

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

УДК 539.121.667

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Свойства позиционно-чувствительного детектора на основе монолитного  
кристалла GAGG и матрицы SiPM**

Научный руководитель

доцент

\_\_\_\_\_ Ф. А. Дубинин

Студент

\_\_\_\_\_ А. О. Журкина

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Введение</b>                              | <b>2</b>  |
| Цель и мотивация . . . . .                   | 2         |
| <b>ПЭТ-сканер</b>                            | <b>3</b>  |
| <b>Сцинтилляционные детекторы</b>            | <b>5</b>  |
| <b>Кремниевые фотоэлектронные умножители</b> | <b>6</b>  |
| <b>Экспериментальная установка</b>           | <b>7</b>  |
| <b>Проведенная работа</b>                    | <b>11</b> |
| <b>Заключение</b>                            | <b>35</b> |
| <b>Список используемых источников</b>        | <b>36</b> |

# ВВЕДЕНИЕ

Позитронно-эмиссионная томография – эффективный и современный метод диагностики онкологических заболеваний. В современных ПЭТ-сканерах для регистрации аннигиляционных гамма-квантов от радиофарм-препарата, вводимого пациенту, используются тысячи сцинтилляционных элементов, от размера которых зависит пространственное разрешение и, в конечном итоге, четкость изображения изучаемого органа [1]. Альтернативой большому количеству элементов ПЭТ является использование кристаллических пластин (monolithic detectors) с матрицами кремниевых фотоумножителей в качестве фотодетекторов.

## ЦЕЛЬ И МОТИВАЦИЯ

Целью данной научно-исследовательской работы является изучение свойств позиционно-чувствительного детектора на основе монолитного кристалла GAGG 12x12x12 и матрицы SiPM SensL ARRAYJ3002516P.

# ПЭТ-СКАНЕР

Позитронно-эмиссионная томография — активно развивающийся диагностический и исследовательский метод ядерной медицины. В основе этого метода лежит возможность при помощи специального детектирующего оборудования (ПЭТ-сканера) отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных позитрон-излучающими радиоизотопами. Метод основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов, возникающих при бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводят в организм обследуемого, с электронами. При аннигиляции позитрона, остановившегося в ткани организма, с одним из электронов среды рождается два гамма-кванта с одинаковой энергией, которые разлетаются в противоположные стороны под углом  $180^\circ$ . Принцип работы схематично представлен на рисунке 1 [2]. Большой набор детекторов, расположенных вокруг

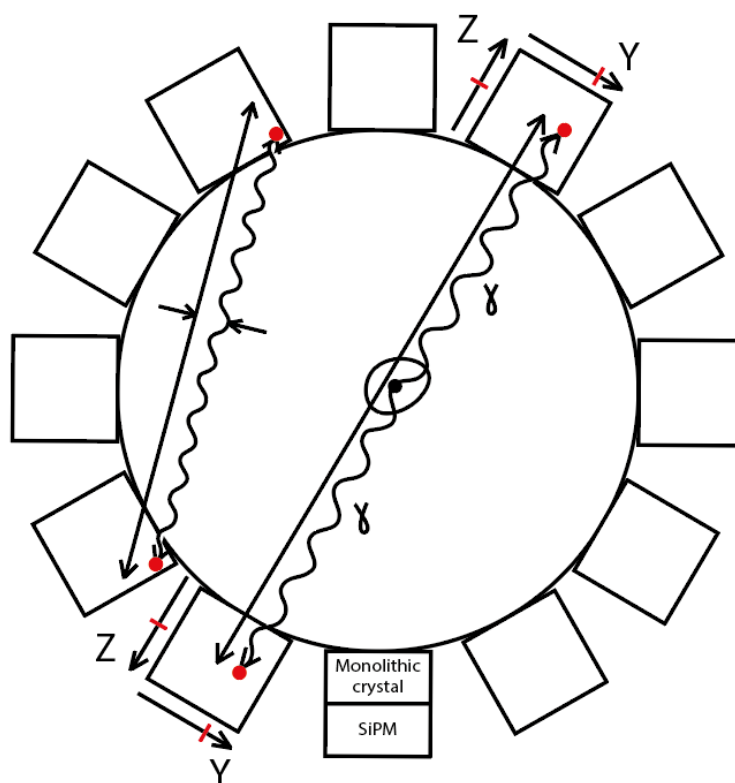


Рисунок 1 — Схематичное изображение принципа работы ПЭТ-сканера

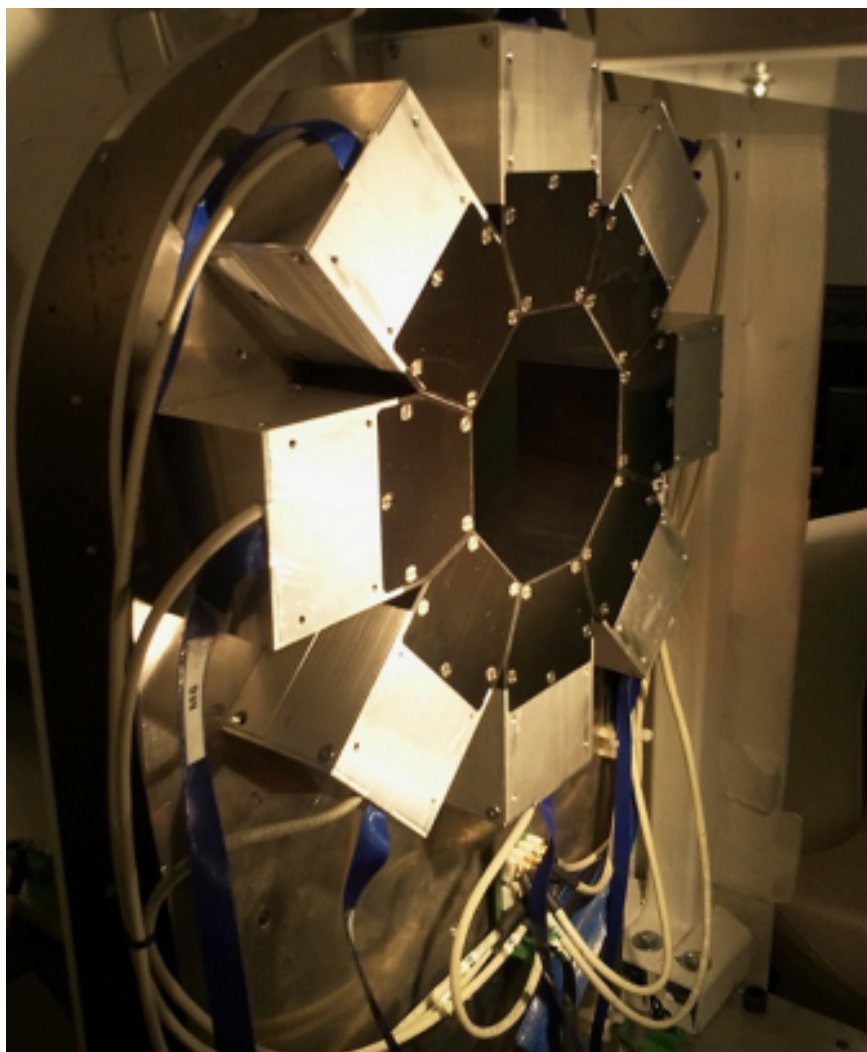


Рисунок 2 — ПЭТ-сканер для исследования внутренних органов маленького животного

исследуемого объекта, и компьютерная обработка сигналов с них позволяет выполнить трёхмерную реконструкцию распределения радионуклида в исследуемом объекте. ПЭТ-сканирование с использованием фтордезоксиглюкозы широко используется в клинической онкологии. В качестве примера на рисунке 2 представлен ПЭТ-сканер для исследования внутренних органов маленьких животных, состоящий из восьми съёмных одинаковых модулей, образующих восьмиугольник.

# СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Сцинтилляционный метод основан на регистрации коротких вспышек света – сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах в результате прохождения через них заряженных частиц. Каждая такая вспышка вызвана отдельной заряженной частицей и состоит из большого количества ( $10^3 - 10^6$ ) фотонов с энергией в несколько эВ. Сцинтилляции отличаются от других видов свечения, образующихся при взаимодействии частиц с веществом (например, свечения Вавилова–Черенкова) тем, что они возникают вследствие электронных переходов внутри центров свечения. Центром свечения может быть атом, молекула, ион или более сложное образование. Сцинтилляционный процесс можно разбить на три этапа:

- 1 – возбуждение заряженными частицами основного вещества, находящегося в твердой, жидкой или газообразной фазе (генерационный этап);
- 2 – перенос энергии, потерянной заряженной частицей в веществе к центрам свечения (миграционный этап);
- 3 – возбуждение и высвечивание центров свечения (внутрицентральной этап).

Для регистрации возникающих под действием отдельных ионизирующих частиц сцинтилляций обычно используются фотоэлектронные умножители – ФЭУ, в частности, кремниевые ФЭУ.

В данной работе был использован монокристаллический сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) ( $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ ). GAGG(Ce) является недавно разработанным сцинтилляционным кристаллом, обеспечивающим хорошую тормозную способность, физическую прочность, а также широкий спектр применимости. Это один из самых ярких доступных сцинтилляторов с пиком излучения на 520 нм.

# КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ

Кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiPM) – это фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) р-п-переходов (ячеек), выполненных на общей подложке (рис.1). Характерный размер ячейки составляет порядка 30–100 мкм. Все ячейки одинаковые. Все они объединены в общей точке токопроводящими шинами. Напряжение смещения всех ячеек общее и на несколько вольт (значение перенапряжения) превышает напряжение пробоя р-п-перехода. Каждая ячейка содержит токоограничивающий резистор, в результате чего гейгеровский разряд в ячейке ограничен. Сигнал каждой ячейки – логический и не зависит от числа первоначальных носителей, вызвавших срабатывание ячейки. Однако сам SiPM как целое представляет собой аналоговый детектор, так как его выходной сигнал равен сумме одинаковых сигналов р-п-переходов, сработавших при поглощении ими фотонов. В данной работе используется матрица SiPM 4x4 (SensL's SPMArray4).

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов:

1. Источник питания (x2) позволяет подать напряжение на матрицу и плату;
2. Матрица SiPM 4x4 (SensL's SPMArray4);
3. Считывающая плата на 16 каналов обеспечивает усиление сигналов с матрицы;
4. Монолитный сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce);
5. Дискриминатор CAEN модель N841 выдает на выходе стандартный прямоугольный NIM-сигнал («ворота»), необходим для привязки по переднему фронту импульса;
6. Инвертор (x2) CAEN модель N625 выдает сигнал обратной полярности;
7. Линия задержки (x2) CAEN модель N108A вызывает запаздывание сигнала на определённый промежуток времени;
8. Усилитель сигнала Phillips Scientific модель 775 позволяет получить на выходе усиленный сигнал;
9. Аналого-цифровой преобразователь CAEN модель V1785N преобразует входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал);
10. Зарядово-цифровой преобразователь CAEN модель V965A преобразует заряд (площадь сигнала) в цифровой вид (каналы).

Сцинтилляционный кристалл и матрица представлены на рисунке 3. Для сравнения в таблице 1 представлены основные характеристики для трех различных сцинтилляционных кристаллов: GAGG, LYSO,  $LaBr_3(Ce)$ . В таблице 2 приведены основные сведения о матрице SiPM (SensL's SPMArray4). Считывающая плата с установленной матрицей и сцинтилляционным кристаллом представлены на рисунке 4.



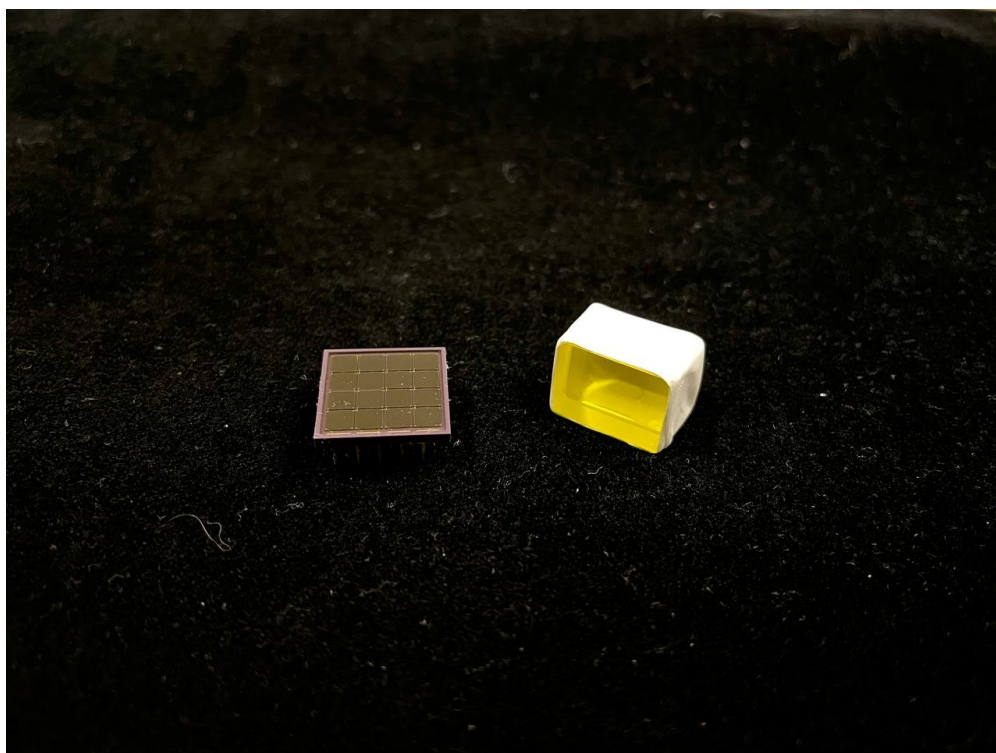


Рисунок 3 — Монолитный сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) и матрица SiPM(Sensl’s SPMArray4)

Таблица 1 — Основные характеристики сцинтилляционных кристаллов

| Parameter                      | GAGG   | LYSO | $LaBr_3(Ce)$ |
|--------------------------------|--------|------|--------------|
| $Z_{eff}$                      | 51     | 63   | 45           |
| Density, $g/cm^3$              | 6.6    | 7.1  | 5.1          |
| Luminescence decay time, ns    | 30-100 | 41   | 16           |
| Energy resolution (662 keV), % | 5      | 7    | 3            |
| Peak wavelength, nm            | 520    | 420  | 365          |
| Hygroscopicity                 | -      | -    | +            |
| Self-radioactivity             | -      | +    | +            |

Таблица 2 — Основные характеристики матрицы SiPM (Sensl’s SPMArray4)

| Parameter                          | Value       |
|------------------------------------|-------------|
| Array details, pixels              | 4 x 4       |
| Total pixel effective area, $mm^2$ | 13.4 x 13.4 |
| Pixel chip area, $mm^2$            | 3.16 x 3.16 |

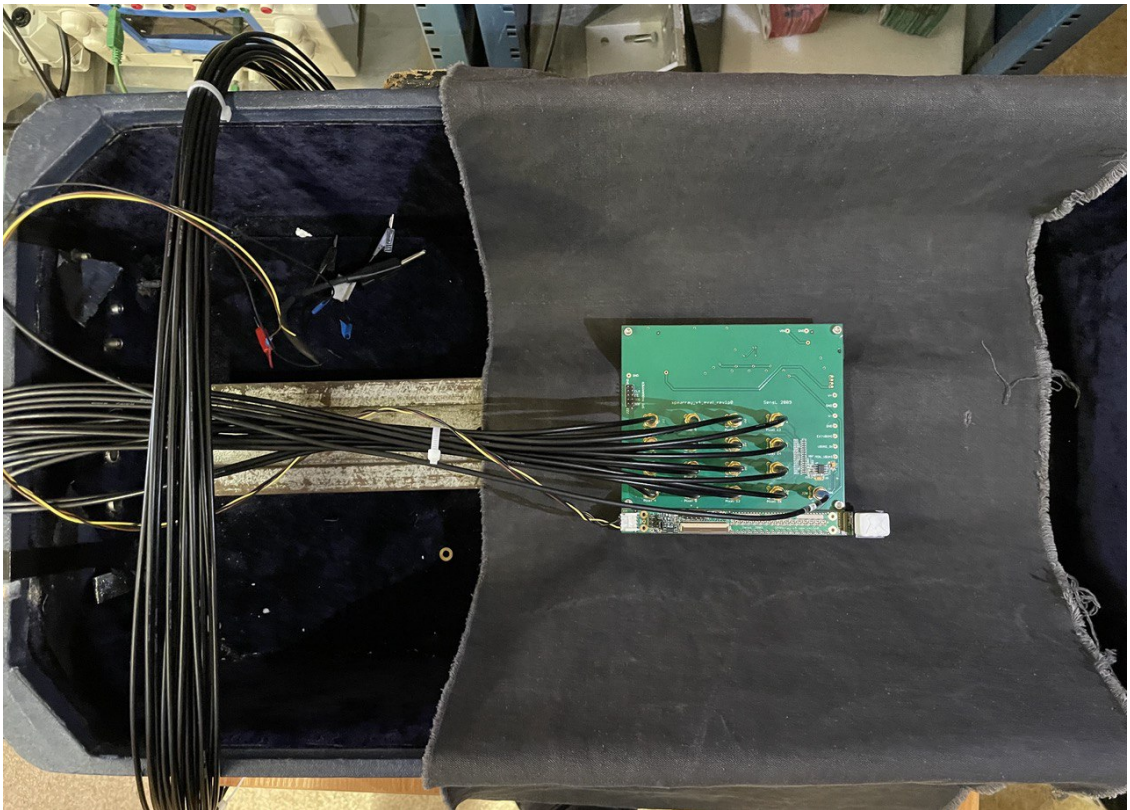


Рисунок 4 — Считывающая плата на 16 каналов с установленной матрицей SiPM (Sensl's SPMArray4) и монокристаллом GAGG(Ce)



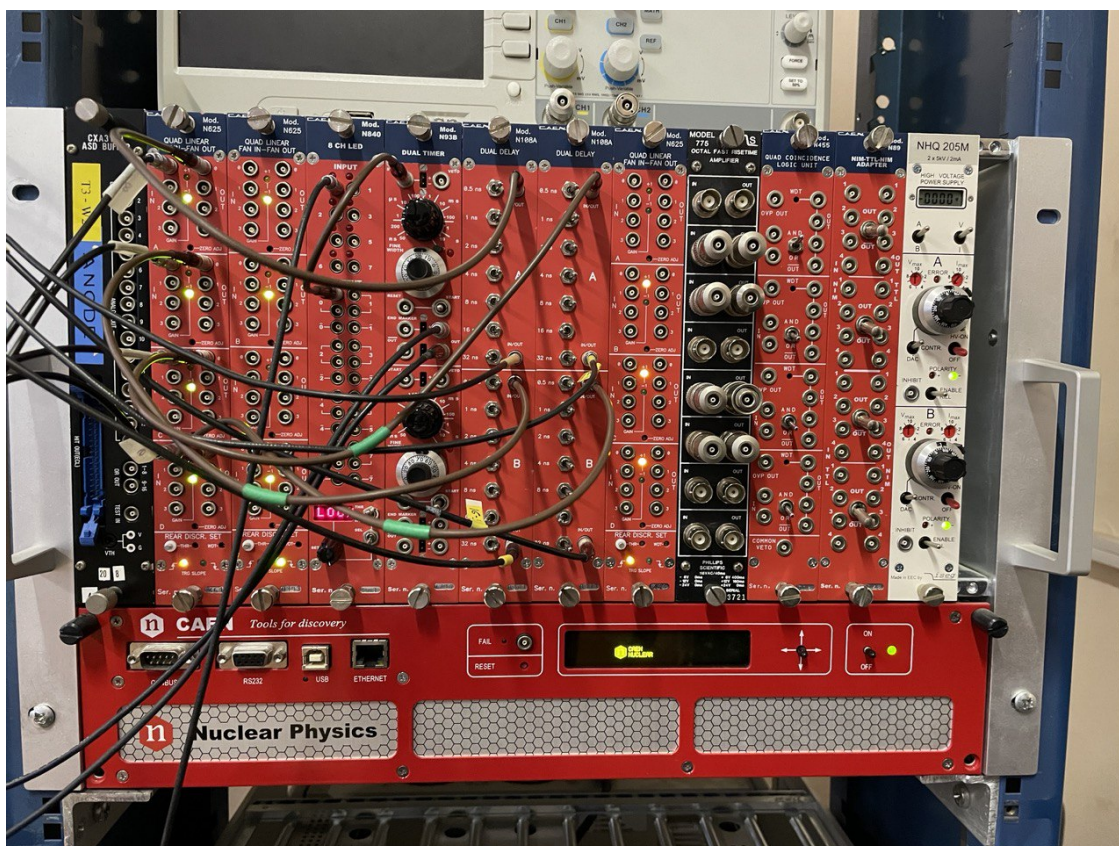


Рисунок 5 — NIM крейт с используемыми в работе модулями

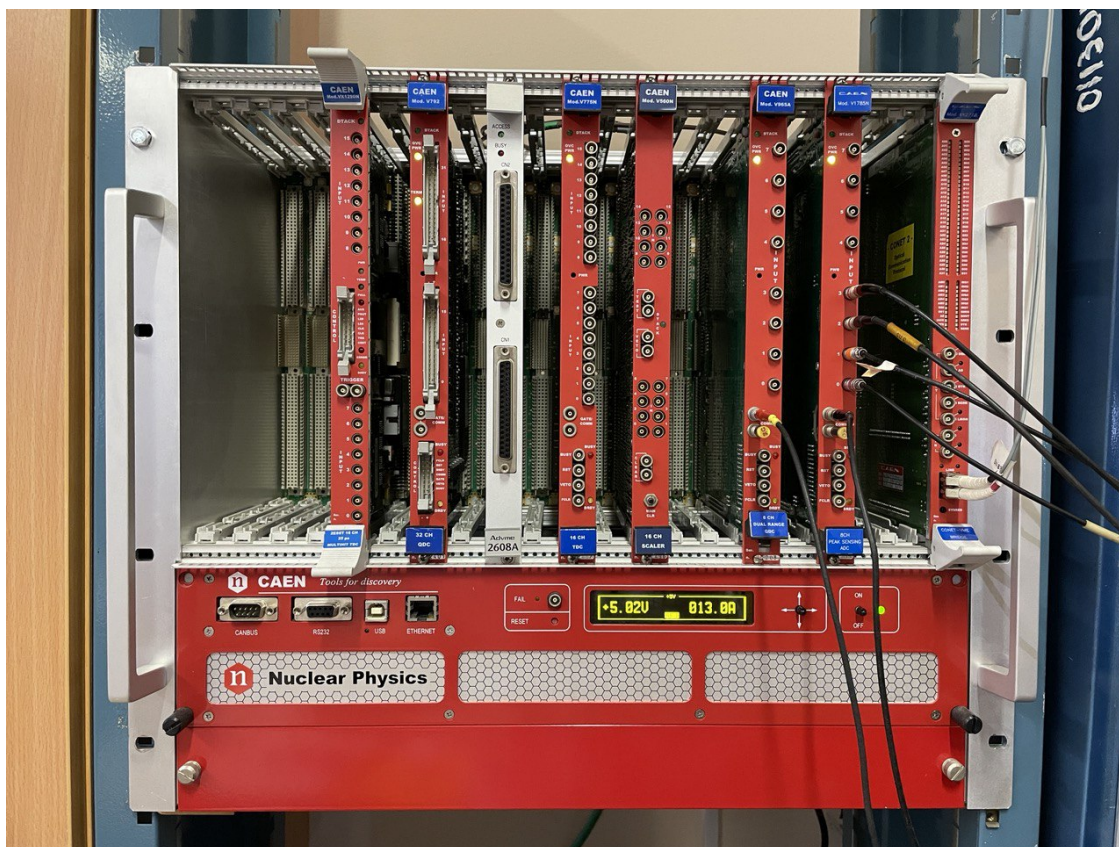


Рисунок 6 — VME крейт с используемыми в работе модулями

# ПРОВЕДЕННАЯ РАБОТА

В процессе данной работы было проведено ознакомление с теоретическими материалами по теме. Проведено ознакомление с принципами работы электроники (матрицей SiPM, NIM и VME крейтами). Ознакомление с матрицей производилось в процессе снятия осциллограмм и набора спектров Цезия-137. Были получены осциллограммы, спектры и соответствующие спектрам пьедесталы с одного из каналов и с суммарного канала матрицы. Схема установки, на которой проводились измерения представлена на рисунке 7.

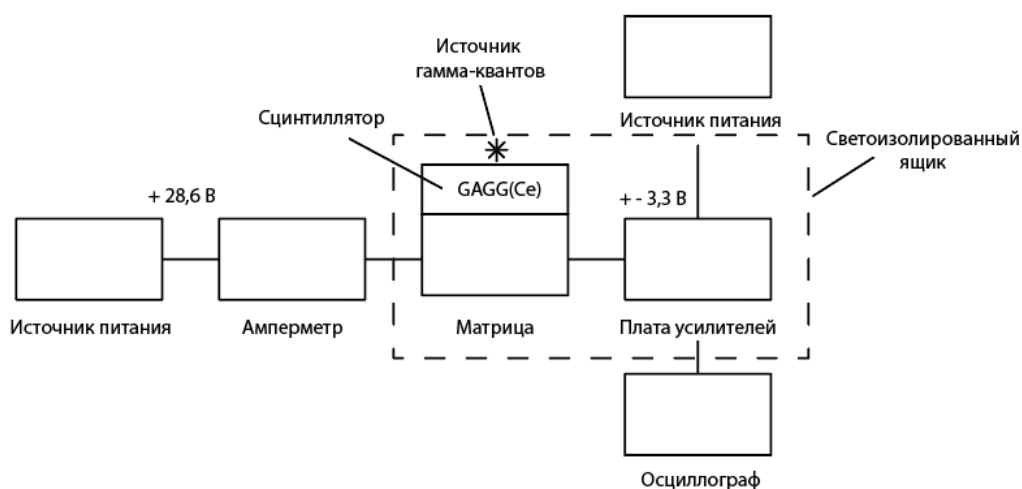
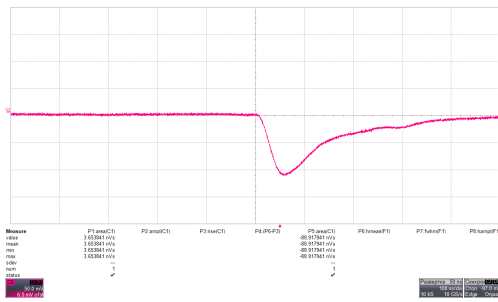
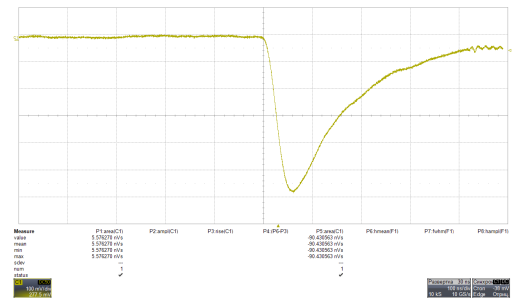


Рисунок 7 — Схема установки

На рисунке 8а представлена осциллограмма сигнала снятая с одного из каналов матрицы, на рисунке 8б – с суммарного канала матрицы. На рисунке 9 представлены оба сигнала для возможности визуального сравнения разницы амплитуд.



(a) Один из каналов матрицы



(б) Суммарный канал матрицы

Рисунок 8 — Осциллограммы сигнала с одного из каналов матрицы и суммарного канала матрицы

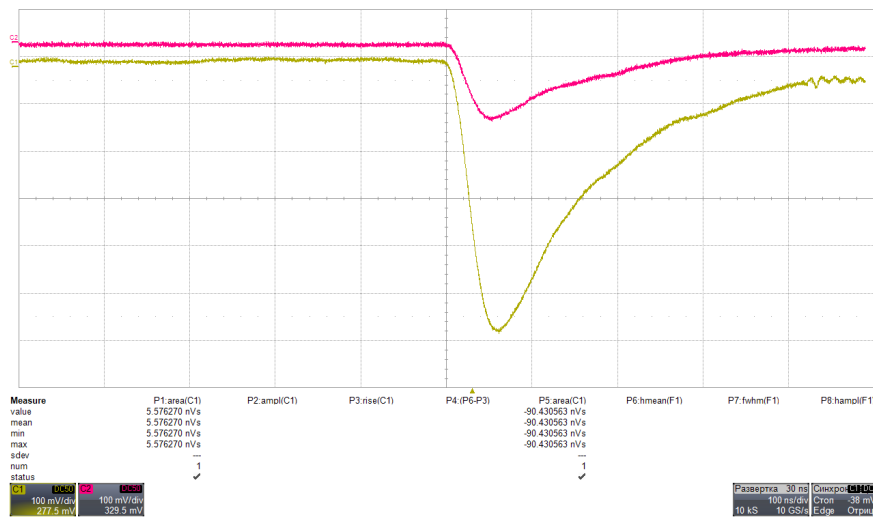
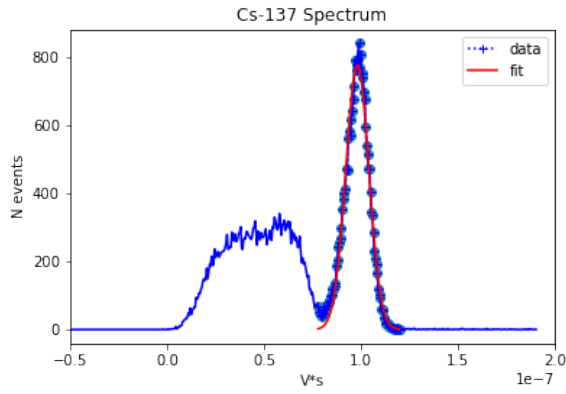
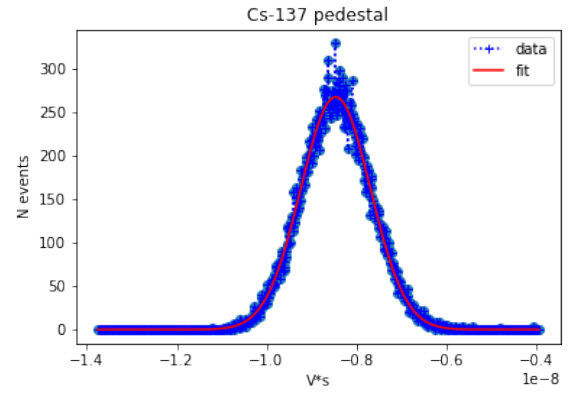


Рисунок 9 — Осциллограмма сигнала одного из каналов(розовый) и суммарного(желтый) канала матрицы

С использованием этой же схемы сняты спектры Цезия-137 с одного из каналов 10а и суммарного канала матрицы 11а и соответствующие спектрам пьедесталы рисунки 10б 11б соответственно.

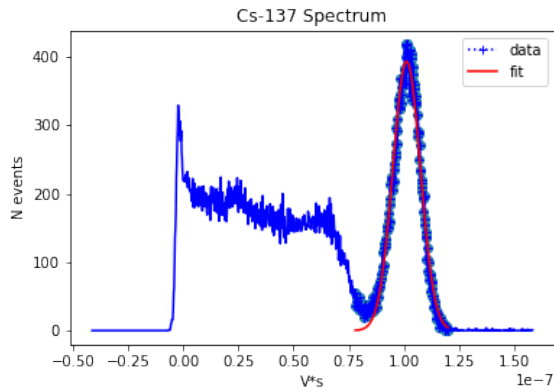


(а) Спектр

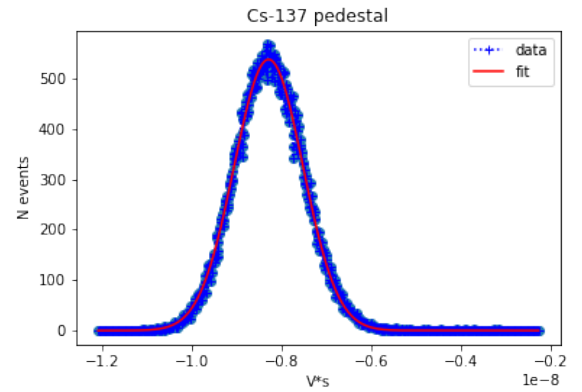


(б) Пьедестал

Рисунок 10 — Спектр Цезия-137 и соответствующий пьедестал снятый с одного из каналов матрицы



(а) Спектр



(б) Пьедестал

Рисунок 11 — Спектр Цезия-137 и соответствующий пьедестал снятый с суммарного канала матрицы

Фотопики спектров и соответствующие пьедесталы были профитированы распределением Гаусса. С помощью полученных параметров фитирования рассчитано относительное разрешение по формуле:

$$\delta = \frac{FWHM}{(N - N_p)}$$

где  $FWHM = 2,35\sigma$ ,  $N$  - положение максимума фотопика  $N_p$  - положение пика пьедестала.

$$\delta \approx 14\%$$



Собственное разрешение [3]:

$$\delta = 6\% (662 \text{ кэВ})$$

Далее была собрана установка для работы с 16 каналами матрицы одновременно. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 12

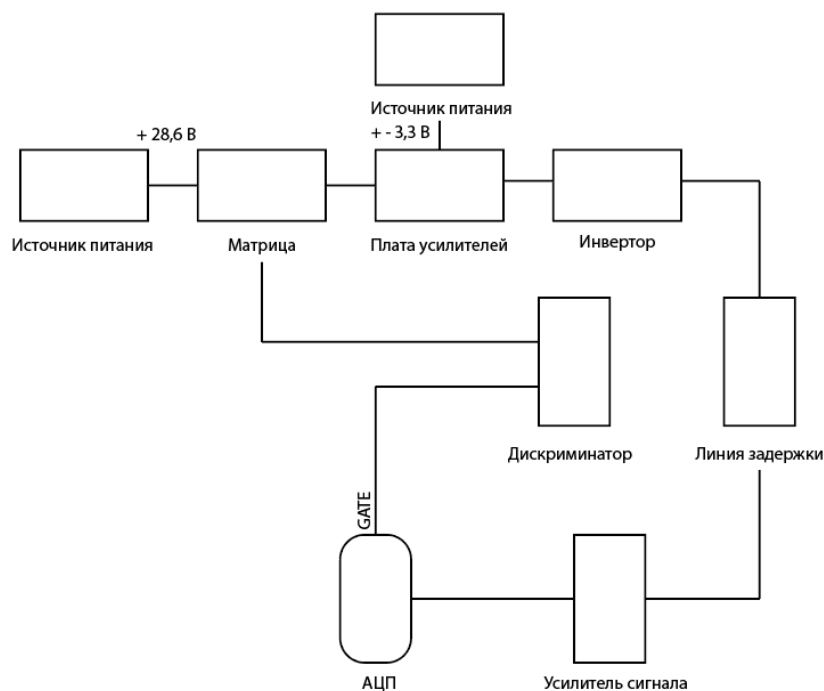


Рисунок 12 — Схема установки

Для одновременной работы со всеми 16 каналами было принято решение с 8 каналов снимать спектры с АЦП и с остальных 8 – с ЗЦП. В процессе сборки сцинтилляционного детектора была измерена временная задержка сигналов с каждого канала матрицы. Максимальная задержка для каждого канала составила 50 наносекунд.

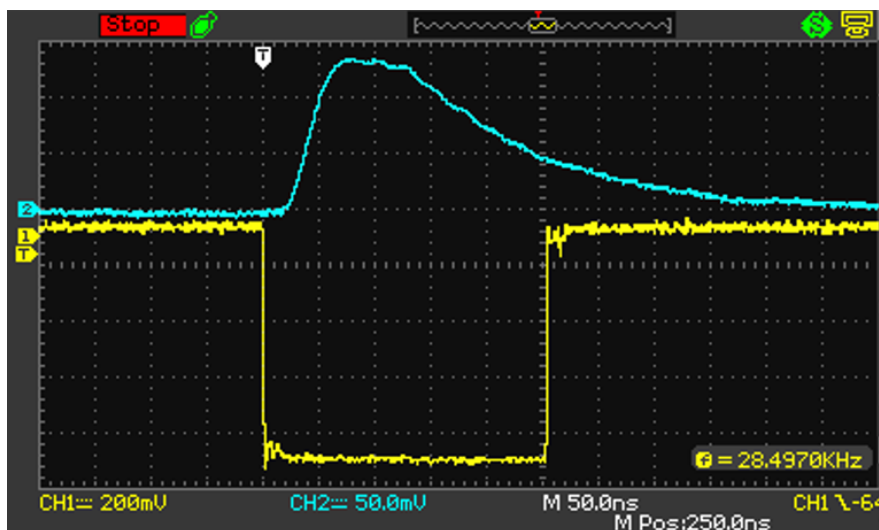


Рисунок 13 — Сигналы с одиночного канала матрицы(синий) и с суммарного канала(желтый)

На рисунке 13 представлено изображение, демонстрирующее положение и вид каждого из сигналов. Можно увидеть, что сигнал с одиночного канала(синий) расположен в воротах сигнала с суммарного канала(желтый). Далее была измерена задержка сигналов с каждого канала матрицы через инверторы, это позволило уменьшить задержку на 5-10 наносекунд. Были измерены длины кабелей, использованных в работе и сделаны выводы о задержках. Сигналы от 8 каналов матрицы подаются на инверторы через кабели длиной 2 метра (задержка составляет 10 наносекунд). После сигналы подаются на каналы АЦП через кабели длиной 60-80 сантиметров (задержка составляет 3-4 наносекунды). Для 4-х каналов матрицы были подключены временные задержки. Сигналы с инверторов подаются на временные задержки через кабели длиной 40 сантиметров (задержка составляет 2 наносекунды). Затем на 4 канала АЦП через кабели длиной 60-80 сантиметров (задержка составляет 3-4 наносекунды). В процессе измерений обнаружено, что сигналы с одиночных каналов имеют малую амплитуду (20 мВ). В связи с этим сигналы с временных задержек через кабели длиной 15 сантиметров (задержка составляет 1 наносекунду) были поданы на усилители, с которых через кабели длиной 60-80 сантиметров (задержка составляет 3-4 наносекунды) поданы на каналы АЦП. Таким образом задержка на кабелях по аналоговым каналам составила 17 наносекунд, по триггерному – 13 наносекунд. Была проверена работоспособность



каналов АЦП, посредством снятия спектров с каждого (1-8) канала.

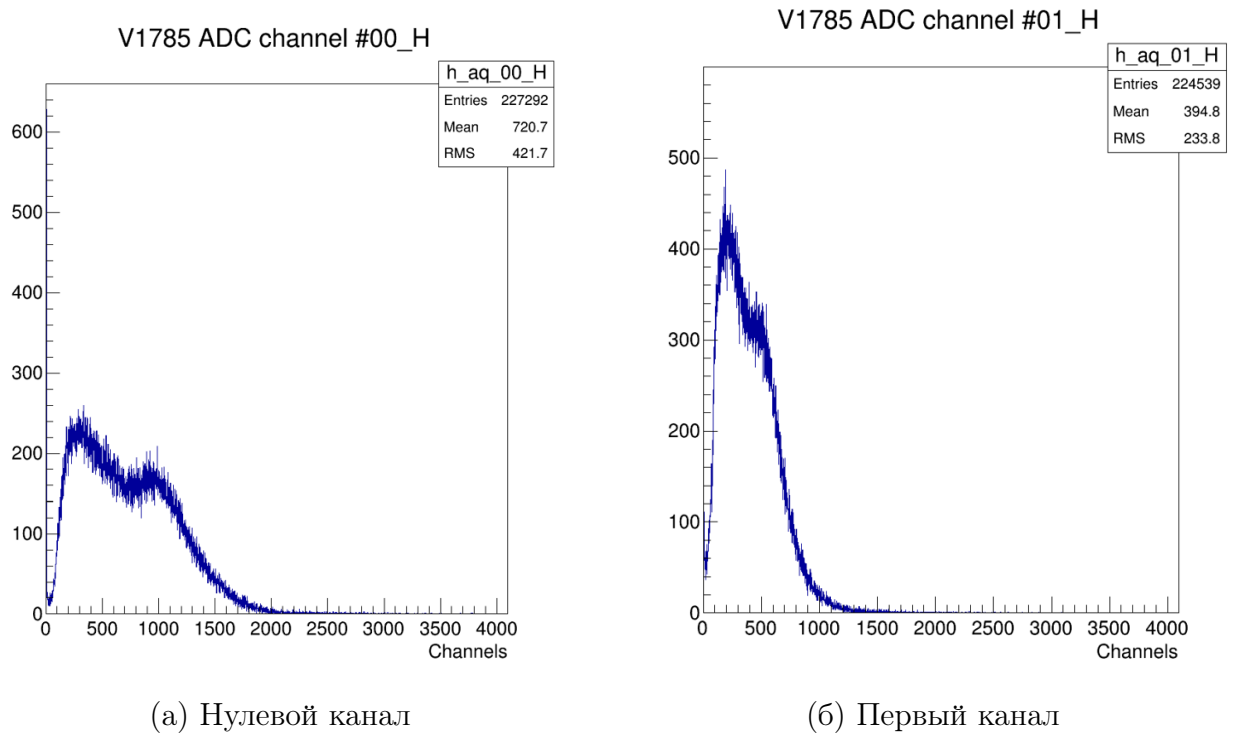


Рисунок 14 — Амплитудные спектры Цезия-137 с одиночных каналов матрицы

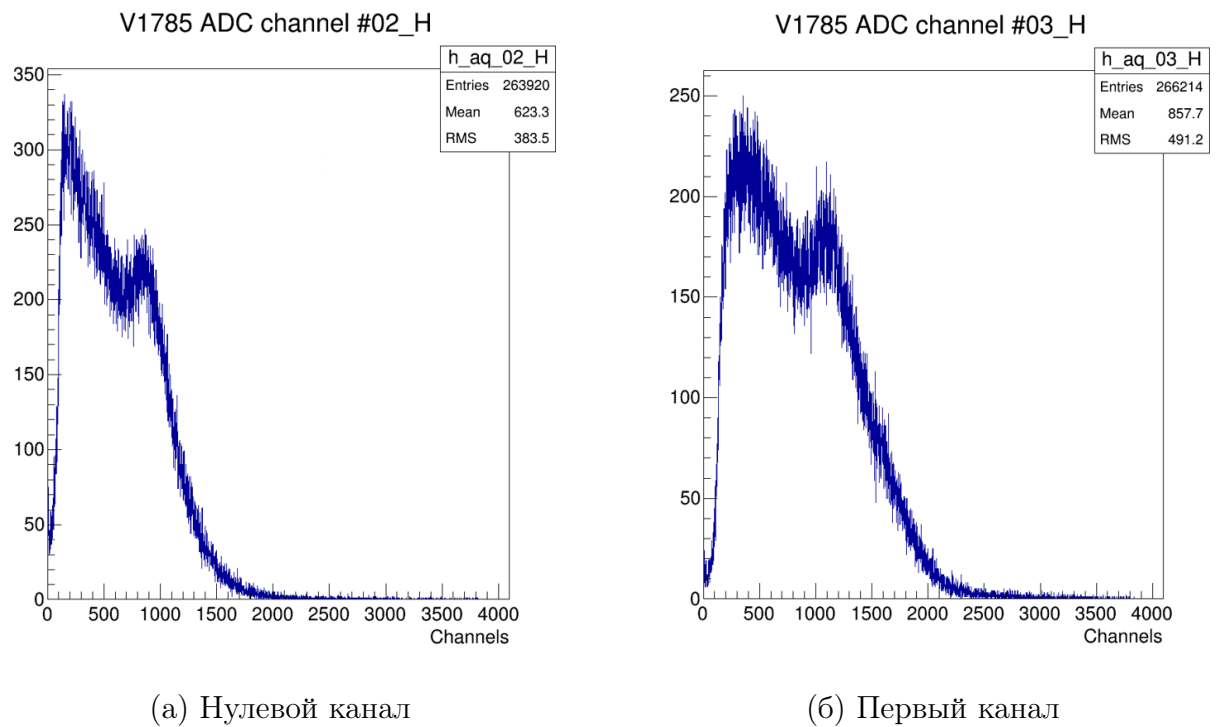


Рисунок 15 — Амплитудные спектры Цезия-137 с одиночных каналов матрицы

На рисунках 14 – 15 приведены некоторые из них. Все каналы исправно работают и получают сигнал. Также был снят сигнал с суммарного канала матрицы при помощи разветвителя и получен соответствующий спектр, на котором разрешены фотопик и комптон. Аналогичные манипуляции и измерения проведены с ЗЦП для остальных (8-16) каналов. В качестве результатов на рисунке 16 также приведены характерные спектры.

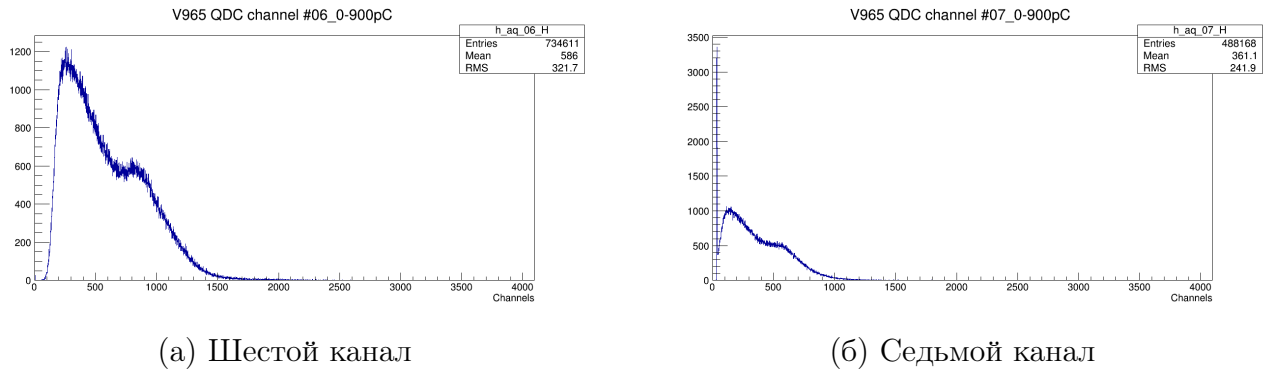


Рисунок 16 — Зарядовые спектры Цезия-137 с одиночных каналов матрицы

Следующей итерацией была произведена задержка сигналов на 30 наносекунд за счет дополнения установки 6-метровыми кабелями, подключенными к каждому каналу. Были сняты спектры с 8 каналов с АЦП и 8 каналов с ЗЦП.

Далее получена еще одна характеристика - пробой матрицы SiPM. Величина пробоя была получена при использовании источника-измерителя Keithley. На рисунке 17 представлена принципиальная схема установки.

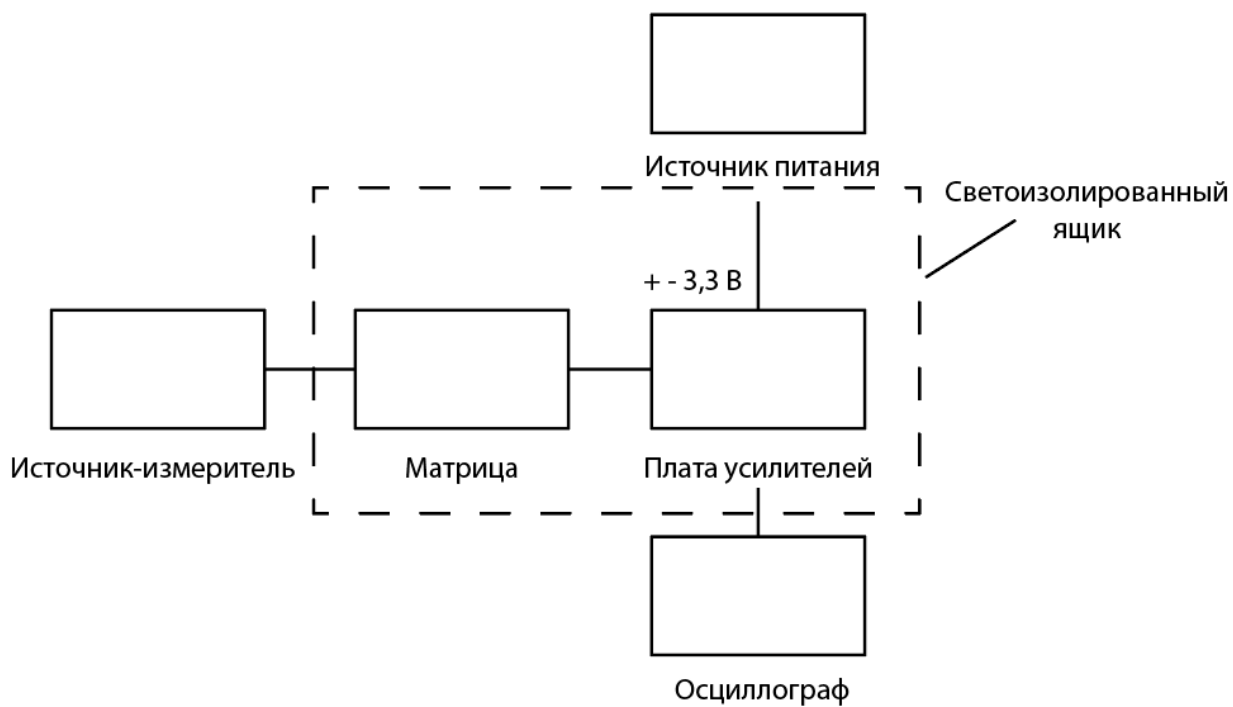


Рисунок 17 – Принципиальная схема установки

На рисунках 18 и 19 представлены вольт-амперные характеристики, из которых видно, что величина пробоя составила 26,3 вольта.

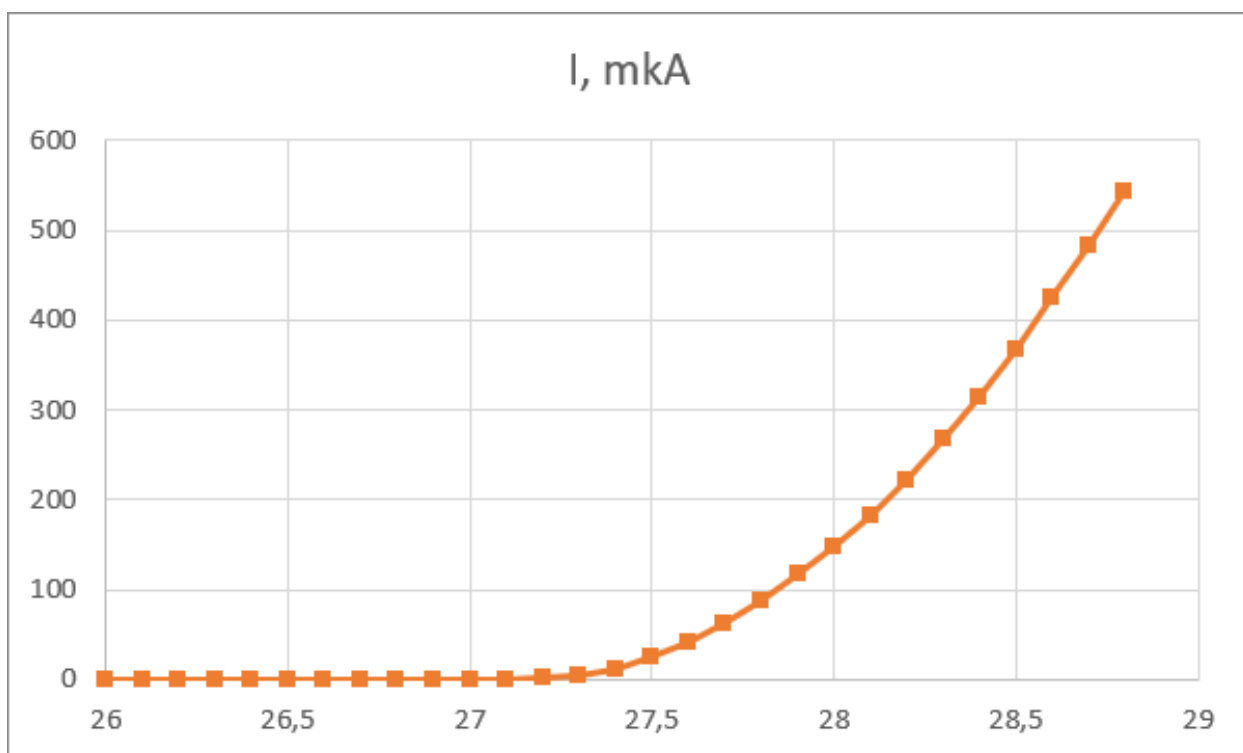


Рисунок 18 – Вольт-амперная характеристика

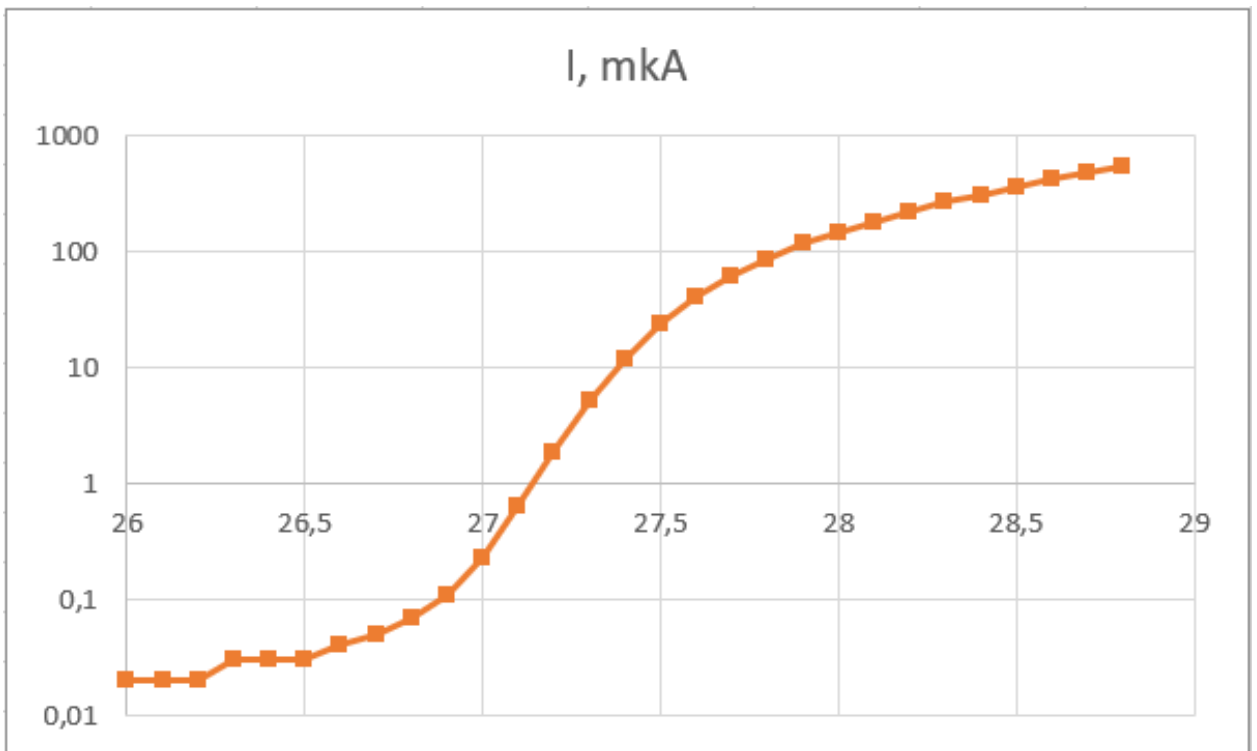


Рисунок 19 — Вольт-амперная характеристика в логарифмическом масштабе

Полученное значение пробоя матрицы является одной из важнейших характеристик и позволяет точно определить величину рабочего перенапряжения (2,3 В).

В процессе работы написана программа для восстановления координаты XY-взаимодействия. С каждого кодировщика получены данные, в качестве демонстрации формата которых на рисунке 20 представлено несколько событий.

```

iev/I:data[16]/F
8030267 -1 -1 -1 3441 -1 2261 -1 2019 -1 3016 -1 2755 -1 1805 -1 2250
8030268 -1 1599 -1 1789 -1 -1 -1 -1 1190 -1 1707 -1 1768 -1 1615
8030269 -1 1631 -1 1809 -1 1207 -1 723 -1 873 -1 1765 -1 1509 -1 1807
8030270 -1 3029 -1 3496 -1 -1 -1 -1 1413 -1 2706 -1 3125 -1 2797
8030272 -1 1958 -1 1761 -1 1335 -1 1141 -1 1216 -1 1796 -1 1640 -1 1780
8030273 -1 2525 -1 2552 -1 2546 -1 1789 -1 2167 -1 3256 -1 2659 -1 2229
8030274 -1 2753 -1 2942 -1 2080 -1 2101 -1 2078 -1 2649 -1 2235 -1 2562
8030275 -1 2566 -1 3568 -1 3832 -1 1844 -1 2550 -1 -1 -1 3317 -1 2709
8030276 -1 1263 -1 1489 -1 1527 -1 716 -1 1093 -1 2142 -1 1551 -1 1322
8030277 -1 -1 -1 -1 -1 3278 -1 2735 -1 2064 -1 3025 -1 2954 -1 2338
8030278 -1 1122 -1 1310 -1 1109 570 75 -1 860 -1 1774 -1 996 -1 1391
8030279 -1 3095 -1 -1 -1 3811 -1 1443 -1 2645 -1 4037 -1 2743 -1 2147
8030280 -1 3083 -1 -1 -1 2731 -1 2161 -1 2342 -1 3412 -1 2464 -1 3159
8030281 -1 3559 -1 4010 -1 3566 -1 1739 -1 2843 -1 -1 -1 3510 -1 1987
8030282 -1 1731 -1 2588 -1 1529 -1 759 -1 1559 -1 1616 -1 1468 -1 1245
8030283 -1 1508 -1 2507 -1 2081 -1 1456 -1 1255 -1 2321 -1 2308 -1 1435
8030284 -1 3385 -1 4081 -1 -1 -1 3061 -1 2907 -1 2902 -1 3475 -1 3083
8030285 -1 1189 -1 1786 -1 1184 -1 620 -1 1009 -1 1960 -1 1484 -1 911
8030286 -1 695 -1 535 2963 375 -1 642 -1 588 -1 1344 -1 1100 -1 746
8030287 -1 3047 -1 -1 -1 -1 -1 2024 -1 2184 -1 -1 -1 2809 -1 2761
8030288 -1 830 -1 1592 -1 978 2961 376 -1 919 -1 1388 -1 1102 -1 1153
8030289 -1 1096 -1 1169 -1 865 1972 251 -1 914 -1 959 -1 1285 -1 704
8030290 -1 934 -1 1204 -1 959 2361 300 -1 1013 -1 819 -1 872 -1 1049
8030291 -1 3479 -1 3876 -1 -1 -1 3077 -1 1727 -1 3218 -1 3024 -1 2807
8030292 -1 2889 -1 2323 -1 3466 -1 1828 -1 1641 -1 2699 -1 3875 -1 -1
8030293 -1 844 -1 589 -1 977 359 48 1306 170 -1 1154 -1 777 -1 619
8030295 -1 3547 -1 3760 -1 -1 -1 2065 -1 2313 -1 4018 -1 3428 -1 2346
8030296 -1 2499 -1 -1 -1 -1 -1 2262 -1 1594 -1 2267 -1 1914 -1 1859
8030297 -1 1790 -1 2944 -1 2226 -1 2183 -1 1916 -1 2611 -1 2921 -1 2384
8030298 -1 2156 -1 2408 -1 1905 -1 714 -1 1093 -1 2277 -1 1548 -1 1193
8030299 -1 2202 -1 2239 -1 2761 -1 1154 -1 1580 -1 3382 -1 2488 -1 2576
8030300 -1 3105 -1 2633 -1 2513 -1 1692 -1 2201 -1 3305 -1 2986 -1 2635
8030533 -1 1299 -1 2026 -1 1716 -1 872 -1 825 -1 1713 -1 1885 -1 1303
8030534 -1 2201 -1 3066 -1 -1 -1 3095 -1 1942 -1 3296 -1 3155 -1 3251
8030535 -1 1043 -1 1109 -1 1291 -1 700 -1 926 -1 1484 -1 1685 -1 1339
8030536 -1 2248 -1 1764 -1 1703 -1 882 -1 1638 -1 2614 -1 1687 -1 1019
8030537 -1 3130 -1 2823 -1 2526 -1 1657 -1 2268 -1 3168 -1 2852 -1 1986
8030538 -1 1473 -1 2681 -1 1545 -1 1849 -1 1333 -1 2563 -1 2636 -1 3524
8030540 -1 1739 -1 3039 -1 2635 -1 1282 -1 1620 -1 2945 -1 2499 -1 2427
8030542 -1 1987 -1 2652 -1 2556 -1 2223 -1 2482 -1 2561 -1 2250 -1 2538
8030543 3667 464 -1 590 4051 526 301 41 3307 421 -1 865 -1 584 -1 716

```

Рисунок 20 — Данные полученные с 8-канального модуля ЗЦП

В таком виде данные поступают на вход программы. В основе алгоритма программы по восстановлению координат лежит ангерова логика, принцип которой описывается следующим образом:

$$X = \frac{\sum_i x_i \cdot \omega_i}{\sum_i \omega_i} \quad Y = \frac{\sum_i y_i \cdot \omega_i}{\sum_i \omega_i} \quad (1)$$

где  $x_i$  - координата центра  $i$ -ой ячейки матрицы в миллиметрах,  $\omega_i$  - вес  $i$ -ой ячейки в каналах [4]. В качестве результатов работы программы получено распределение по координате X, представленное на рисунке 21.

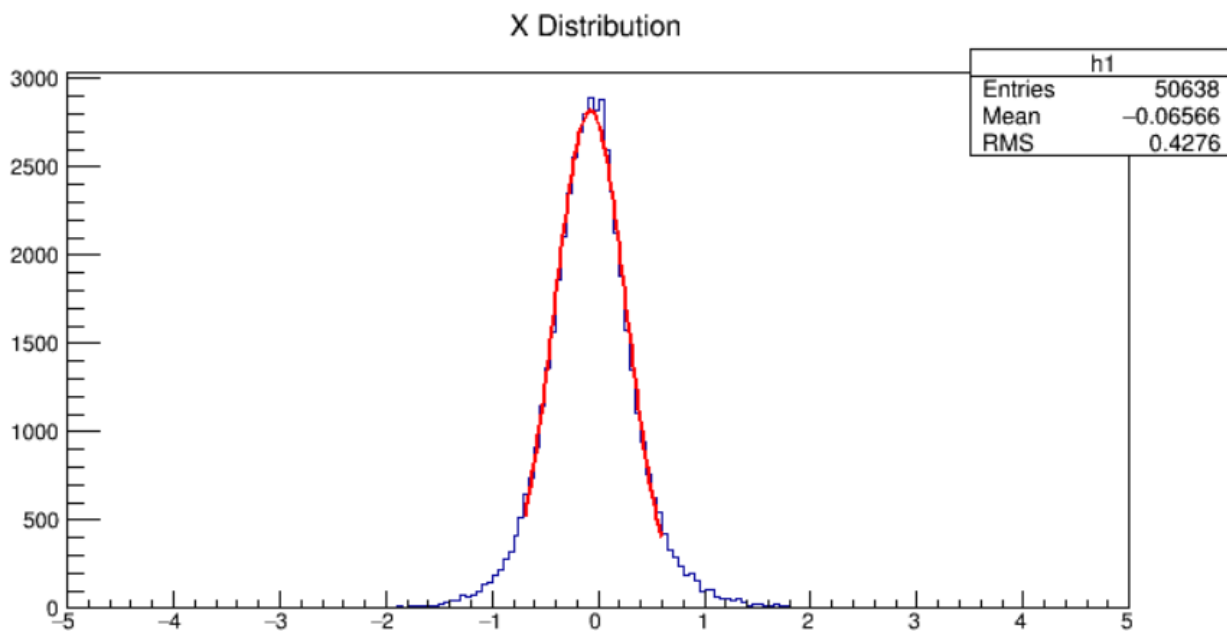


Рисунок 21 — Распределение по координате X

Полученное распределение было профитировано распределением Гаусса. Параметры фитирования приведены в таблице 3. На данный момент

Таблица 3 — Параметры фитирования распределения по координате X

| Parameter | Value  | Error |
|-----------|--------|-------|
| Const     | 2819   | 18    |
| Mean, mm  | -0.072 | 0.002 |
| Sigma, mm | 0.338  | 0.002 |
| FWHM, mm  | 0.794  | 0.004 |

удалось получить только распределение по координате X (длинная сторона матрицы). Координату Y (короткая сторона матрицы) восстановить не удастся по причине того, что нет возможности одновременно опрашивать все 16 каналов одним кодировщиком.

Для проверки корректности работы программы была проведена симуляция событий для 16 каналов. За основу симуляции взято оценочное число фотонов (12000 шт), распределенное по двумерному Гауссу. Для оценки коэффициента пересчета числа фотонов в номер канала был проведен следующий расчет:  $60000 \text{ фотонов/МэВ} \cdot 0,662 \text{ МэВ} = 40000 \text{ фотонов}$ , где  $60000 \text{ фотонов/МэВ}$  - световыход сцинтилляционного кристалла GAGG,

0,662 МэВ - положение фотопика спектра Цезия-137. Тогда на каждый из 16 SiPM матрицы в среднем приходится:  $40000 \text{ фотонов}/16 = 2500 \text{ фотонов}$ . При эффективности регистрации SiPM в 30% имеем:  $2500 \text{ фотонов} \cdot 0,3 = 745 \text{ сработавших ячеек}$ . 745 сработавших ячеек соответствует 3000-му каналу ЗЦП. Тогда коэффициент пересчета:

$$k = 3000/745 = 4.$$

В качестве результатов симуляции на рисунках 22 и 23 представлены двумерное распределение по координатам X, Y и одномерное распределение по координате X соответственно.

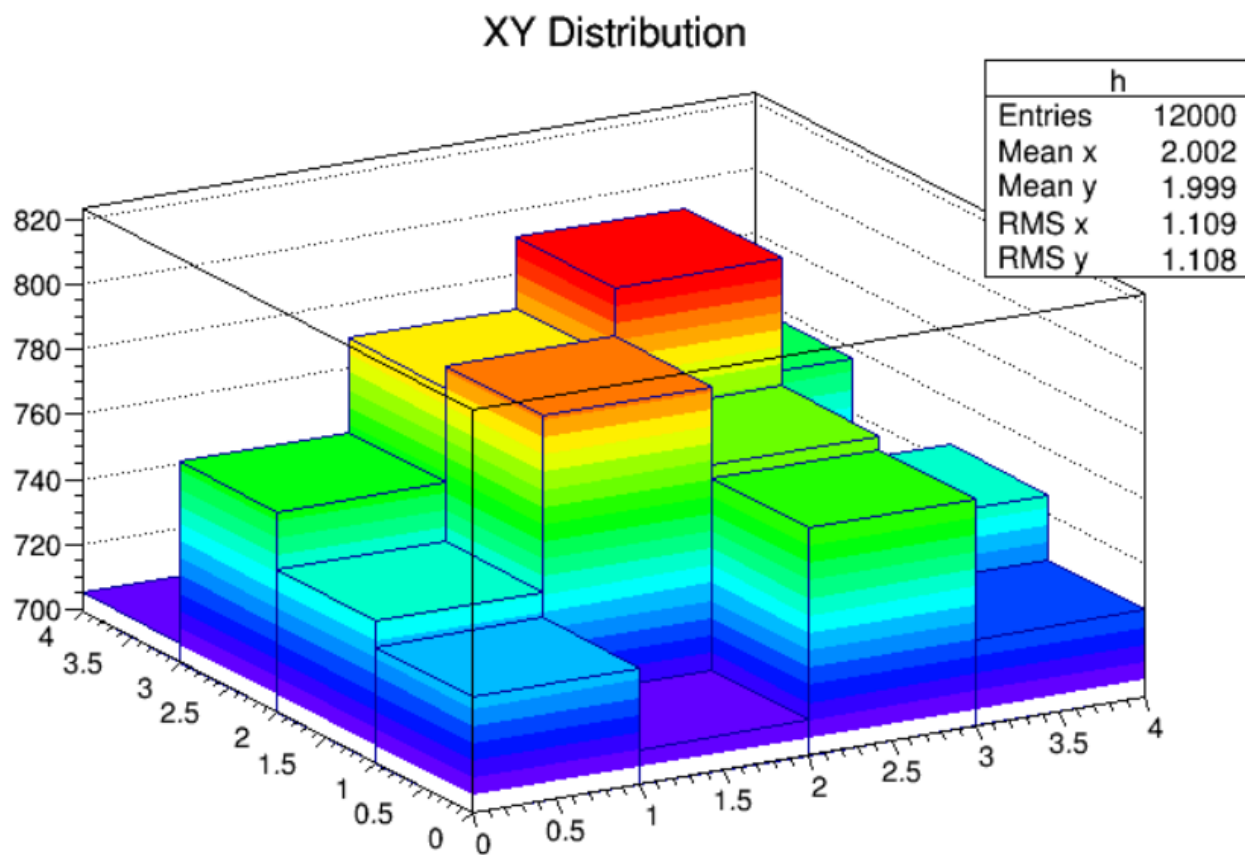


Рисунок 22 — Двумерное распределение по координатам X, Y

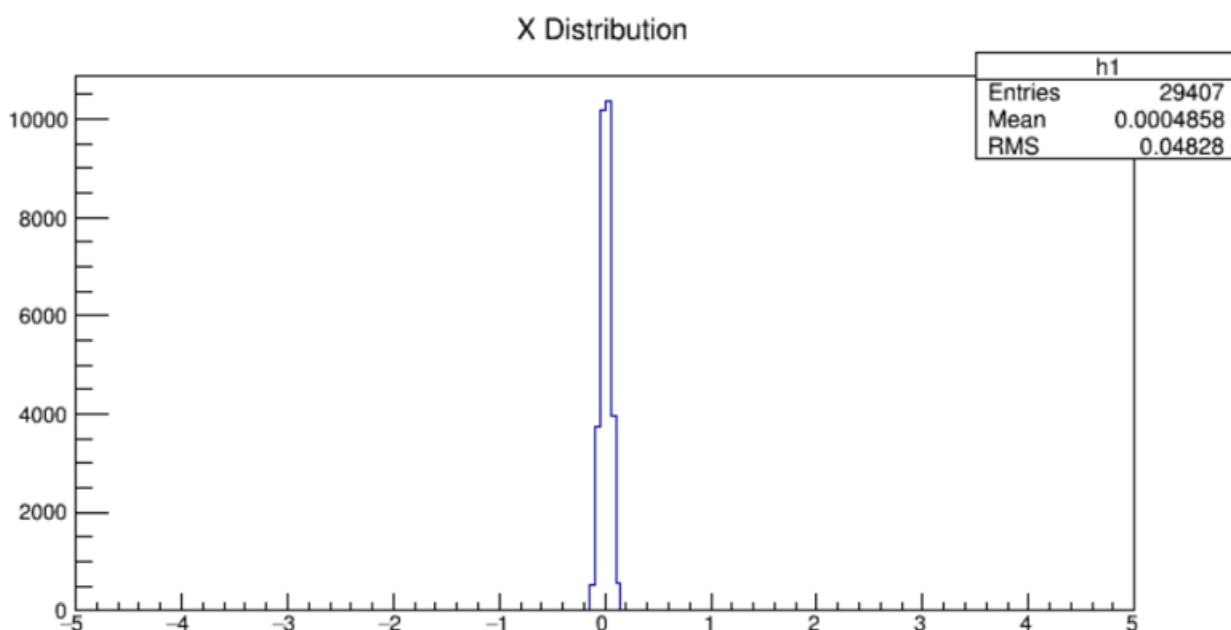


Рисунок 23 — Распределение по координате X

Причины несогласованности полученных данных сейчас являются объектом обсуждений и требуют дальнейшего исследования.

Следующей выполненной задачей является прототипирование и изготовление маски для точного позиционирования калибровочного сцинтиляционного кристалла. В связи с асимметрией размеров матрицы по осям X и Y было принято решение изготавливать две отдельные составляющие: крышку и помещаемую в нее маску. Это решение позволит, изготовив одну единицу маски оптимальной конфигурации, помещать ее в крышку 4 разными способами для возможности работы с каждым каналом. На рисунке 24 представлены модели крышки и маски соответственно.



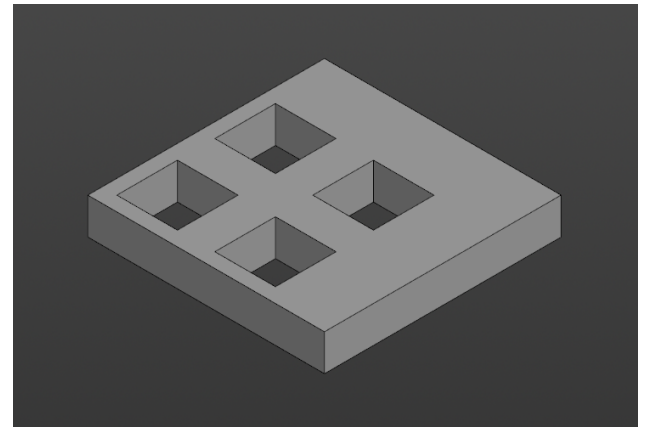
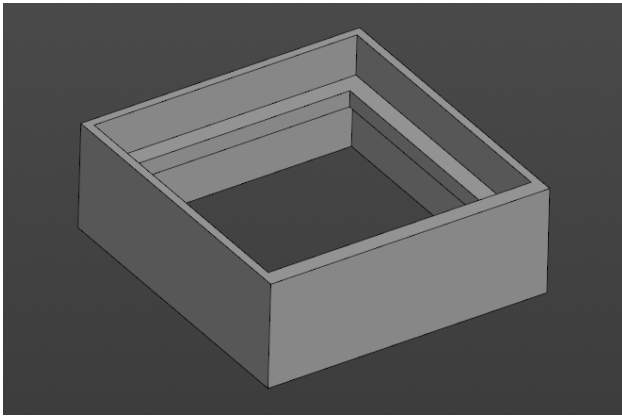


Рисунок 24 — Модели крышки и маски

Также на рисунке 25 представлена изготовленная маска, установленная на матрицу, с помещенным в нее калибровочным сцинтилляционным кристаллом.



Рисунок 25 — Установленная на матрицу маска для точного позиционирования калибровочного сцинтилляционного кристалла

Также были осуществлены попытки включения в измерения температурных коррекций работы матрицы. Наблюдаемая температурная зависимость SiPM от температуры обусловлена зависимостью напряжения пробоя от температуры. При таком предположении получаем:  $dA/dT = (dA/dU)(dU/dT)$  и  $dG/dT = (dG/dU)(dU/dT)$ . Разделение этих двух уравнений дает  $(dA/dT)(dG/dT) = (dA/dU)(dG/dU)$ . Это связывает четыре зависимости друг с другом и дает два метода для расчета зависимости амплитуды от коэффициента усиления  $dA/dG$ . Один из них основан на температурных измерениях,  $(dA/dG)_T = (dA/dT)(dG/dT)$ , а другой основан на измерениях напряжения,  $(dA/dG)_U = (dA/dU)(dG/dU)$  [5]. Был выбран второй метод и получено распределение  $dA/dU$ . На рисунке 26 представлена зависимость усиления G от напряжения U. Зависимость имеет нелинейный характер, причиной чего могло послужить влияние оптической связи и других факторов. Полученные результаты требуют дальнейшего более глубокого анализа, а также учета измеренного напряжения пробоя.

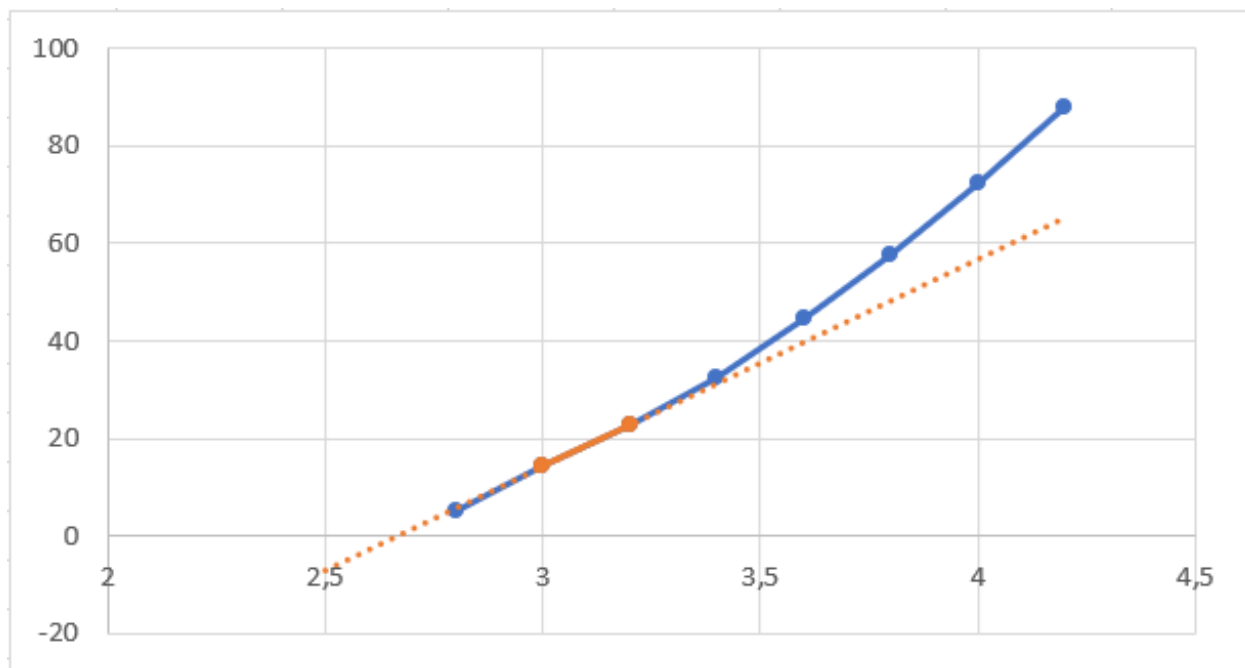


Рисунок 26 — Зависимость усиления G от напряжения U

Следующая итерация измерений проводилась с использованием матрицы кремниевых фотоумножителей SensL ARRAYJ3003516P и сцинтилляционного кристалла GAGG(Ce) 12x12x12. Матрица, чертеж с габаритными размерами и схема подключения представлены на рисунках 27а, 27б

и 27В соответственно.

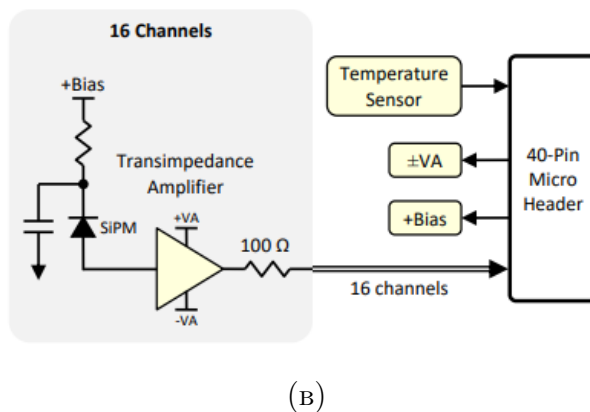
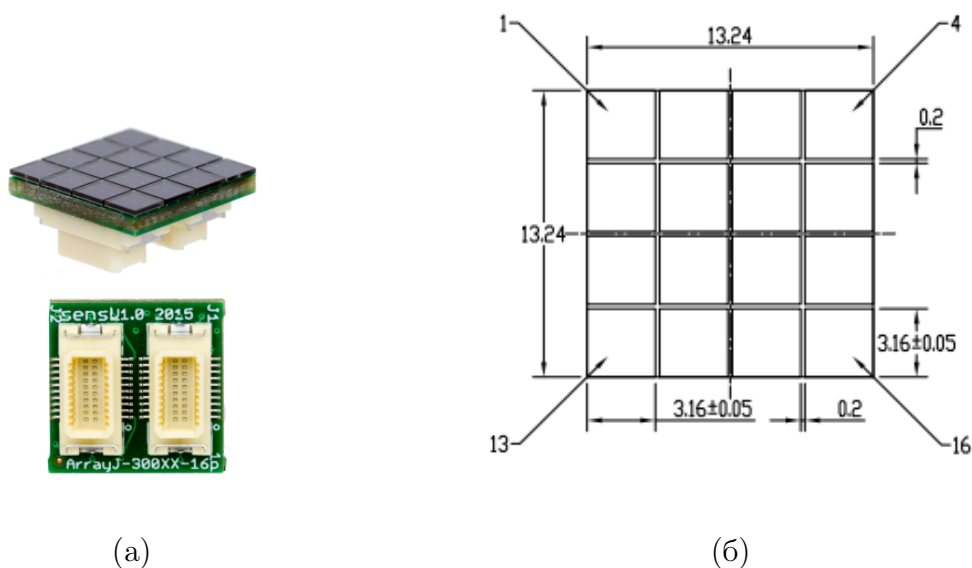


Рисунок 27 — Общие сведения о матрице SensL ARRAYJ3003516P: а - матрица; б - чертеж матрицы с габаритными размерами; в - электронная схема подключения матрицы

В качестве считывающей электроники использовался Petiros 2A. Petiros 2A - это 32-канальный ASIC (application-specific integrated circuit, “интегральная схема для конкретного применения”), предназначенный для считывания данных с кремниевых фотоумножителей (SiPM). Petiros 2A сочетает в себе возможность точных измерений заряда и времени. Энергия и время оцифровываются внутри прибора с помощью 10-битных АЦП и ВЦП. Концепция ASIC заключается в объединении двух отдельных линий для измерения времени первого падающего фотона и интегрирования заряда, собранного со всего кристалла. Также существует возможность регули-

ровки высокого напряжения SiPM с помощью канального входного ЦАП. Это позволяет точно регулировать усиление SiPM и темновой шум. Электронная схема представлена на рисунке 28.

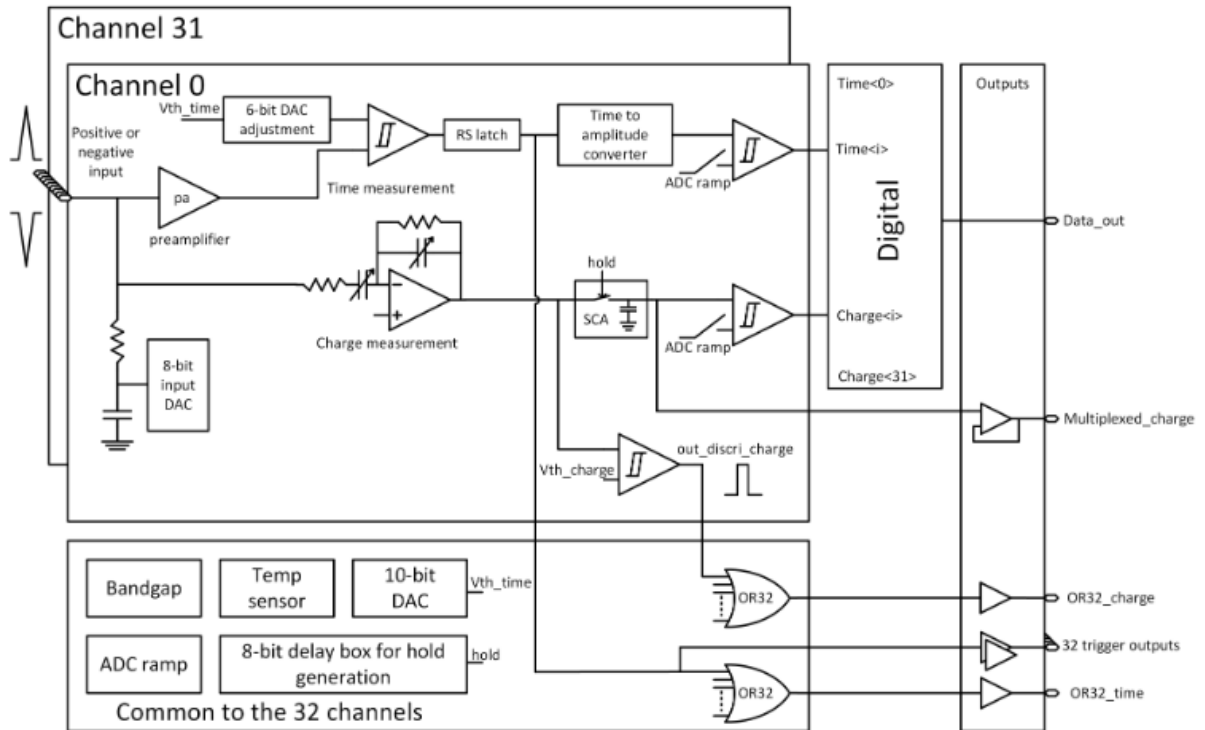


Рисунок 28 — Электронная схема Petiros 2A

Основное применение Petiros 2A - прототипирование ПЭТ, основанных на томографах по времени пролета, но он также может быть использован для любых задач, требующих точного временного разрешения и точного измерения энергии. С использованием Petiros для оценки коэффициента усиления получены одноэлектронные спектры с каждого канала двух 16-канальных матриц. Принципиальная схема установки для калибровки коэффициента усиления каналов матриц представлена на рисунке 29.

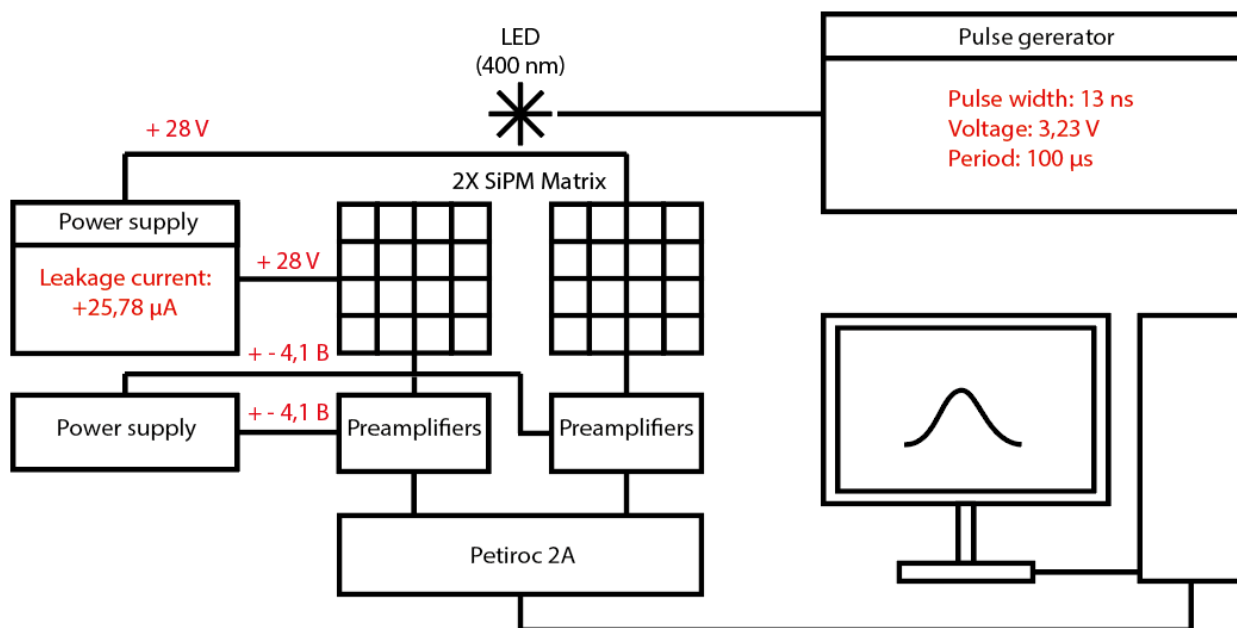


Рисунок 29 — Принципиальная схема установки для калибровки коэффициента усиления

Пример одного из таких спектров представлен на рисунке 30.

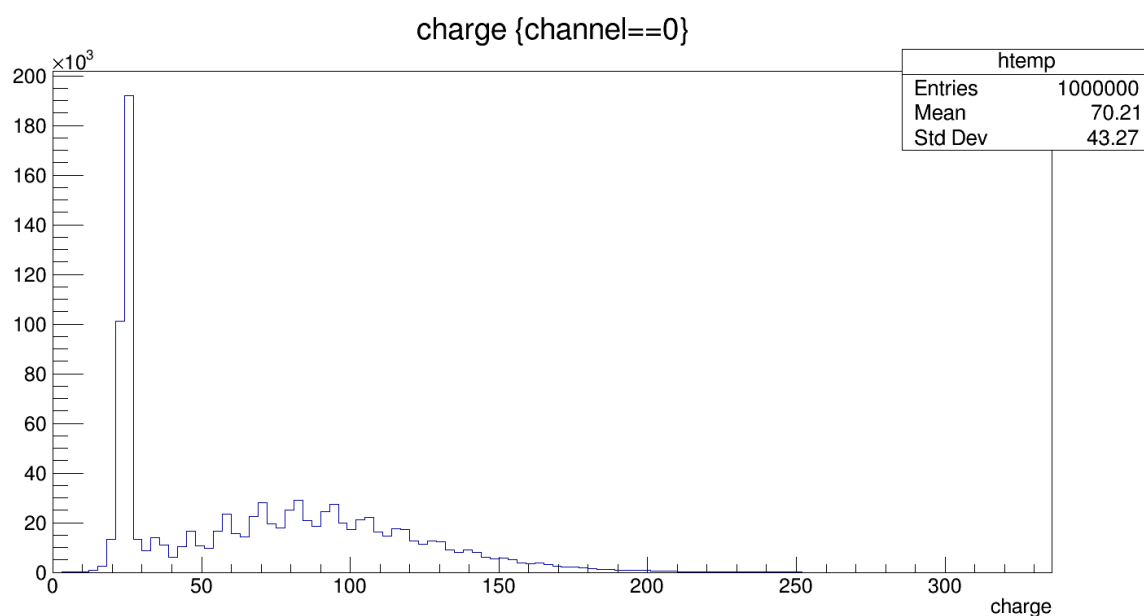


Рисунок 30 — Одноэлектронный зарядовый спектр 0-го канала матрицы

Анализ отдельных пиков полученных спектров, как показано на рисунке 31, позволил определить усиление каждой отдельной ячейки каждой матрицы.

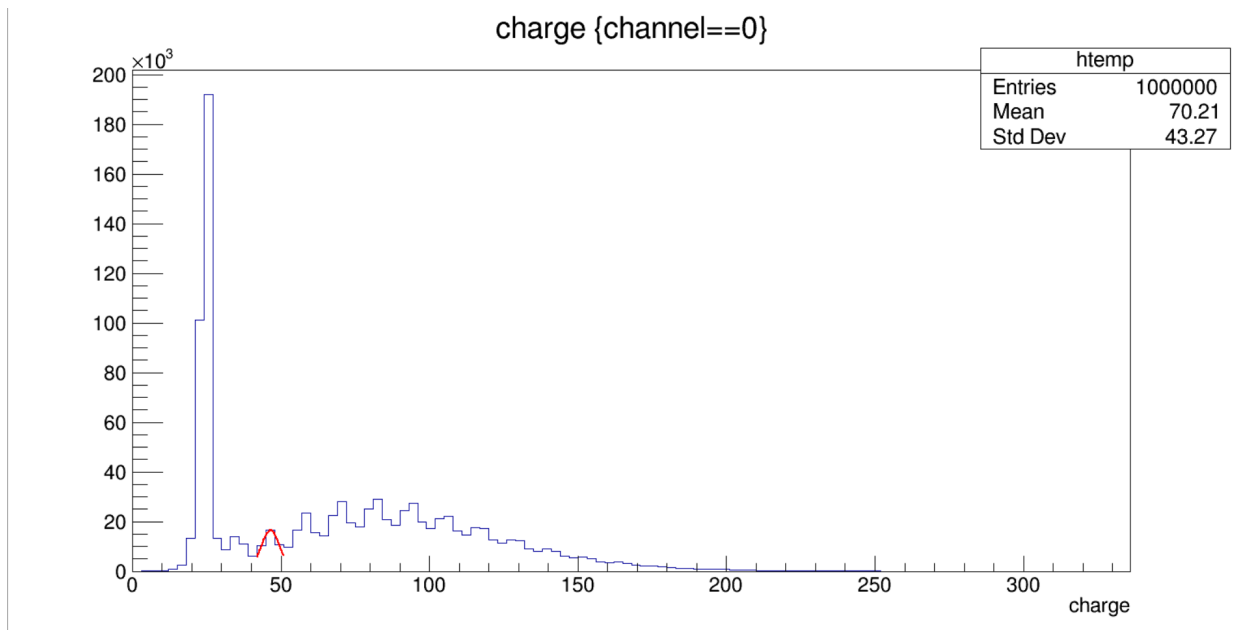


Рисунок 31 — Одноэлектронный зарядовый спектр 0-го канала матрицы

На рисунке 32 представлен график зависимости коэффициентов усиления от номеров каналов матриц.

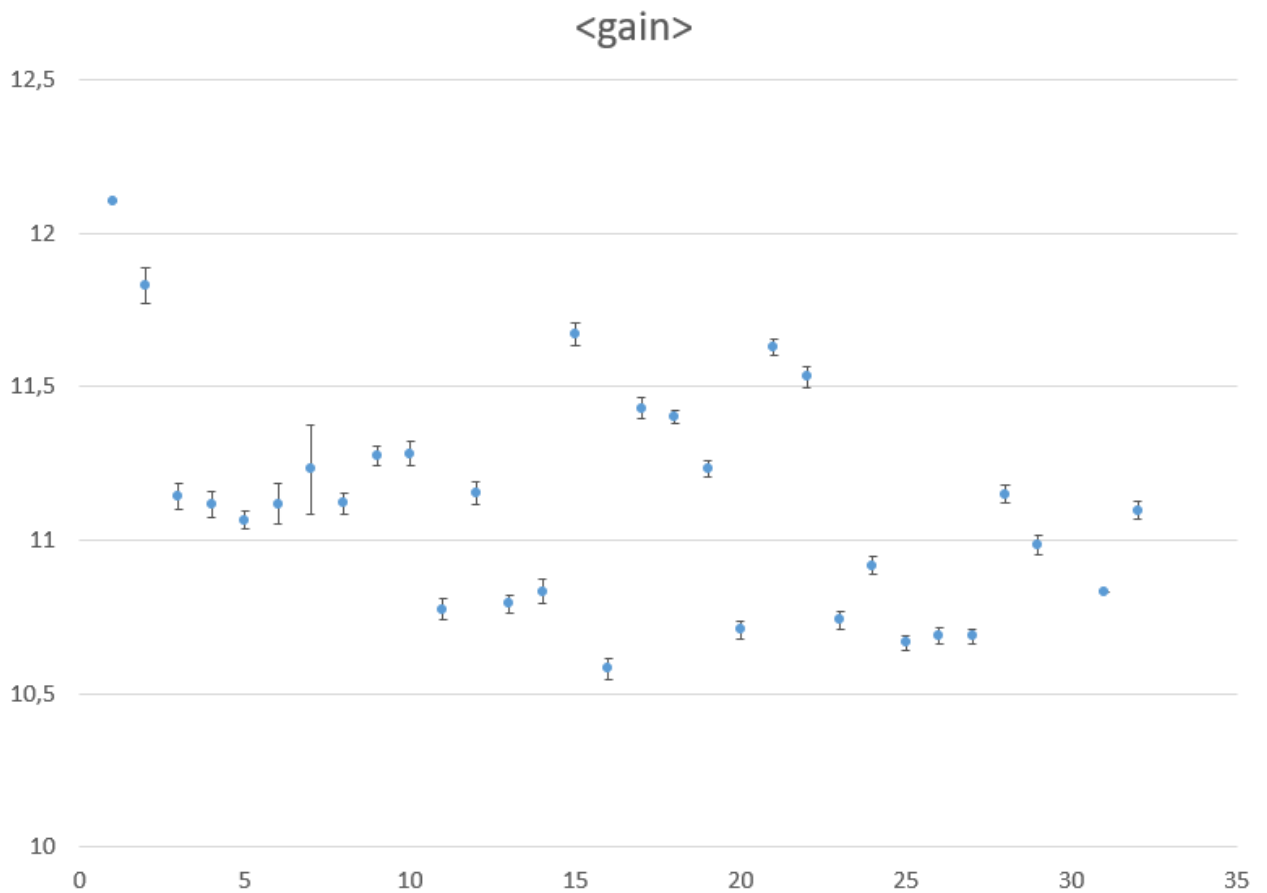


Рисунок 32 — График зависимости коэффициентов усиления от номеров каналов матриц

Произведена оценка дисперсии полученного распределения, она составила  $\sim 3\%$ . Также проведены измерения с источниками Cs-137 и Ti-44, получены зарядовые спектры, представленные на рисунках 33 и 34 соответственно.

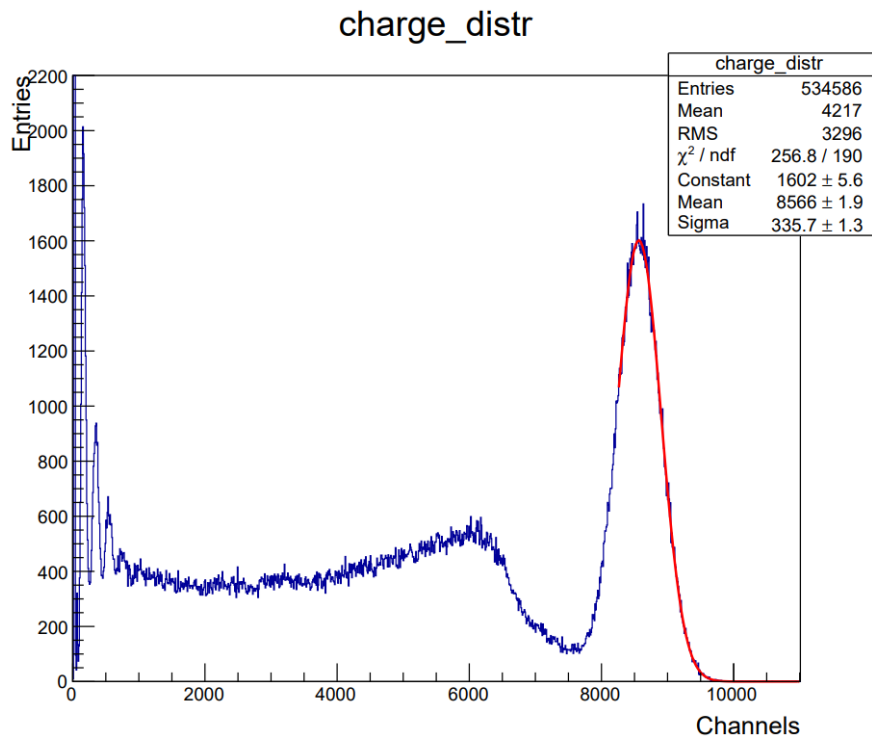


Рисунок 33 — Суммарный зарядовый спектр Cs-137

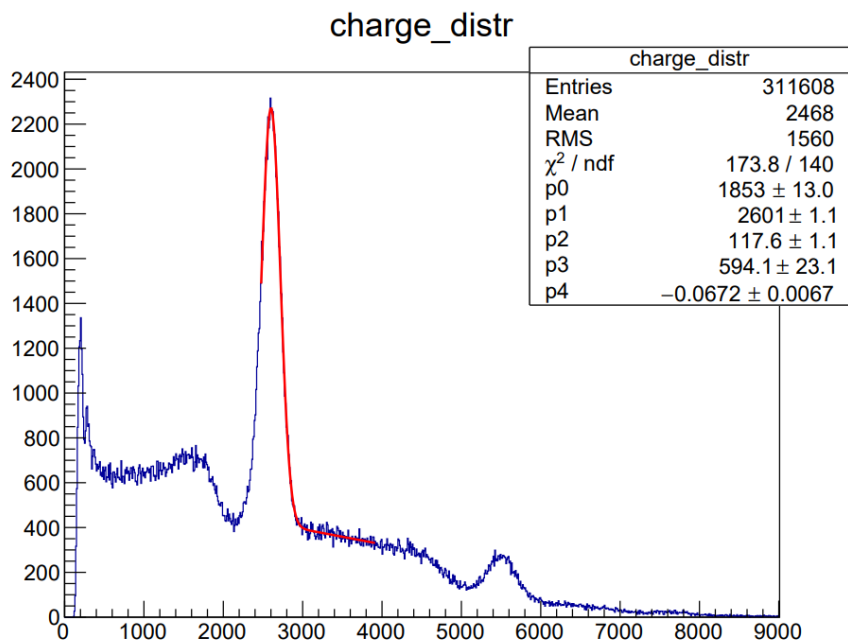


Рисунок 34 — Суммарный зарядовый спектр Ti-44

Фотопик спектра Cs-137 профитирован распределением Гаусса, относительное энергетическое разрешение при энергии 662 кэВ составило  $\delta \sim 9 \%$ . Фотопик спектра Ti-44 профитирован суммой распределения Гаусса и полинома первой степени. Такой выбор фитирующей функции обусловлен тем, что фотопик лежит на подложке из событий, обусловленных комптон-эффектом. Относительное энергетическое разрешение при энергии 511 кэВ составило  $\delta \sim 11 \%$ . Восстановлена координата XY-взаимодействия и произведена оценка координатного разрешения по каждой из осей исследуемой плоскости. Предварительным критерием отбора данных было условие на число сработавших ячеек ( $>8$  ячеек). Полученные распределения по координатам X и Y профитированы распределением Гаусса и представлены на рисунках 35 и 36 соответственно.

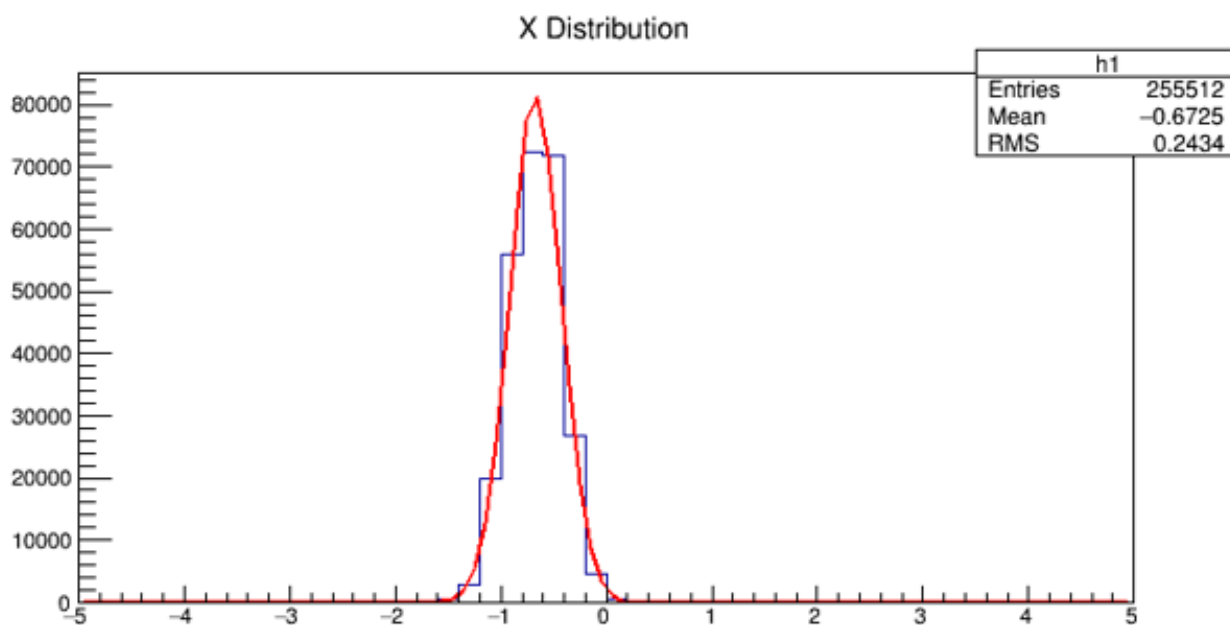


Рисунок 35 — Распределение по координате X



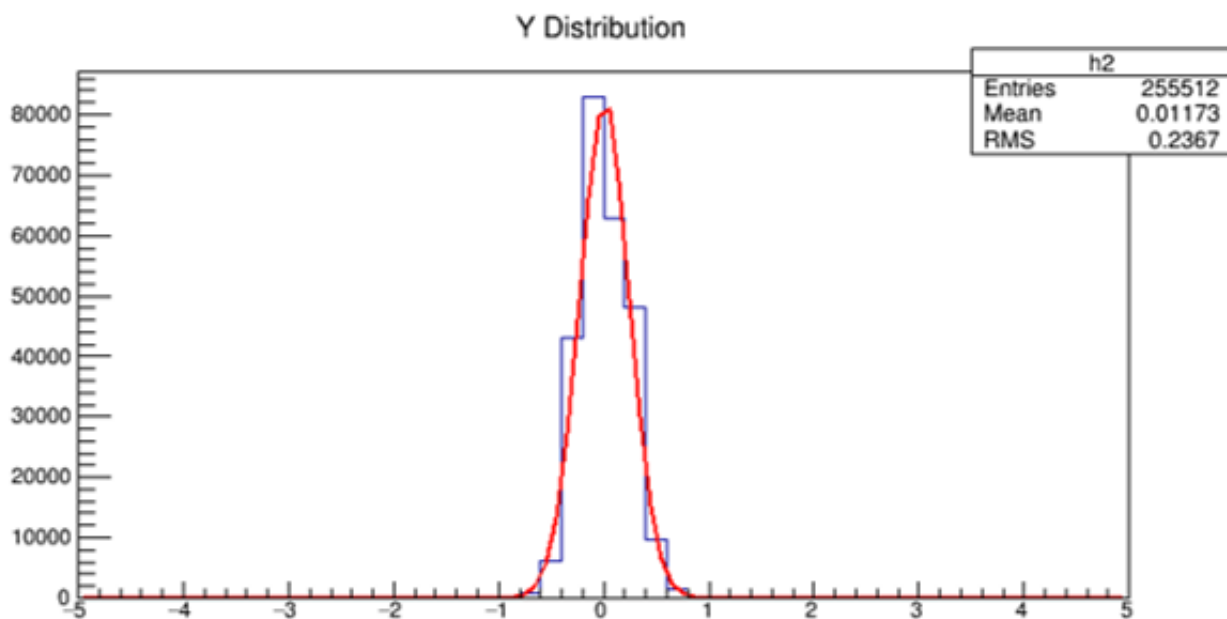


Рисунок 36 — Распределение по координате Y

Координатное разрешение по каждой из исследуемых осей составило  $\sim 0,6$  мм. Однако этот результат требует дальнейших проверок. Планируется включить дополнительные критерии отбора, например, проводить анализ событий, составляющих фотопик и исключать события, обусловленные комптон-эффектом, то есть перед восстановлением координат предварительно определять и выставлять пороги на заряды. С помощью Petiros проведены также временные измерения. Схема установки для измерения временного разрешения представлена на рисунке 37.

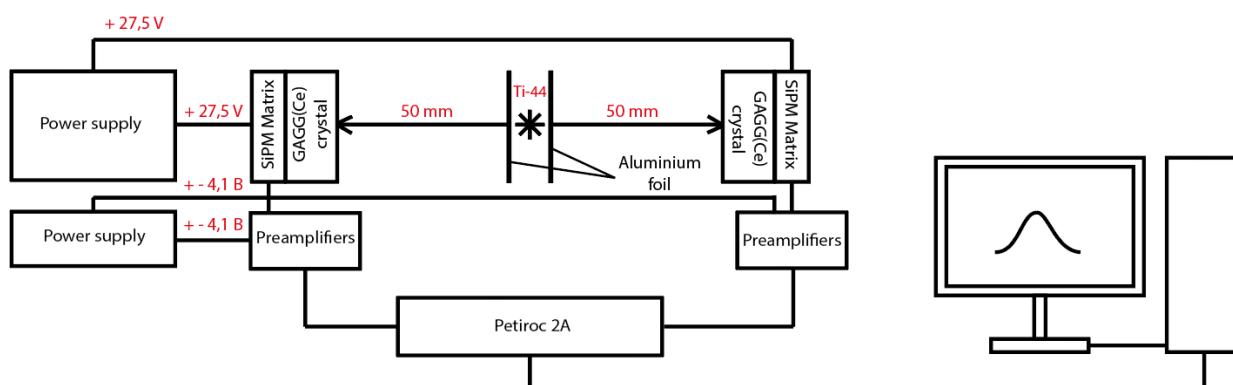


Рисунок 37 — Принципиальная схема установки для измерения временного разрешения

Временные спектры получены двумя различными способами. Первый способ основан на вычислении разности усредненных времен срабатывания

ячеек различных матриц. Второй способ заключается в подсчете разности времен первых сработавших ячеек различных матриц. Перед реализацией каждого из алгоритмов данные предварительно подвергаются отбору на число сработавших ячеек матриц, а также исключаются события, содержащие ложные срабатывания. На рисунках 38 и 39 представлены временные распределения, полученные первым и вторым способом соответственно.

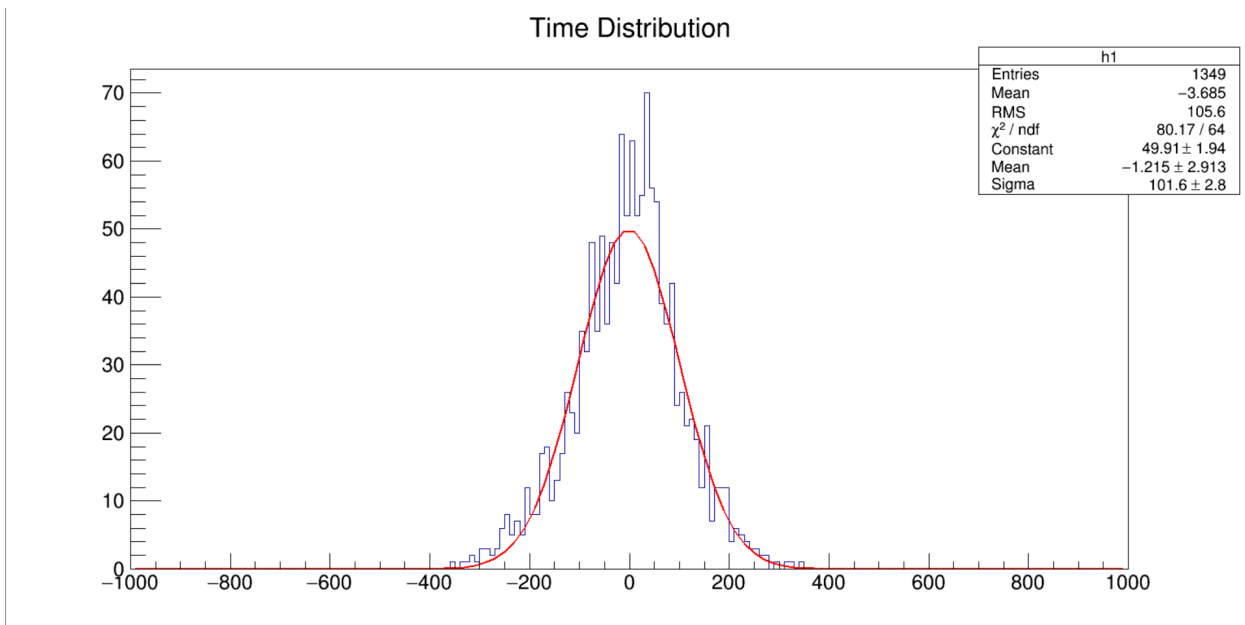


Рисунок 38 — Временной спектр от пар аннигиляционных гамма-квантов

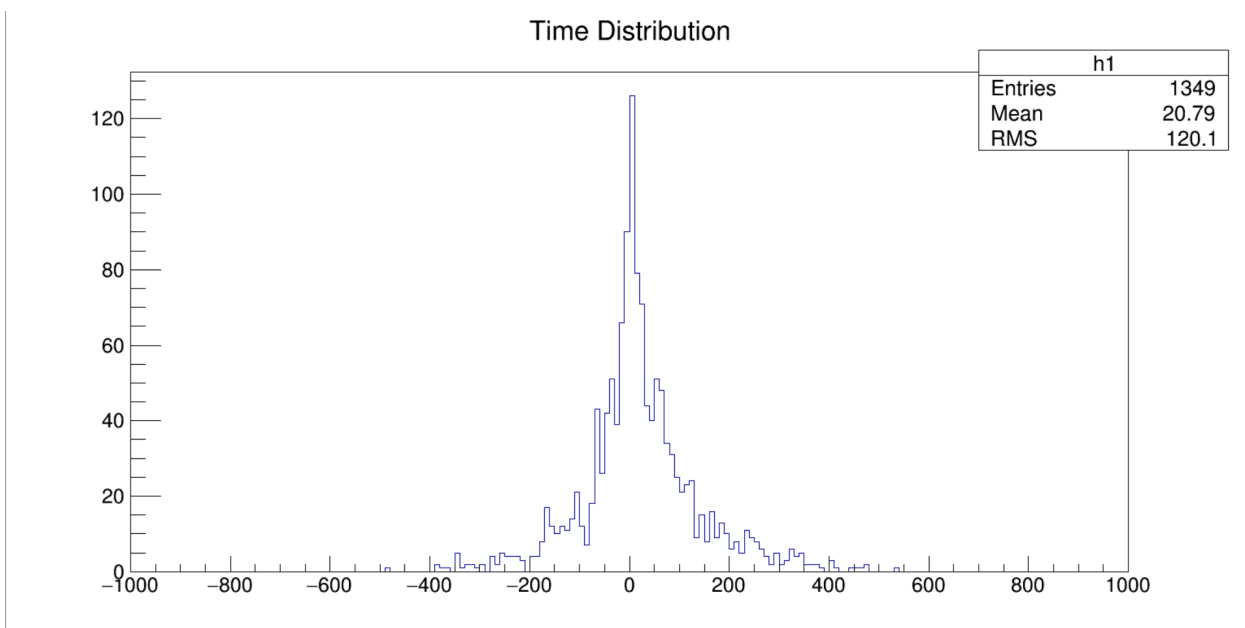


Рисунок 39 — Временной спектр от пар аннигиляционных гамма-квантов

Распределение разности усредненных времен профитирован Гауссом.

Временное разрешение с учетом цены деления канала ВЦП - 36 пс составило  $\sim 8$  нс. Распределение разности времен первых срабатываний требует более сложной фитирующей функции. Выбор фитирующей функции для временного распределения, полученного вторым способом, и полученная оценка временного разрешения при помощи первого способа в данный момент являются предметом обсуждений и исследований.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе данной работы проводилось изучение свойств позиционно-чувствительного детектора на основе монолитного сцинтилляционного кристалла GAGG и матрицы SiPM.

Получены одноэлектронные спектры для двух матриц и проведена оценка однородности коэффициента усиления каналов. Дисперсия составила  $\sim 3\%$ .

Проведена оценка относительного энергетического разрешения на примере Cs-137 (662 кэВ) и Ti-44 (511 кэВ). Оно составило  $\sim 9\%$  и  $\sim 11\%$  соответственно.

С помощью программы для восстановления координаты XY - взаимодействия на основе ангеровой логики получены координатные распределения и произведена оценка координатного разрешения по каждой из исследуемых осей. Величина координатного разрешения для осей X, Y составила  $\sim 0,6$  мм.

Проведена оценка временного разрешения детектора на основе двух матриц SiPM и сцинтилляционных кристаллов GAGG. Величина временного разрешения составила  $\sim 8$  нс.

В дальнейшем планируется ввести в анализ дополнительные критерии отбора данных для улучшения полученного временного разрешения. А также провести дополнительные исследования работы матриц для обоснования полученного координатного разрешения. Точное восстановление координат X, Y позволит повысить точность восстановления координаты Z и впоследствии улучшить периферийную картину, получаемую в ПЭТ-сканерах.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Sánchez F.* [et al.]. ALBIRA: A small animal PET/SPECT/CT imaging system // Medical Physics. — 2013. — Vol. 40, no. 5. — P. 051906. — eprint: <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1118/1.4800798>. — URL: <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1118/1.4800798>.
2. *Sánchez F.* [et al.]. Small animal PET scanner based on monolithic LYSO crystals: Performance evaluation // Medical Physics. — 2012. — Vol. 39, no. 2. — P. 643–653. — eprint: <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1118/1.3673771>. — URL: <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1118/1.3673771>.
3. *Nobashi D.* [et al.]. Performance evaluation of GAGG(Ce)/LFS scintillator MPPC array readout with ASIC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2021. — Vol. 986. — P. 164811. — URL: <https://doi.org/10.1016%2Fj.nima.2020.164811>.
4. *Peterson T. E., Furenlid L. R.* SPECT detectors: the Anger Camera and beyond // Physics in Medicine Biology. — 2011. — Vol. 56, no. 17. — R145. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/56/17/R01>.
5. *Kaplan A.* Correction of SiPM temperature dependencies // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 610, no. 1. — P. 114–117. — ISSN 0168-9002. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209010419>; New Developments In Photodetection NDIP08.