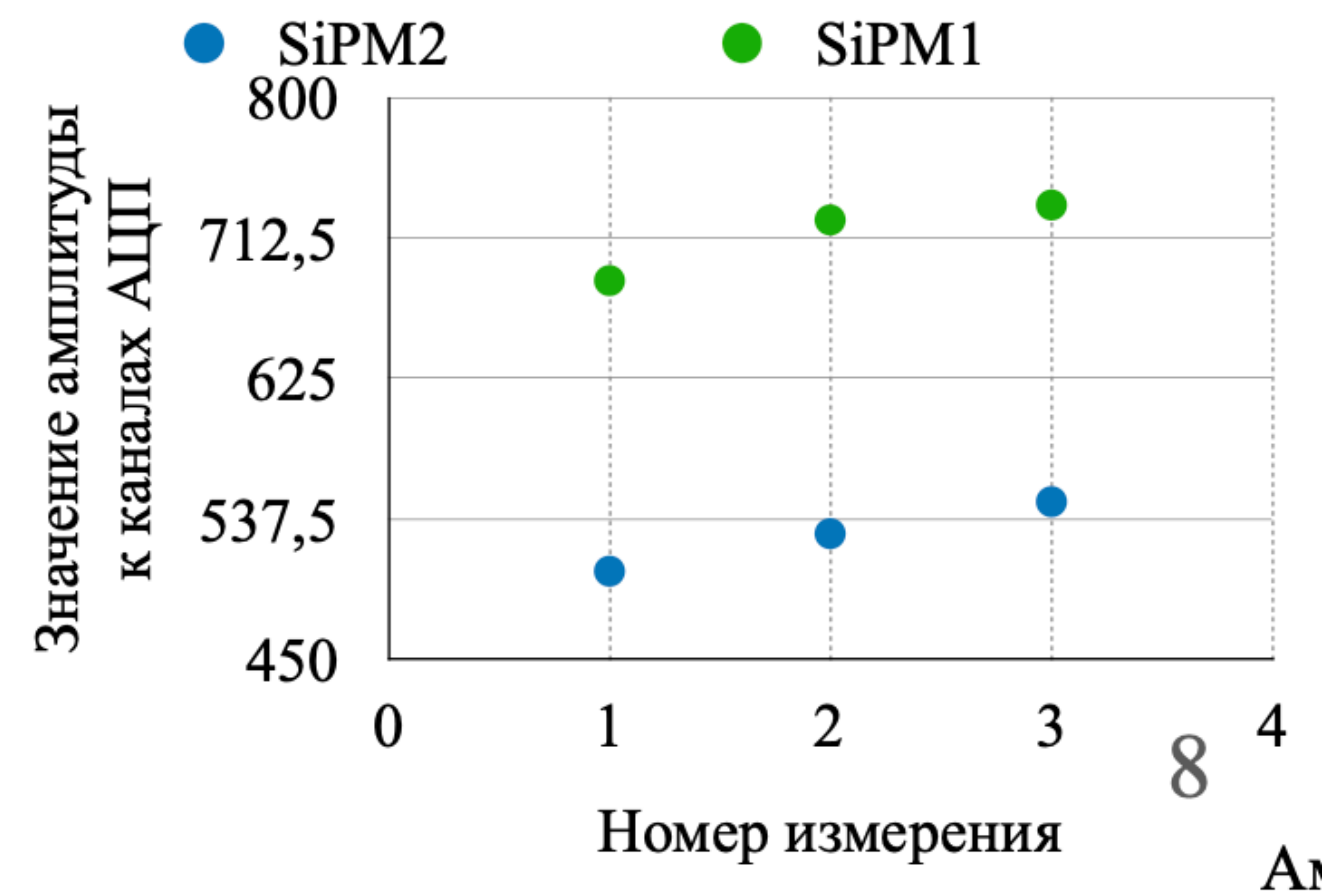
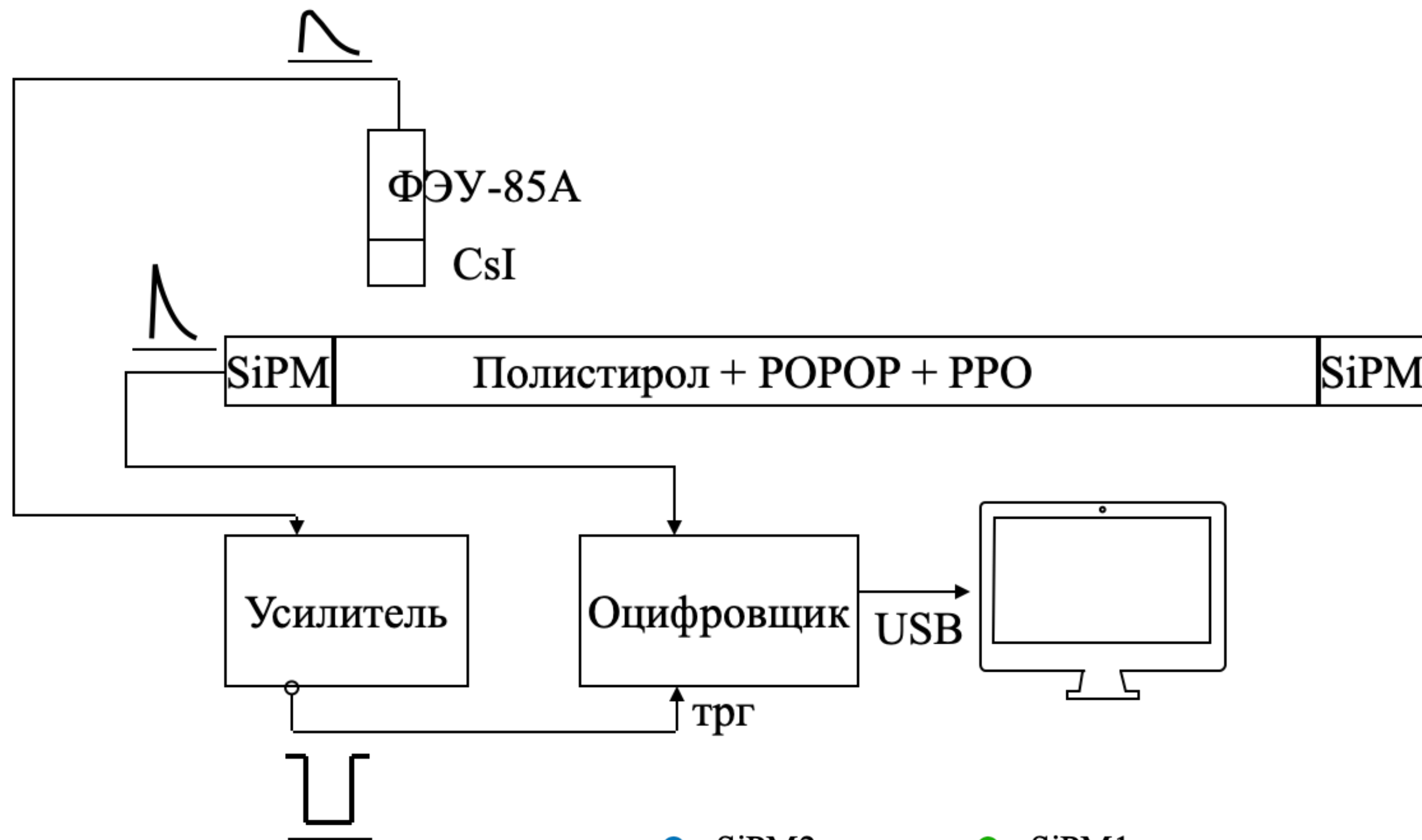


# Характеристики сцинтиллятора

- Наиболее подходящим материалом для создания мишени служат водородо-насыщенные пластиковые сцинтилляторы.
- Излучают в фиолетовой области (420 нм)
- Для однородного сбора света с бруска и для согласования спектра свечения пластика со спектральной чувствительностью ФЭУ нужны спектросмещающие волокна (WLS, Kuraray (Япония)).



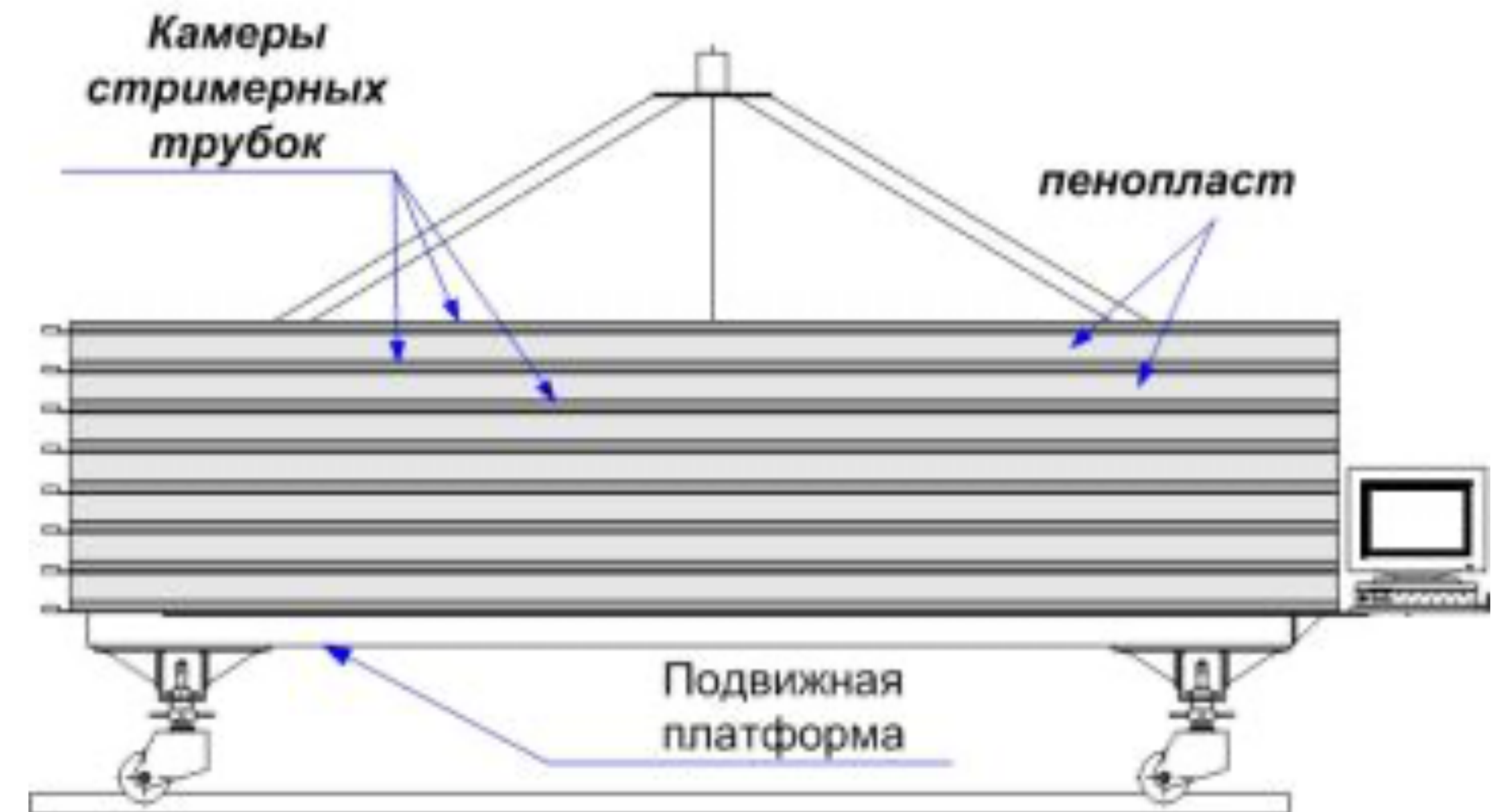
# Однородность амплитудного отклика. Мюонный телескоп



Амплитудные спектры в трех положениях источника относительно Si-ФЭУ



# Годоскоп УРАГАН

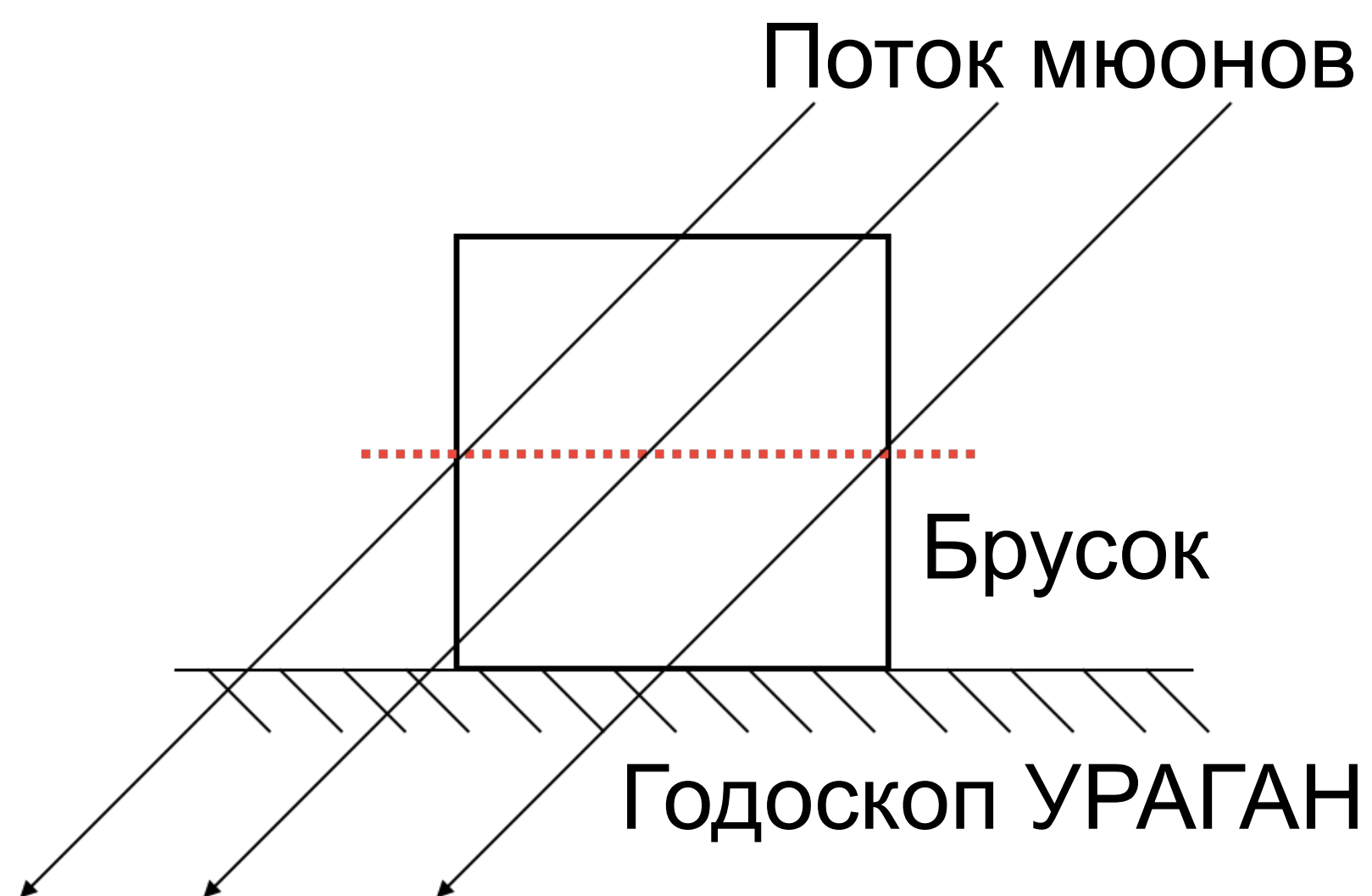


- Детектор - многослойная система стримерных трубок
- Система обработки данных позволяет реконструировать мюонные треки в режиме on-line и регистрировать поток мюонов в виде непрерывной последовательности 2D-изображений.

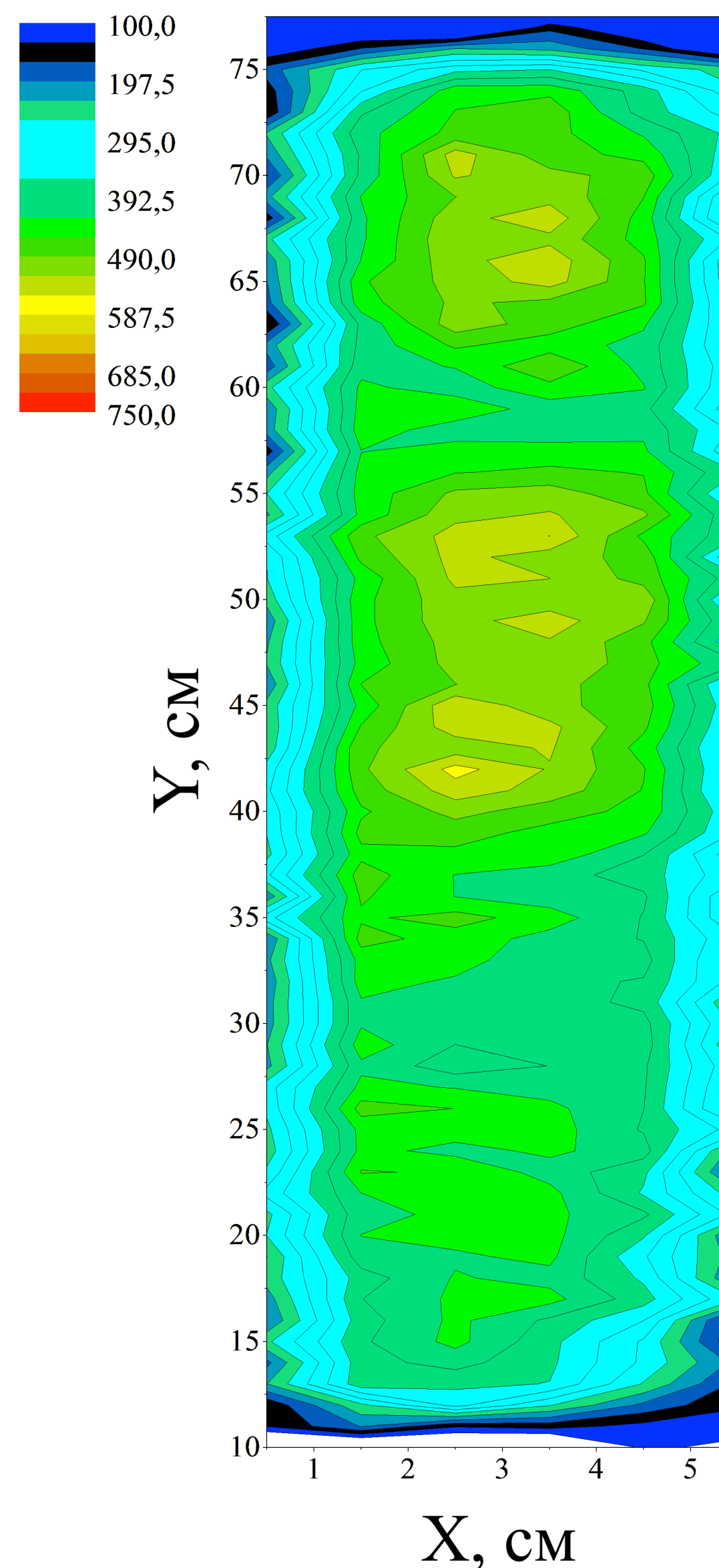
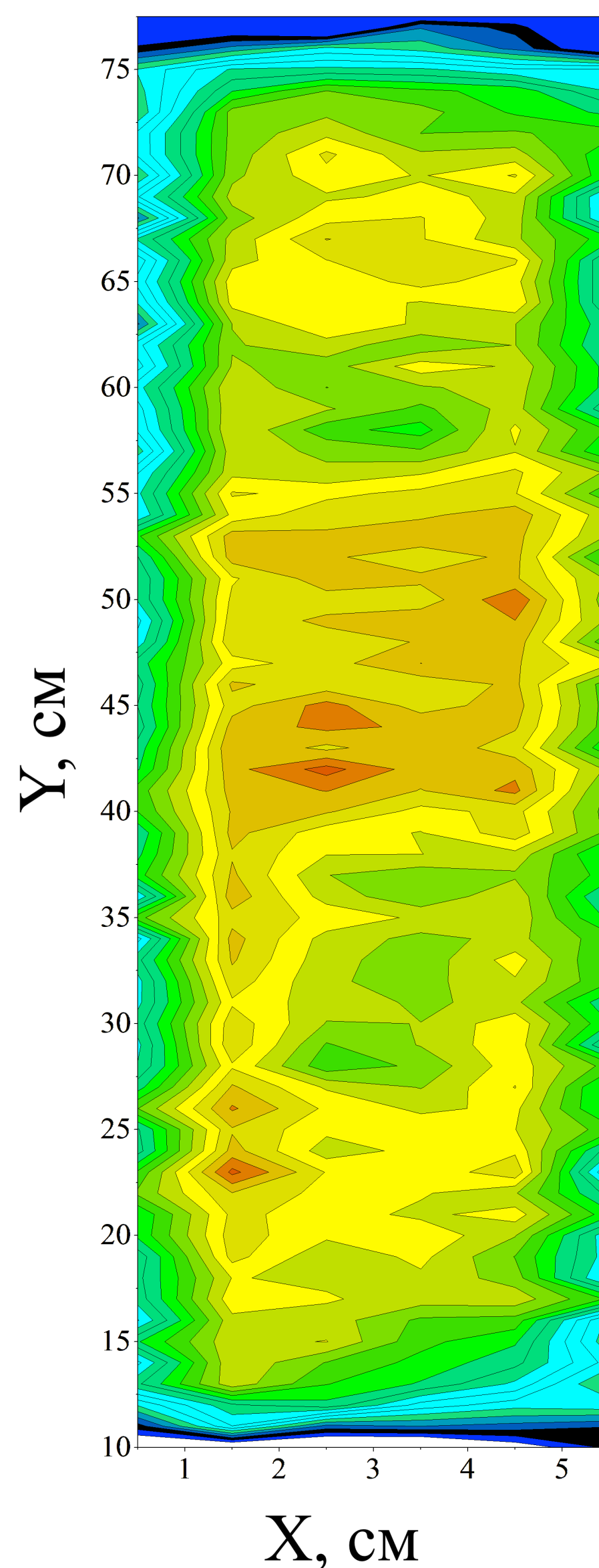


# Однородность сцинтиллятора

Отбор событий производился по геометрии



Измерения получены для двух Si-ФЭУ отдельно: слева - Si-ФЭУ №1, справа - Si-ФЭУ №2



← Положение Si-ФЭУ №2

Сигма = 249 (лев.)

Сигма = 190 (прав.)

← Положение Si-ФЭУ №1



# Заключение

Исследована неоднородность отклика в многоканальной системе макета ПЭТ и неоднородность амплитудного отклика пластикового сцинтиллятора нейтринного детектора.

- Измеренная неоднородность отклика по каналам ПЭТ обусловлена разбросом характеристик сцинтилляторов и невозможностью обеспечить воспроизводимый оптический контакт между кристаллом сцинтиллятора и Si-ФЭУ.
- Зависимость от температуры соответствует заявленной величине

$$k \approx -0,81 \pm 0,09\%/^{\circ}C,$$

- Неоднородность модуля нейтринного детектора составила 249 кан. и 190 кан.

**Спасибо за внимание!**





# Дополнительные слайды



# Сцинтилляторы

- Неорганические сцинтилляторы GAGG(Ce).  
Характерные размеры 3x3x20 мм



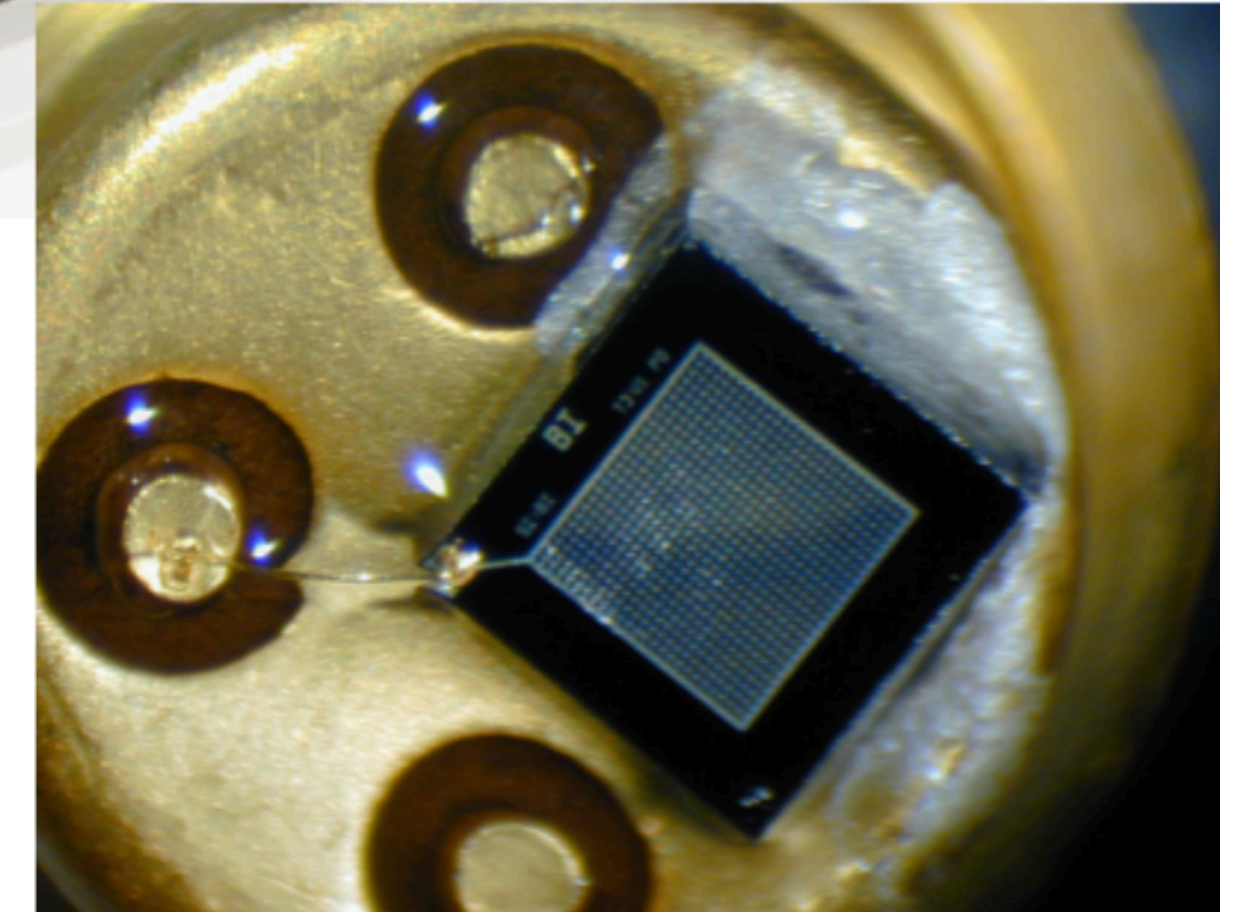
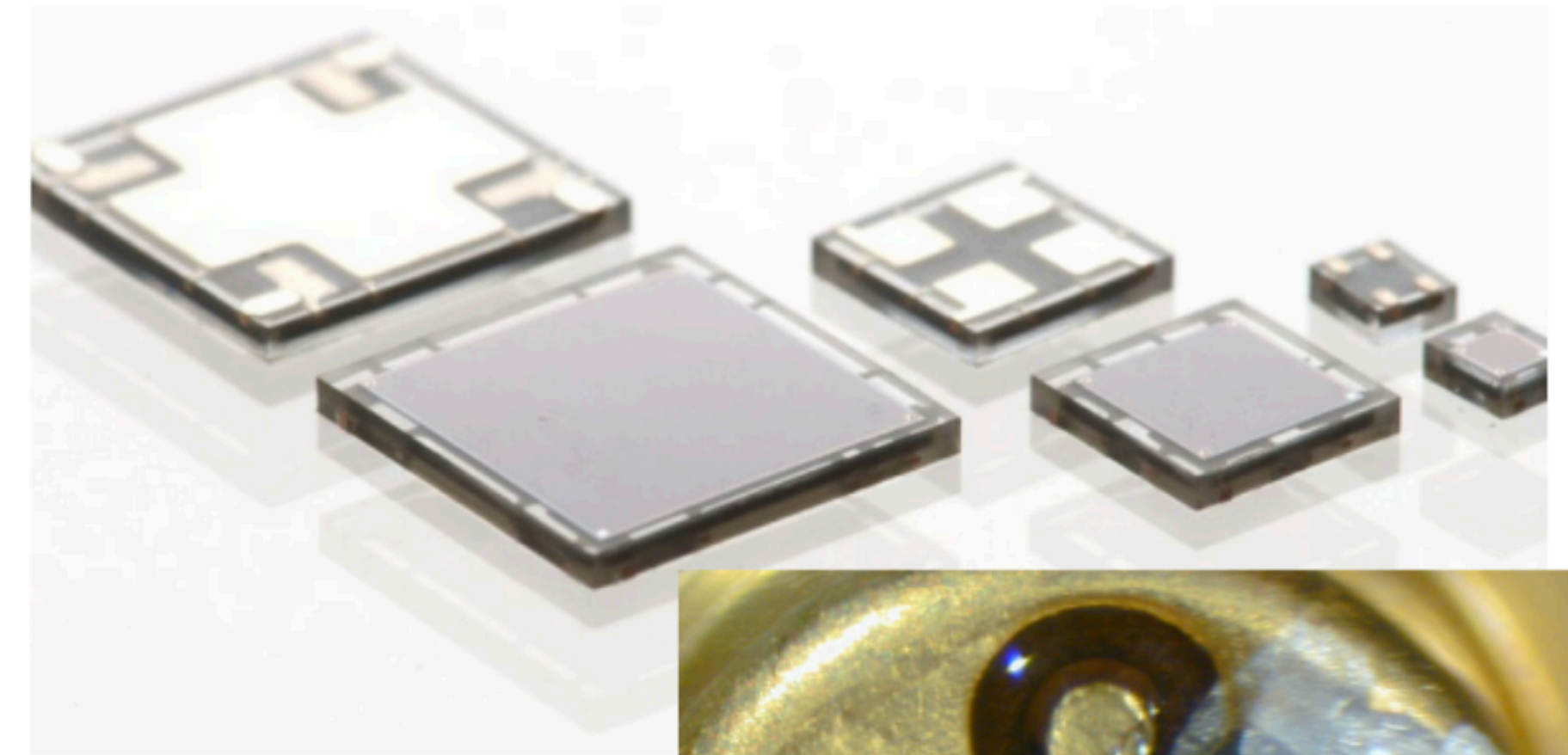
	CsI(Tl)	LYSO(Ce)	LaCl <sub>3</sub> (Ce)	NaI(Tl)	GAGG(Ce)
Плотность (г/см <sup>2</sup> )	4.51	7.2	3.85	3.67	6.63
Эффективный $Z_{eff}$ (атомный номер)	54	65	59.5	50	54.4
Длина волн поглощения (нм)	550	420	350	415	520
Время свечивания (нс)	1,050	40	28	230	87(90%)255(10%)
Световыход (фотоны/кэВ)	54	32	49	38	50
Гигроскопичность	Слабая	—	+	+	—
Собственная радиоактивность	—	+	—	—	—



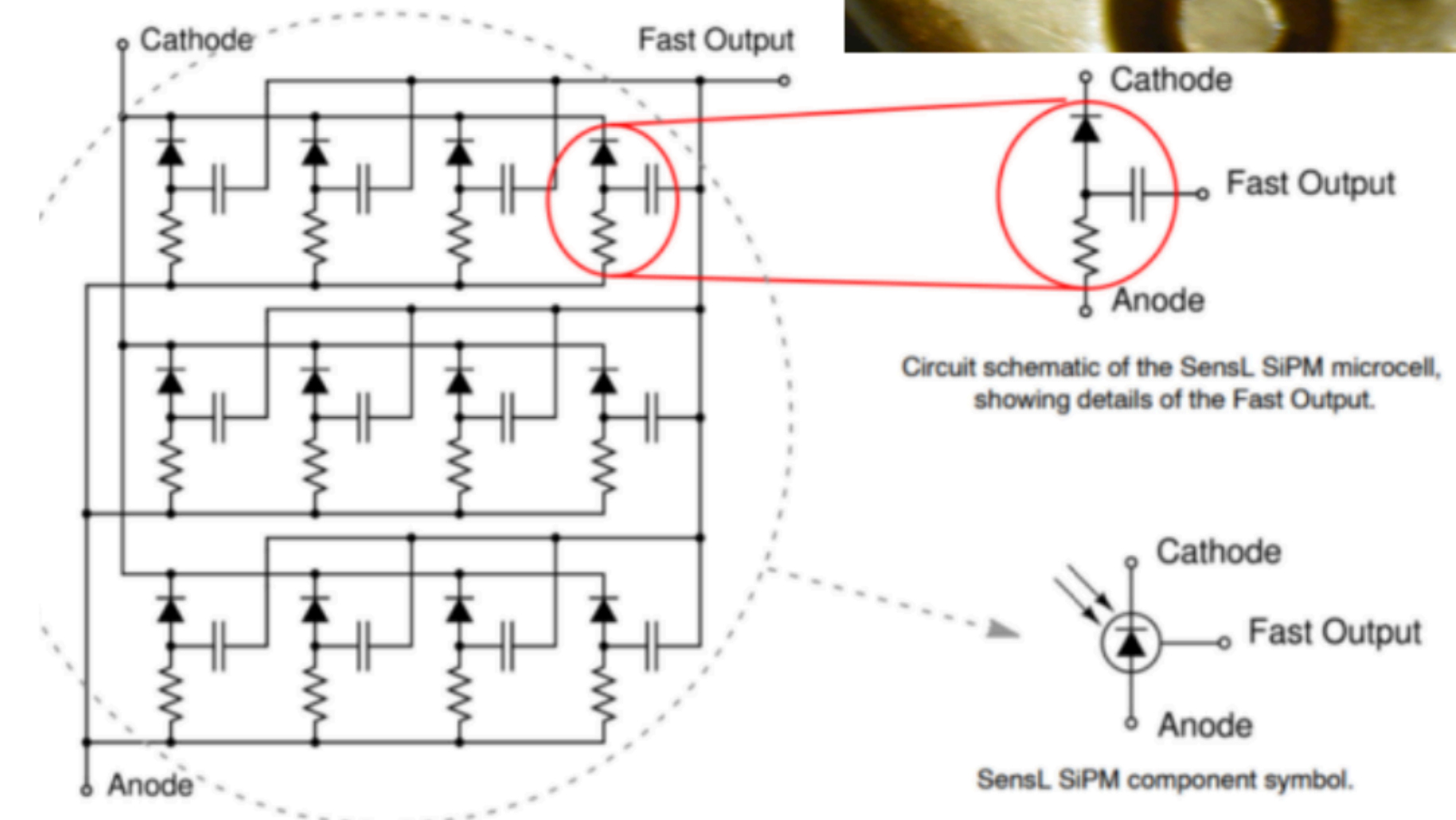
# Конструкция макета ПЭТ

## SiPM

- Неорганические сцинтилляторы GAGG(Ce).  
Характерные размеры 3x3x20 мм
- SiPM SensL FC30035

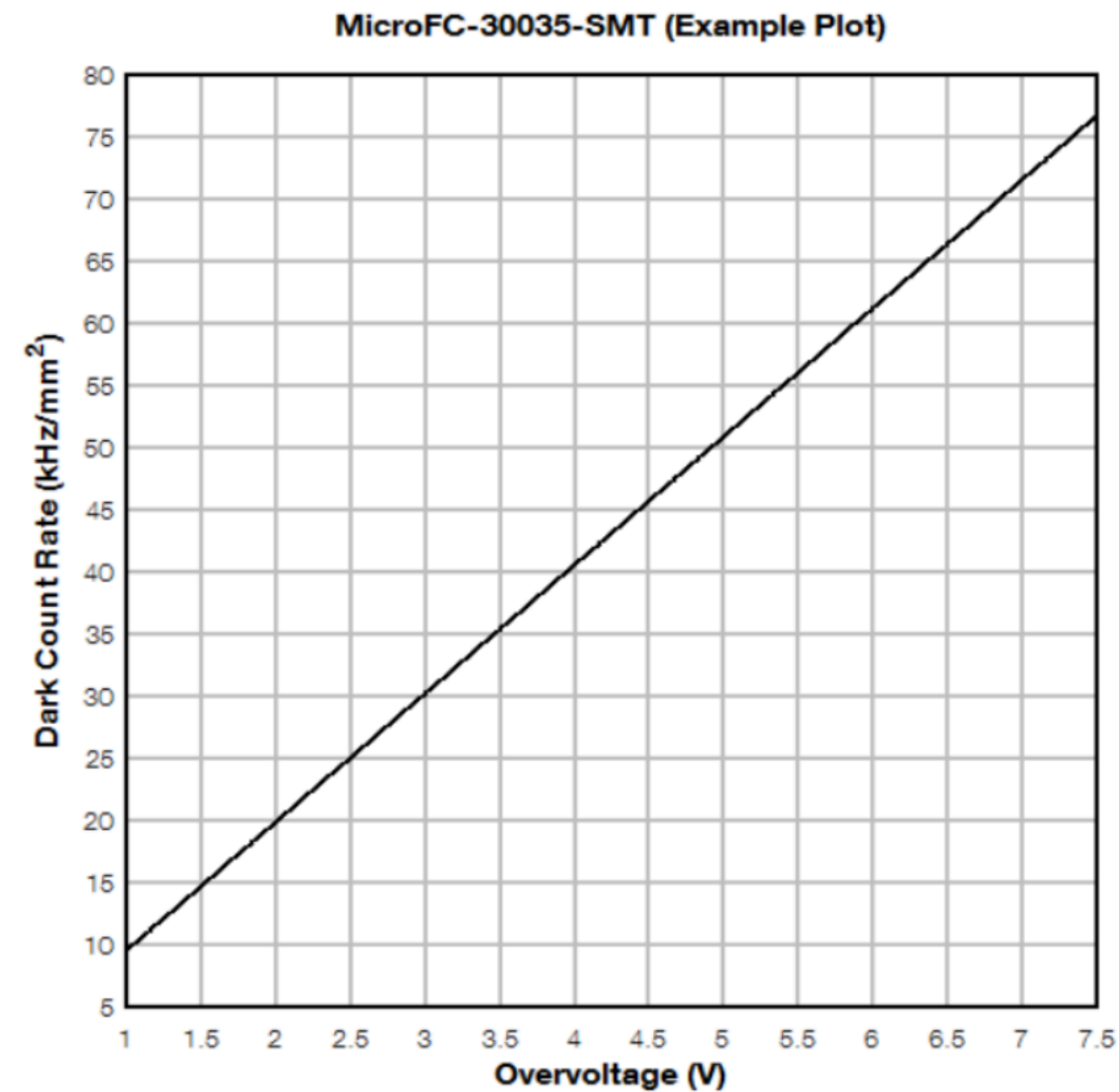
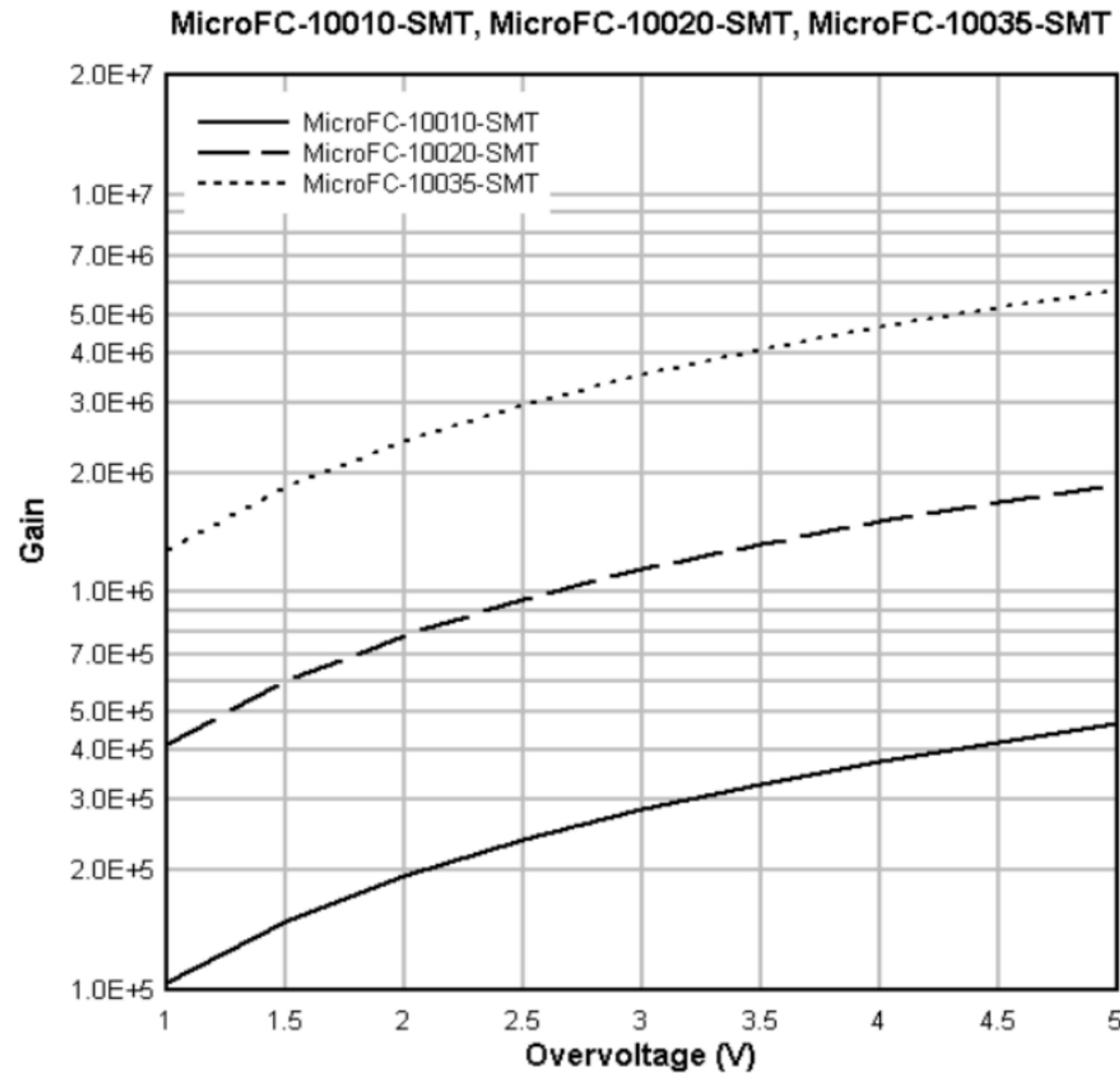


Размер элемента	Размер ячейки	Параметр	Min.	Тур.	Max	Ед. измерения
3 mm	35μ	Напряжение пробоя ( $V_{br}$ )	24.2		24.7	В
		Пиковая длина волны ( $\lambda_p$ )		420		нм
		Эффективность регистрации фотонов (PDE)		$31(V_{br}+2.5V)$		%
		Усиление		$3 * 10^6$		
		Скорость темпового счета (DCR)		300	860	кГц





# Зависимость характеристик Si-ФЭУ от напряжения



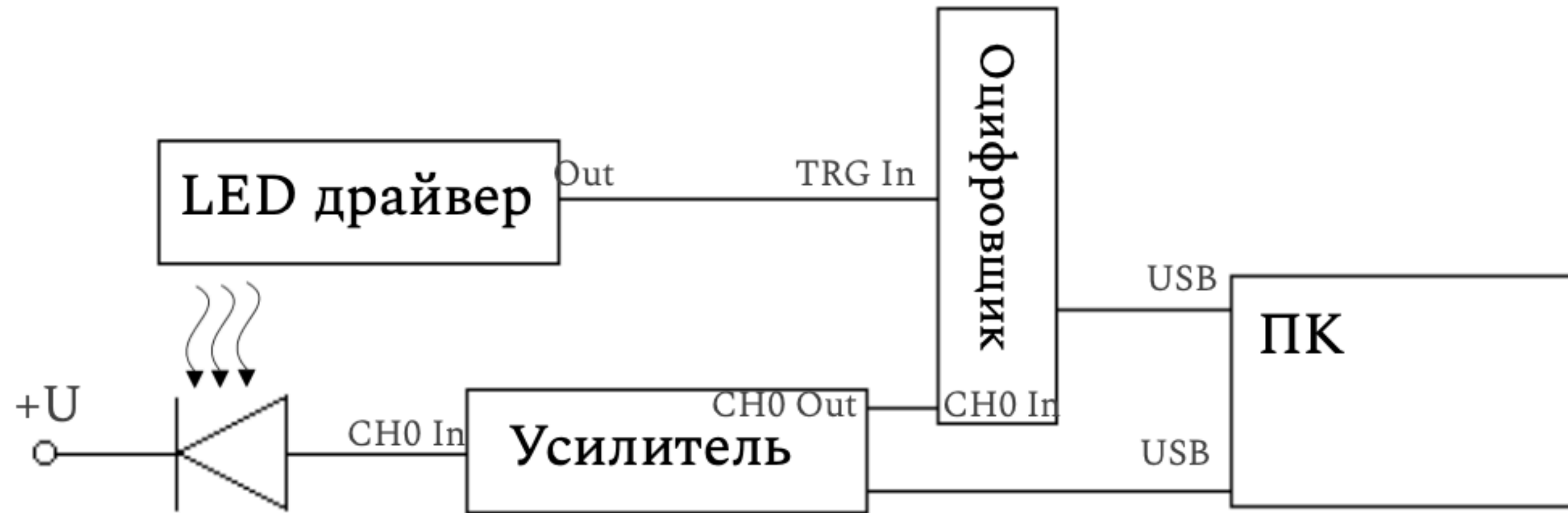
- Эффективность регистрации фотонов
- Коэффициент усиления
- Шумы
- Оптическая связь и послеимпульсы
- зависят от приложенного напряжения.

- С ростом напряжения увеличиваются амплитуда сигнала и шумы
- Существует напряжение при котором соотношение сигнал-шум наибольшее - **рабочая точка**

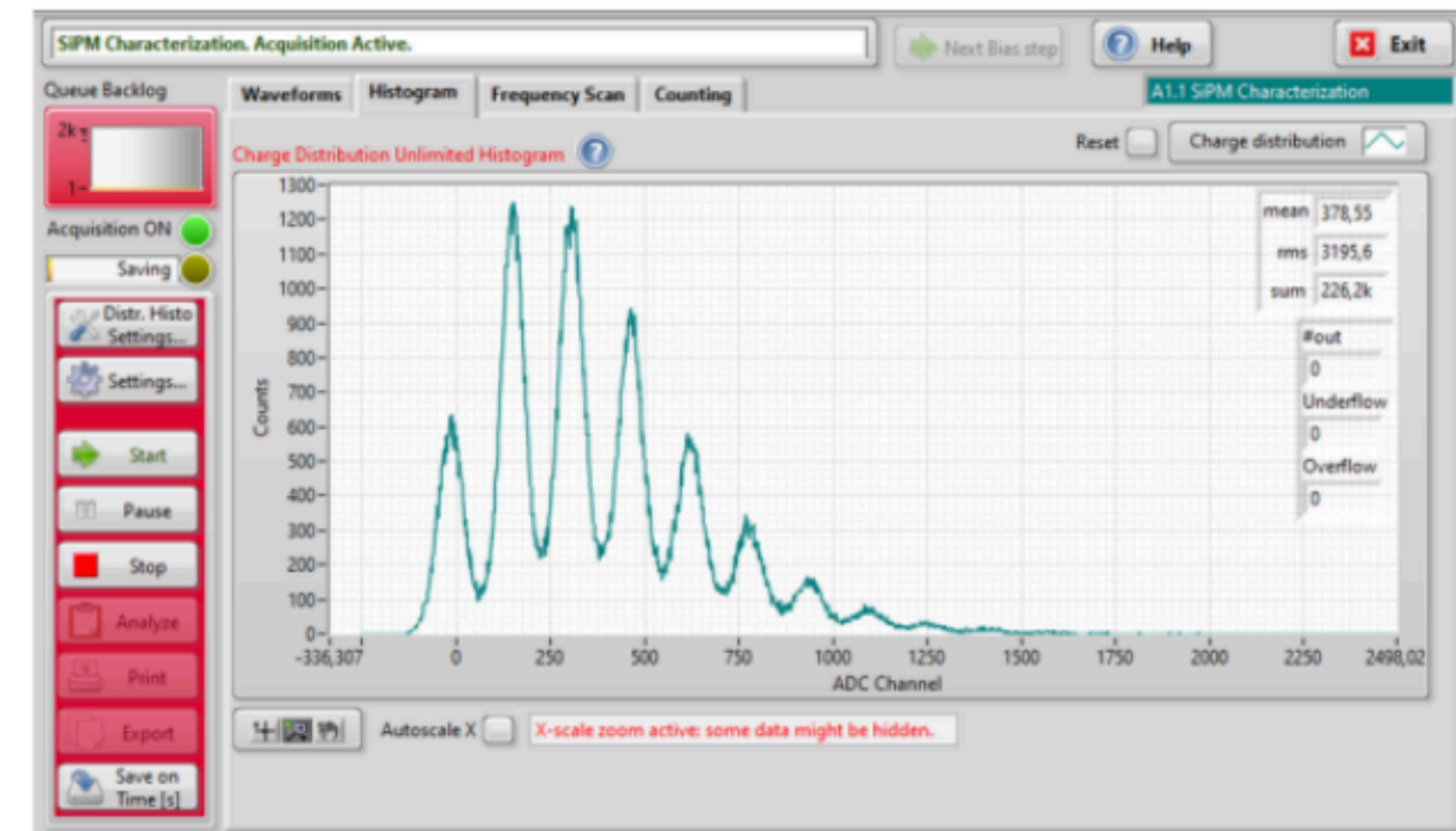
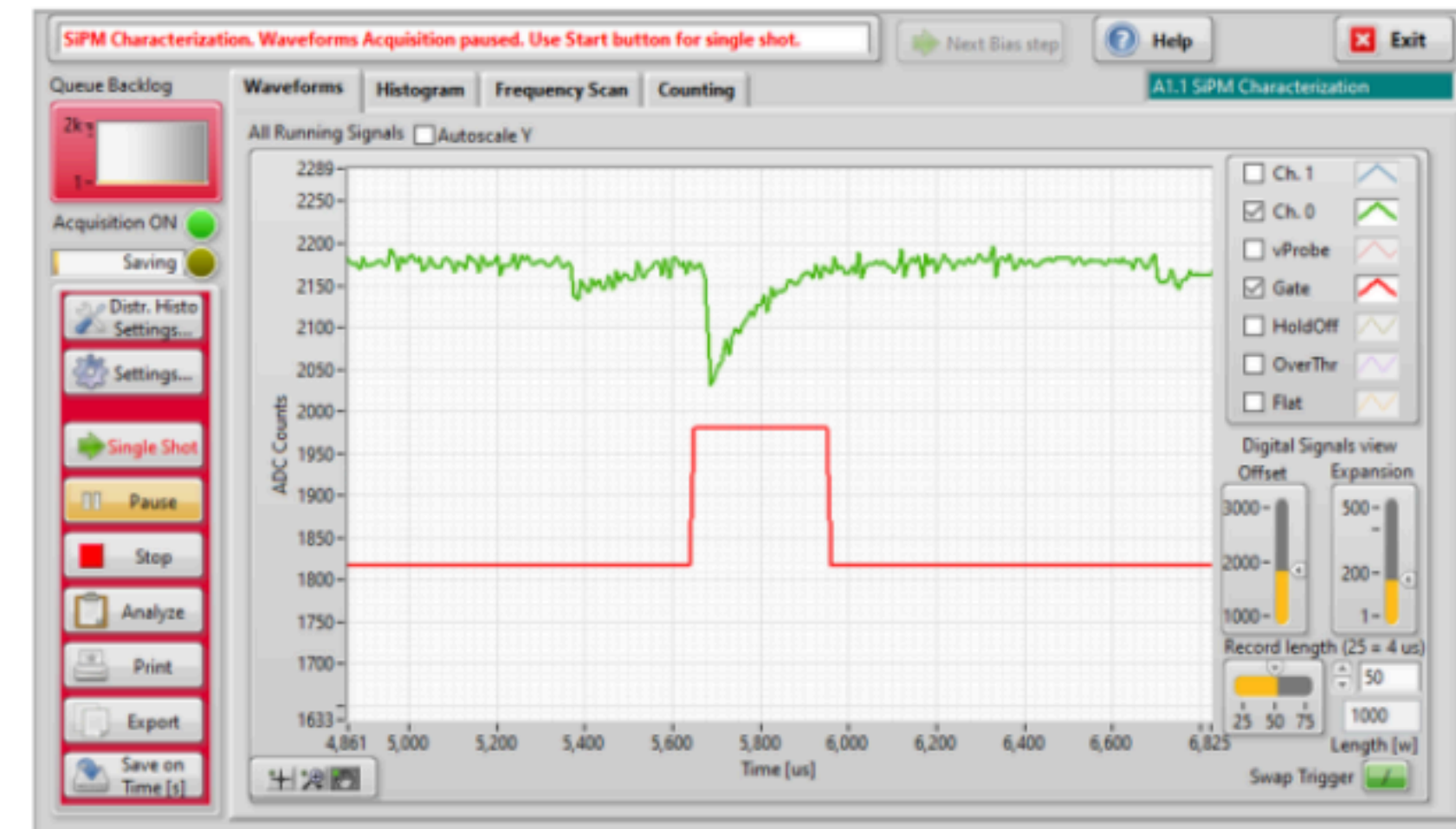
[Data sheet Onsemi](#)



# Схема установки и одноэлектронные спектры



- **LED драйвер** - генератор импульсов + светодиод (длительность импульса 8 нс)
- Зарядочувствительный **усилитель** (коэф. усил. 100)
- **Оцифровщик** формы сигнала/цифровой осциллограф



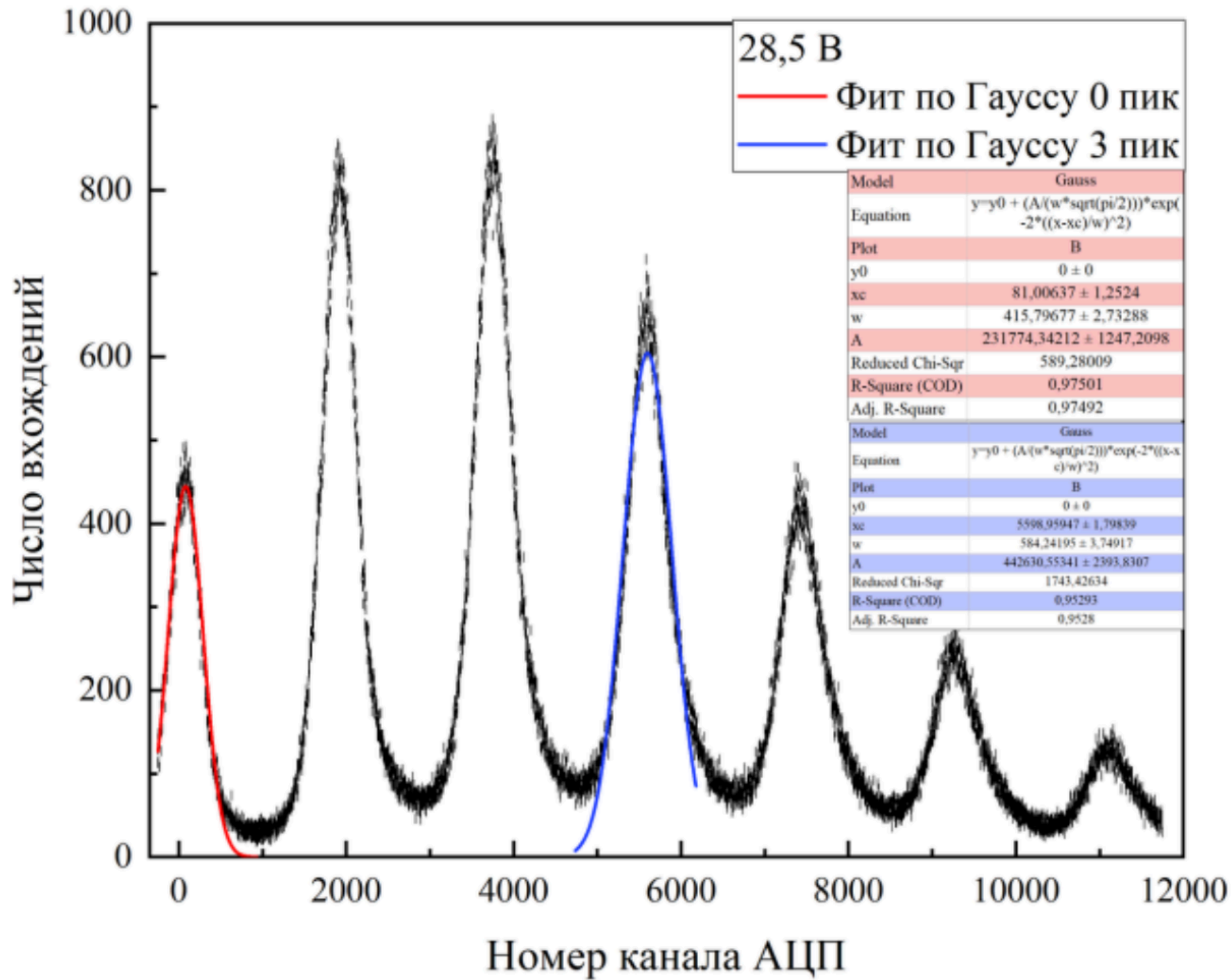
Установка рассчитана на работу с Si-ФЭУ Hamamatsu



адаптирована под Si-ФЭУ SensL



# Метод расчета рабочей точки

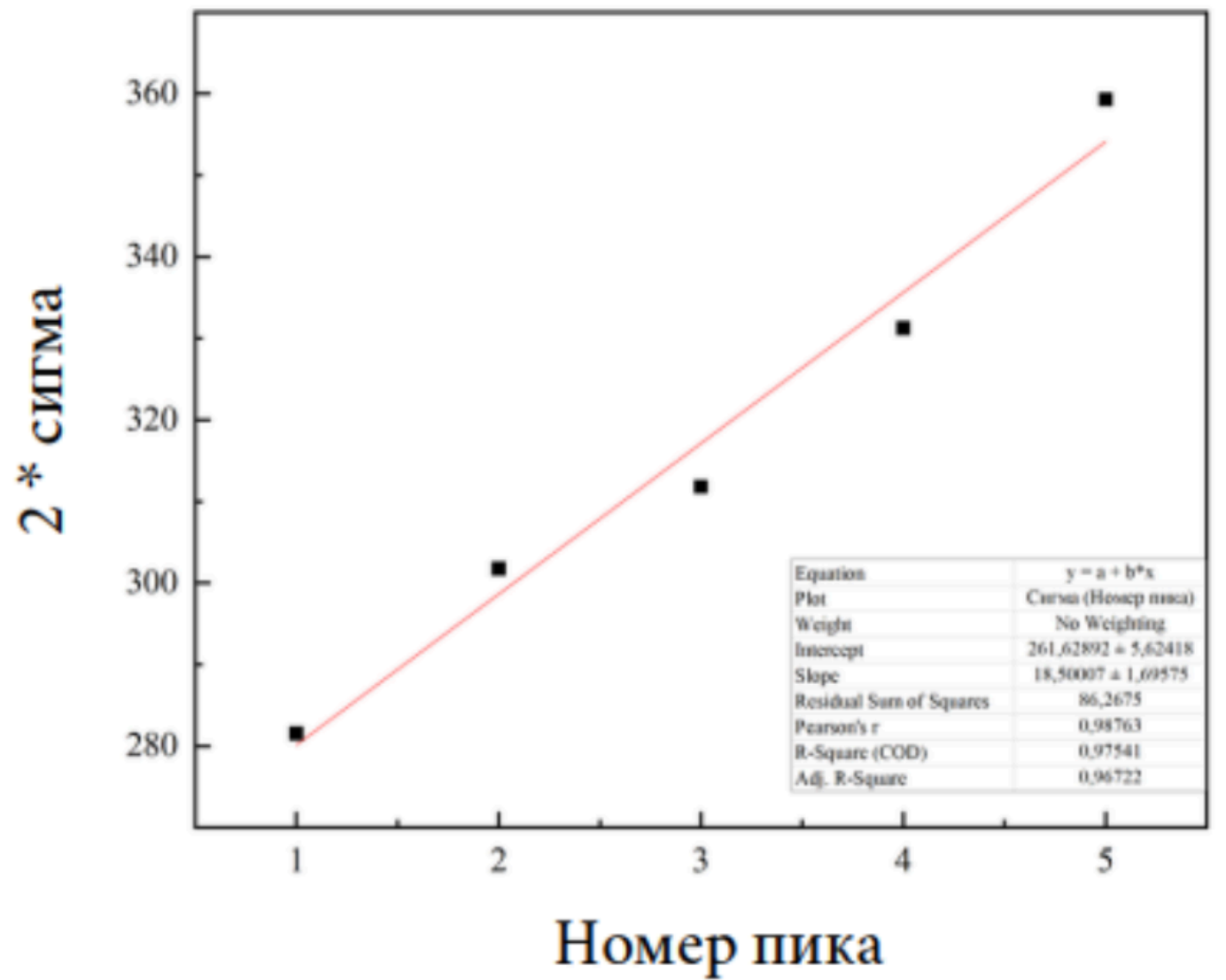
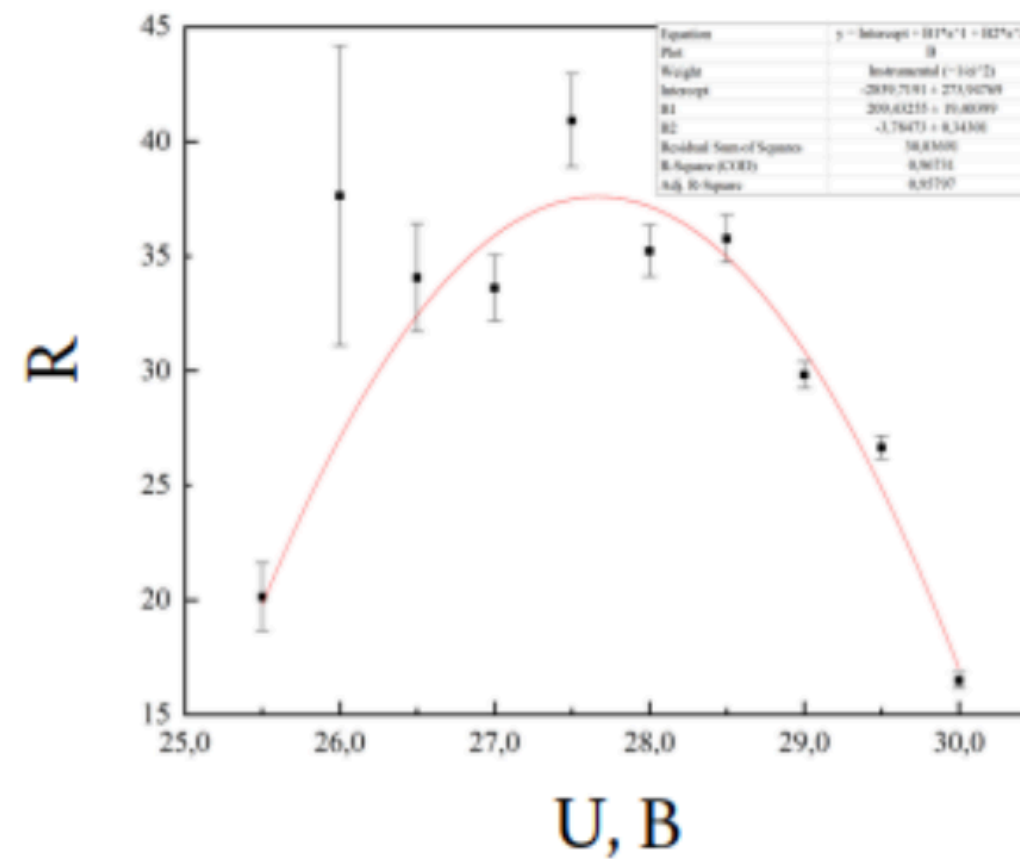


$$R = \frac{\Delta_{pp}}{\sigma_{gain}}$$

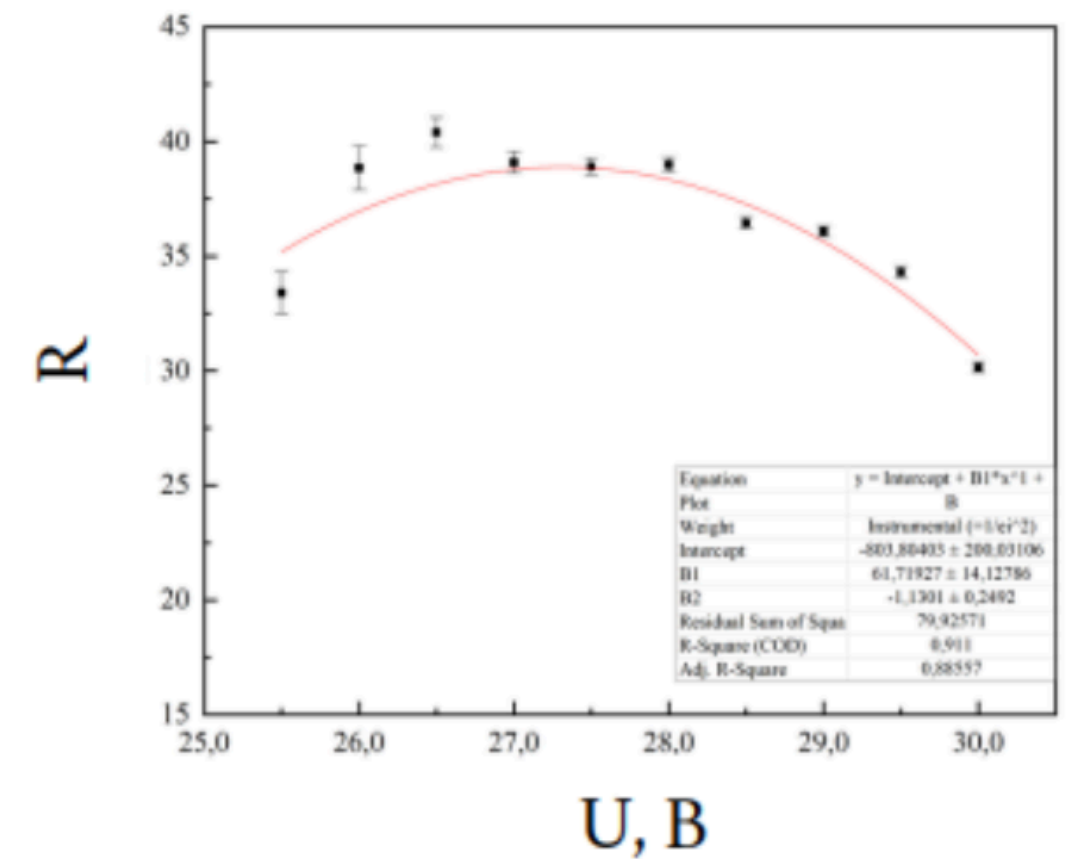
$$\sigma_{gain} = (\sigma_1^2 - \sigma_0^2)^{1/2}$$



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



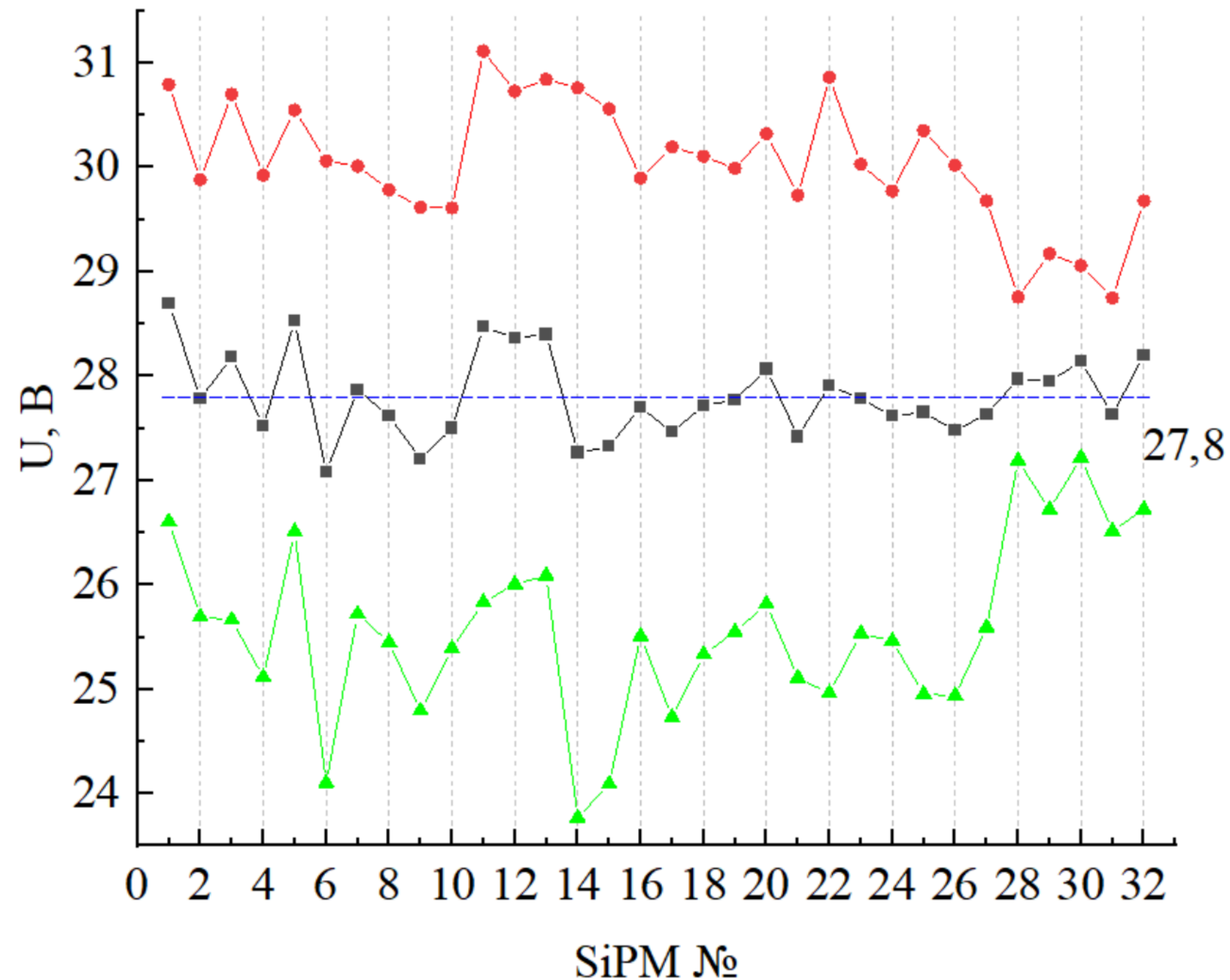
Зависимость среднеквадратичного отклонения пика от его порядкового номера при фитировании по распределению Гаусса



Зависимости разрешающей способности от напряжения Si-ФЭУ в случае выбора значений для первого (слева) и третьего (справа) пиков



# Рабочее напряжение Si-ФЭУ

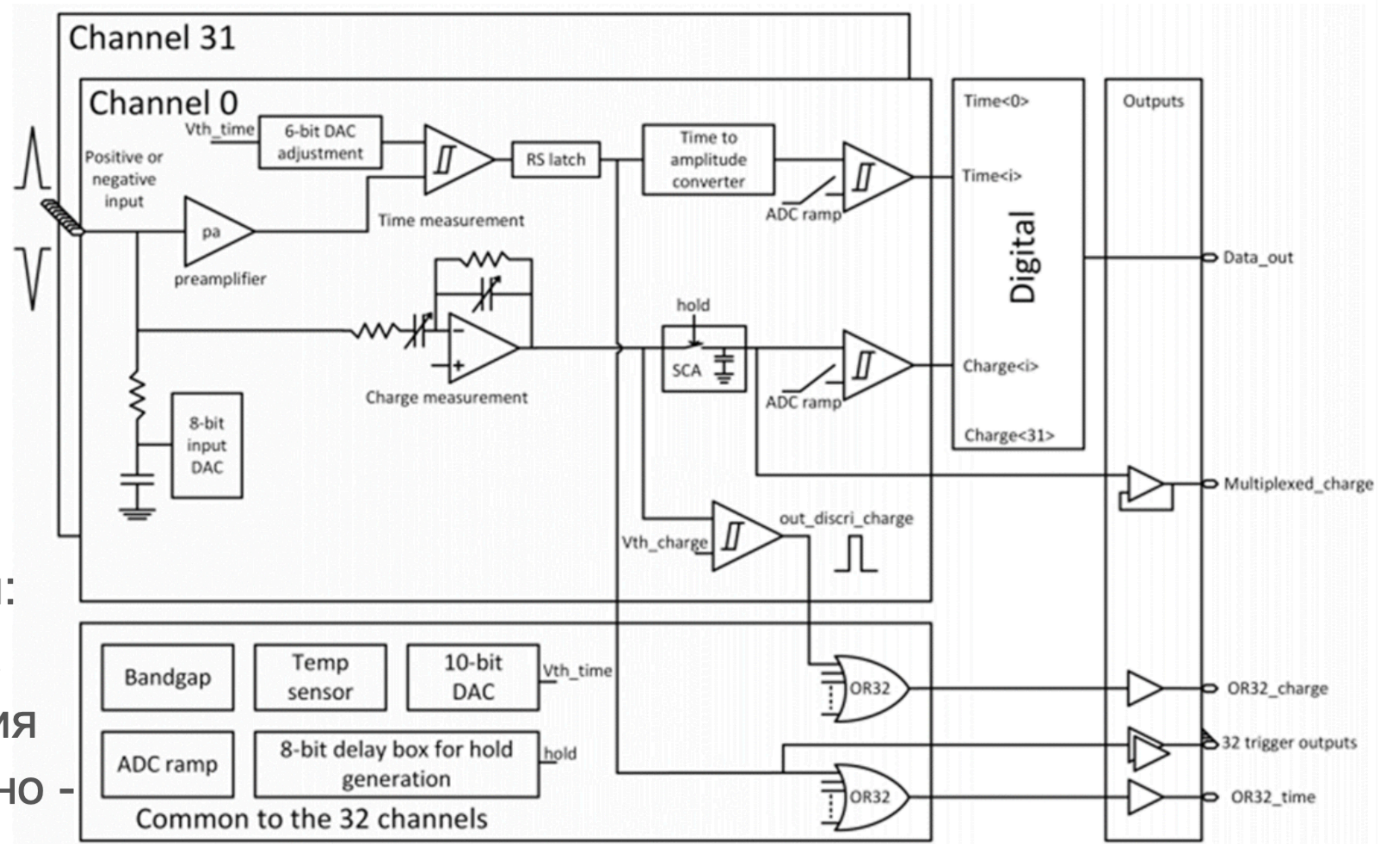


Черным показаны точки, где наблюдается наилучшая разрешающая способность Si-ФЭУ. Красным и зеленым - отклонения на 10% от наилучшего разрешения в большую и меньшую стороны значений напряжения соответственно

# Многоканальный анализатор Petroc2A

Система сбора временной и амплитудной информации:

- Быстрый усилитель
- Формирующий усилитель (з.ч.у.)
- Предназначена для работы с SiPM
- 10-бит ВЦП → 36 пс/канал
- 10-бит АЦП → 2 мВ/канал
- ❖ Система отбора полезных событий:
- ❖ Дискриминатор временного канала
- ❖ Точная амплитудная дискриминация
- ❖ Совпадения каналов из 2 групп (окно 10 нс)

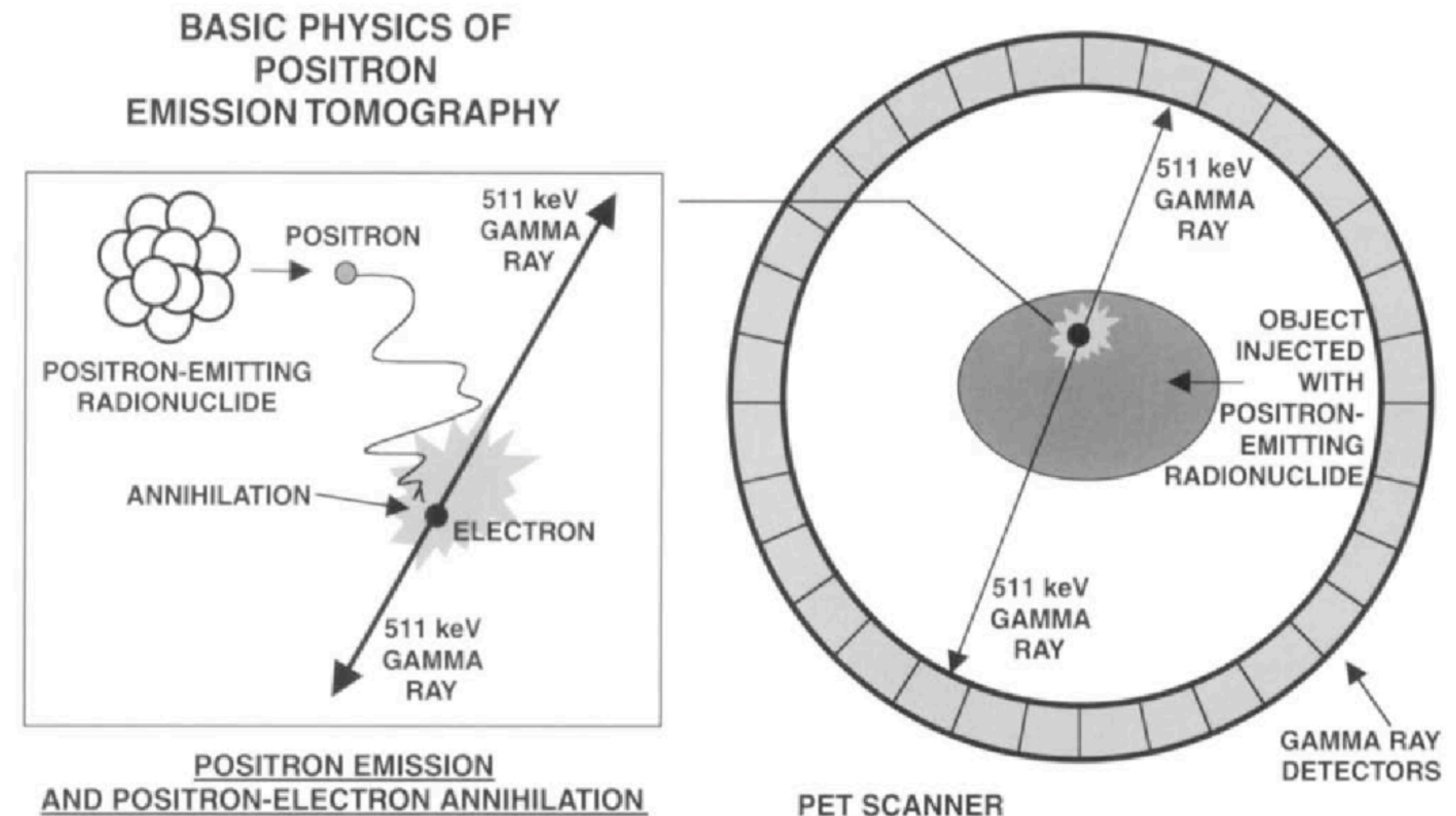




# Принципы работы и характеристики ПЭТ

Детекторы для ПЭТ должны удовлетворять следующим требованиям:

1. эффективность регистрации отдельного гамма- кванта с энергией 511 кэВ - около 80 %;
2. пространственное разрешение - 1-3 мм;
3. высокое временное разрешение (5 нс);
4. энергетическое разрешение  $< 100$  кэВ FWHM для отсеивания событий комптон-эффекта;
5. высокое быстродействие.





# Годоскоп УРАГАН

Модульная конструкция:

- 8 плоскостей, состоящих из 320 стримерных трубок
- Вумерная система считывания
- Система обработки данных позволяет реконструировать мюонные треки в режиме on-line и регистрировать поток мюонов в виде непрерывной последовательности 2D-изображений.
- Широкий диапазон зенитных углов (от 0 до 80 град.) с угловой точностью около 0,7 град.
- Пороговая энергия мюона - около 0,2 ГэВ

