

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 53.05, 53.07

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ И  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПУЧКА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ  
ДЕТЕКТОРОВ**

Студент \_\_\_\_\_ А. И. Дуров

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

Москва 2021

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ И  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПУЧКА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ  
ДЕТЕКТОРОВ**

Студент

\_\_\_\_\_ А. И. Дуров

Научный руководитель,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ П. Е. Тетерин

Рецензент,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ Г. А. Нигматкулов

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
1 Экспериментальные методики . . . . .	4
1.1 Рентгеновский тест . . . . .	6
1.2 Тест на пучке . . . . .	17
<b>Результаты</b>	<b>28</b>
2 Рентгеновский тест . . . . .	28
2.1 Обработка результатов . . . . .	28
3 Тест на пучке . . . . .	50
3.1 Моделирование установки . . . . .	50
3.2 Корректирование установки под реальные детали и дальнейшая работа . . . . .	52
3.3 Финальный вид установки . . . . .	53
3.4 Испытание работоспособности для тестового экспери- мента . . . . .	56
<b>Заключение</b>	<b>60</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>61</b>

# ВВЕДЕНИЕ

В данной работе особое внимание будет уделено двум тестированиям — рентгеновскому тесту и тесту на пучке (beam тесту). В частности, будет рассмотрено применение координатных систем в этих тестированиях. В рентгеновском тесте используется передвижение источника рентгеновского излучения с определенным шагом по осям  $X$  и  $Y$  по всей поверхности детектора с целью определения координат расположения дефектных зон. Во время теста на пучке определяется точка прохождения пучка заряженных частиц через исследуемый детектор. Для корректного проведения этого тестирования необходимо точно знать координату реального положения пучка перед его входом в рабочую область детектора. Для этой цели будет использоваться установка, описанная в разделе 3. Далее будет представлено подробное описание вышеупомянутых методик тестирования детекторов — рентгеновского теста и теста на пучке.

# ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является совершенствование и дополнение методик дефектоскопии детекторов, результатом которого является обработка результатов рентгеновского тестирования детекторов sTGC, произведенных в институте Вайцмана, с целью выявления систематики в дефектных областях и создание установки для мониторинга пучка заряженных частиц во время теста на пучке.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Как известно, детекторы перед их использованием в реальных экспериментах, подвергаются различным тестам во время и после производства. Так, для модернизации эксперимента Атлас в ЦЕРНе разработаны специальные многопроволочные пропорциональные газовые детекторы, которые называются sTGC — узкостриповые тонкоззорные камеры. Такие детекторы должны работать при режиме повышенной светимости БАК (Большого Адронного Коллайдера). В связи со сложностью в эксплуатации и изготовлении, они должны быть тщательно протестированы. Существует множество видов тестирований, позволяющих определить те или иные характеристики детектора. И для каждого типа детектора применяются одна или несколько методик, соответствующих этим тестированиям. Далее приведены примеры некоторых тестирований, используемых для тестирования как детекторов sTGC (см. раздел 1.1), так и для других детекторов в современной детекторной физике:

- 1) **Высоковольтный тест** — тест, позволяющий проверить устойчивость новоизготовленных детекторов к потере заряда и устойчивости к высокому напряжению. Например, такой тест проводился для одного из прототипов sTGC, чтобы проверить эти свойства [1]. В ходе этого теста был использован  $\beta^-$  распад  $^{90}\text{Sr}$ , чтобы изучить кривую включения и установить оптимальное рабочее напряжения протестированных камер. Эффективности каждой из камер были проверены отдельно, и тем самым было получено, что такие эффективности оказываются выше 99% при рабочем напряжении в 2.93 кВ для одной

камеры и 2.9 кВ — для другой.

- 2) **Калибровка на космических мюонах** — преимуществами такого теста является возможность оценить шумы электроники (однако для калибровки на космических мюонах чаще всего устанавливается не та электроника, которая потом будет использоваться на реальном эксперименте) и шумы детектора. Основан он на регистрации космических частиц [1]. Например, для одного из прототипов sTGC были получены следующие особенности, которые могут быть учтены для последующих экспериментов:

- (а) Амплитуда сигналов (т.е. максимальный заряд, собираемый со стрипа) должна быть выше определенного порога для подавления шума;
- (б) Стрипы, в которых собранный заряд является максимальным, не должны быть первым или вторым стрипом (пояснение: если в детекторе 65 стрипов, то не следует учитывать максимальный заряд, снятый с 1-го или 65-го стрипа);
- (в) События, вызвавшие переполнение заряда на стрипе не должны быть включены в результат эксперимента;
- (г) Фитирование по Гауссу должно сходиться с результатом, используя небольшой параметр  $\chi^2$ , чтобы обеспечить хорошее согласование;
- (д) Стандартное отклонение  $\sigma$  при фитировании по Гауссу должно быть не больше ширины в два стрипа — для удаления из рассмотрения дельта-электронов и других ненужных частиц.

Но главным недостатком такого теста является использование большого количества readout электроники. Например, при использовании рентгеновского теста её отсутствие является одним из главных преимуществ. Далее будет описано применение метода рентгеновского сканирования.

- 3) **Импульсный тест** — этот тест позволяет при подаче электрического импульса в простейшую цепь, содержащую исследуемый детектор (а точнее — конкретные проверяемые его части) определить дефектные области, если обнаруживается сопротивление более определенного порога. Однако сразу очевидно несовершенство данного

теста — невозможно определить дефект, если он вызывает сопротивление в цепи меньше этого порога. Конечно, подобные дефекты могут быть обнаружены и другими способами — однако они все имеют свои недостатки (например в рентгеновском тесте, о котором речь пойдет дальше, — сложность и громоздкость установки). В отличие от высоковольтного теста, импульсный тест проводится при низком напряжении, а также в импульсном тесте смотрится форма импульса на выходе и сравнивается с входным импульсом, и на основе этого сравнения делаются выводы о наличии и расположении дефектных областей детектора.

- 4) **Рентгеновский тест** — данный тест состоит в том, что поверхность детектора облучается пучком рентгеновских лучей. Такое тестирование было произведено и для координатных детекторов sTGC во время их производства в институте Вайцмана, Израиль (Weizmann Institute of Science). Более подробная информация касательно этого теста и результаты его проведения в институте Вайцмана для конкретной серии детекторов sTGC будет представлена ниже.
- 5) **Тест на пучке** — он состоит в регистрации тестируемым детектором заряженных частиц из соответствующего направленного пучка. Тип и интенсивность частиц, а также их источник может варьироваться в зависимости от типа исследуемого детектора и от специфики его функций. Ниже пойдет подробное описание этого метода тестирования.

## 1.1. РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕСТ

### Принцип работы sTGC

Для описания некоторых методик тестирования детекторов в данной работе приводился пример проведения тестирований детекторов sTGC. Далее также будет подробно описано рентгеновское тестирование серии детекторов sTGC, произведенных в Институте Вайцмана, а также будет описана методика анализа результатов этой серии тестов. Поэтому сейчас речь пойдет о самом детекторе sTGC — принцип его работы и процесс изготовления.

Детекторы sTGC были первоначально предложены Маевским и Шарпаком [2; 3] и далее такие детекторы получили дальнейшее развитие в эксперименте OPAL [4–6] и для части мюонной триггерной системы на эксперименте Атлас [7]. Для повышения устойчивости детектора для режима повышенной светимости БАК разработан узкостриповый вариант TGC — sTGC (small TGC), который заменит своего предшественника на Малых Мюонных Колесах по окончании Фазы-1 модернизации эксперимента ATLAS [8]. Структура sTGC изображена на рис. 1:

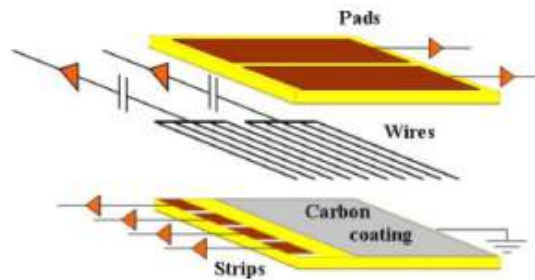


Рисунок 1 – Структура sTGC

Состоит он из сетки вольфрамовых нитей (wires) толщиной 50 мкм с золотым напылением, расположенных с шагом в 1.8 мм. Находятся они между двумя катодными платами на расстоянии 1.4 мм друг от друга. Катодные платы сделаны из G-10 платы, покрытой графит-эпоксидной смесью с поверхностным сопротивлением в 100 - 200 кОм на единицу площади (такое покрытие было выбрано из-за того, что вследствие высокой облучаемости, которая имела место в режиме повышенной светимости БАК, иные резистивные покрытия понижали бы эффективное напряжение вблизи контактов элементов электрических цепей, даже имея ввиду тот факт, что свободные заряды не оказывают большого влияния на детектор). Таким образом, с помощью графит-эпоксидного покрытия удалось добиться хорошего взаимодействия между стрипами (strips) и падами (pads), сохраняя при этом возможность быстрой передачи сигнала). С одной стороны от неё располагаются прецизионные стрипы, направленные перпендикулярно вольфрамовым нитям, а с другой стороны уже накрывается падами — большими прямоугольными плоскостями. Стрипы имеют шаг в 3.2 мм, что гораздо меньше соответствующего показателя в TGC — отсюда и появилось название sTGC (small TGC). Также используется структура, действующая



щая по принципу «3 из 4 совпадений» (квадруpletную структуру можно увидеть на рис. 2) для обнаружения примерного трека мюона, а значит и примерной области его взаимодействия.

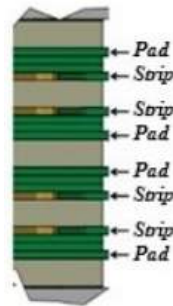


Рисунок 2 – Квадруpletная структура sTGC

Также, что не менее важно, пады нужны для того, чтобы определить, с каких именно стрипов нужно снимать показания, чтобы получить более точное измерение плоскостных координат. Азимутальные же координаты получают с помощью вольфрамовых нитей. Рабочим газом является смесь, состоящая из 55%  $CO_2$  и 45% *n*-пентана [9]. Также стоит отметить, что детектор sTGC обладает хорошим пространственным разрешением в 100 мкм.

Итого, можно выделить следующие особенности детектора sTGC:

- 1) sTGC может работать в штатном режиме при излучении вплоть до  $20 \text{ кГц/см}^2$  с повышенной эффективностью для минимального количества ионизирующих частиц [10] ;
- 2) При шаге стрипов в 3.2 мм и при считывании сигналов только с нужных стрипов (используя принцип «3 из 4 совпадений») координатное разрешение варьируется от 60 мкм при перпендикулярном угле падения до 150 мкм при угле падения в  $30^\circ$  ;
- 3) Детектирование космических мюонов, вследствие их невысокой интенсивности (порядка нескольких  $\text{Гц/см}^2$ ), не вызывает ухудшения работы детектора sTGC (относительно максимальной интенсивности, при которой sTGC работает в штатном режиме).

## Суть метода

Рентгеновский тест состоит в том, что поверхность детектора облучается пучком рентгеновских лучей. Такое тестирование было произведено

и для координатных детекторов sTGC во время их производства в институте Вайцмана, Израиль (Weizmann Institute of Science). После серии экспериментов по тестированию детектора были получены несколько сотен файлов с данными о результатах проверки, в каждом из которых находились данные о различных параметрах, снимаемых с детектора во время тестирования для каждой  $(x, y)$  координаты всей плоскости детектора.

## Взаимодействие мюонов с sTGC

В результате облучения рентгеновским пучком под действием фотоэффекта в газовом зазоре появляются электроны, благодаря чему можно имитировать пролет мюонов такой нагрузкой детектора. Подробнее — в разделе 1.1.

В том случае, когда настоящие мюоны пролетают сквозь рабочую плоскость sTGC — они вызывают ионизацию газа, который находится внутри sTGC, и образовавшиеся ионы под воздействием электрического поля «плывут» до ближайшего стрипа и вызывают электрический импульс, который и регистрируется экспериментатором. Именно благодаря тому, что шаг стрипов 3.2 мм ионы быстро достигают нужного ближайшего стрипа, в результате чего и получается хорошая точность измерения плоскостных координат точки взаимодействия заряженной частицы с молекулой газа.

Примером регистрации мюонов детектором sTGC может послужить эксперимент по обнаружению космических частиц. При проведении такого эксперимента система триггеров срабатывала, когда сигналы с проволочек, поступавшие из обеих камер, совпадали в окне в 30 нс. Такие сигналы суммарно за 100 нс оцифровывались и записывались в результат эксперимента. Электронная лавина, которая возникала вследствие ионизации газа из-за прохождения детектора заряженной частицей, собиралась на проволочках и индуцировалась на стрипах. Индуцированный заряд распределялся по соседним стрипам около места прохождения частицей детектора, учитывая искажение траектории после прохождения графитового слоя. Координата прохождения частицы вычислялась фитированием по Гауссу. Результаты такого фитирования можно увидеть на рис. 3.

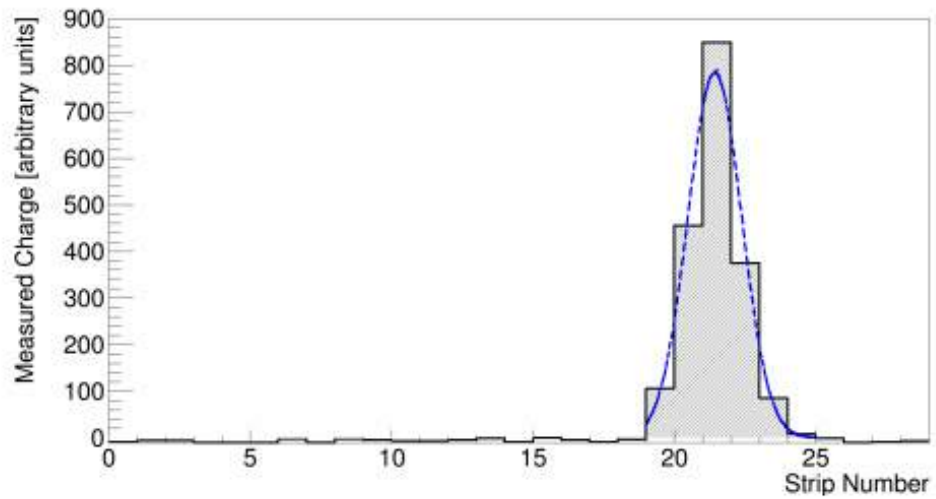


Рисунок 3 – Фитирование сигнала

Следует отметить, что все вышеперечисленные измерения были проведены согласно источнику [1], и этот эксперимент проводился на sTGC, размеры и строение которого можно увидеть на рис. 4.

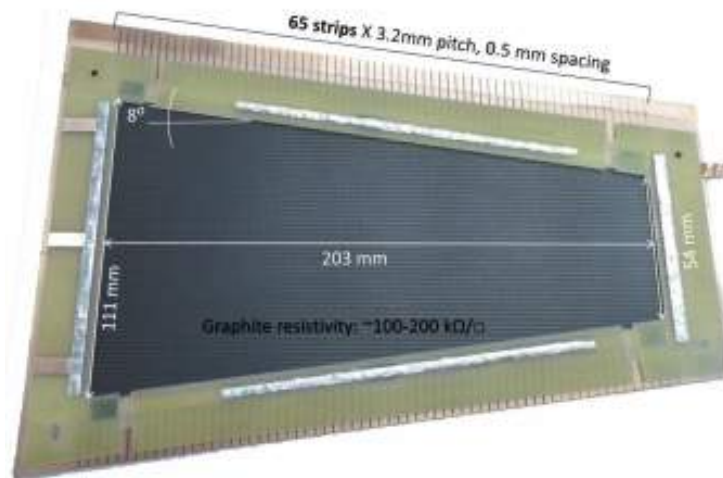


Рисунок 4 – используемый sTGC

## Изготовление sTGC

Непростым является способ изготовления детектора частиц с многослойными детектирующими плоскостями — для этого необходимо достичь высокой точности при выравнивании стрипов, выводящих сигнал из каждого слоя. Требуемая точность позиций параллельных плоскостей — 40 мкм. Данная точность достигается, конечно, не руками человека, а роботизированной сборкой. Все стрипы вывода для каждой из плоскостей изготавливаются вместе за одну операцию с помощью латунных вставок, с которыми может быть установлена внешняя связь. Далее склеиваются между собой катодные платы, разделенные стенами камеры на периферии плат. Аналогично располагаются Т-образные проволочные опоры шириной в 7 мм и распорные заклепки с интервалами в 20 см. Итак, уже получившиеся отдельные камеры склеиваются еще и между собой, разделяясь специально обработанной рамой с «сотовой» структурой по всей поверхности каждой из камер, каждая из которых на 100 мкм меньше зазора между ними. Клей в нашем случае выступает в качестве «фильтра» для компенсации небольших отклонений в толщине материала печатной платы (PCB — printed circuit board). Процедура склеивания использует тот небольшой факт, что различные слои sTGC располагаются относительно друг друга с высокой точностью, если использовать те самые латунные вставки, прикрепленные к внешнему прецизионному джигу (jig) на мраморной поверхности.

Таким образом был построен первый полноразмерный квадруплетный sTGC детектор в Институте Вайцмана в Израиле весной 2014 года [11], размеры получившегося детектора —  $1.2 \times 1.0 \text{ м}^2$ . Тот прототип состоял из четырех слоев, содержащих стрипы и пады, и был изготовлен под тщательным контролем, чтобы быть использованным в проекте модернизации Малых мюонных колес эксперимента Атлас, в частности — в середине малого сектора.

## **Описание методики рентгеновского тестирования. Применение метода рентгеновского тестирования (сканирования) для контроля качества изготовленных sTGC**

Для обеспечения контроля качества изготавливаемых детекторов sTGC был предложен тест облучением всего детектора гамма-излучением (источником  $^{60}\text{Co}$ ). Рентгеновский сканер был эксплуатирован для получения информации о дефектных участках новоизготовленных детекторов sTGC при локальном гамма-излучении. Ранняя диагностика дефектов позволяет без установки считывающей электроники находить и устранять различные технологические дефекты по-отдельности в каждом слое детектора и, при необходимости и возможности, устранять их. Такими дефектами могут являться, например, недостающие провода, потеря натянутости проводов, дефекты толщины катодных плат (и зазоров между ними), попадание частиц пыли внутрь зазоров и на провода, дефекты склеивания слоев детектора и т.д.. Эти дефекты могут привести к неравномерности газового усиления и могут вызывать разряды во время процедуры контроля качества. В рамках разработки методики сканирования было предложено несколько режимов сканирования [12] и все они были испытаны в ходе серийного производства детекторов в Институте Вайцмана [13].

## **Описание методики рентгеновского тестирования. Описание установки**

Рентгеновский сканер представляет собой 2D установку с ЧПУ для сканирования всей площади sTGC в сочетании с рентгеновской трубкой Amptek Mini-X [14] и специализированным программным обеспечением QScanner [15] для измерения высоковольтной токовой характеристики анодных проводов с высоковольтным источником питания. Прецизионное сканирование с узкозазорным коллиматором позволяет наблюдать strip- и проволочную структуру. Зазоры внутри детектора имеют ширину 0,5 мм, что меньше расстояния между проводами (1,8 мм). Длина зазора — 28 мм. Эта конфигурация была выбрана как оптимальная для трубок Amptek mini-X совместно с круглой трубкой предварительного коллиматора дли-

ной 62 мм и внутренним диаметром 28 мм, что обеспечивает оптимальное сочетание максимальной интенсивности пучка и его равномерности по длине зазора. Параметры рентгеновской трубки были установлены на 50 кВ и 75 мкА, чтобы достичь наибольшей частоты и амплитуды. В ходе самых ранних исследований были выбраны данные, полученные при 2900 В и использовании газовой смеси *n*-пентан + CO<sub>2</sub> в режиме «высокоэнергетической» рентгеновской трубки (50 кВ и 75 мкА) [12; 16]. Эта газовая смесь использовалась для всех исследований в данном эксперименте. Пошаговый режим сканирования с 5-секундными интервалами был выбран как оптимальный для описанных измерений для стабилизации тока и исключения одиночных случайных разрядов. Увеличение напряжения до 3200 В выявляет резкое падение напряжения до 400 В при повышенных рентгеновских параметрах. Так, в трубке были уставновлены максимальные параметры 25 кВ и 5 мкА для одиночного зазора.

### **Описание методики рентгеновского тестирования. Процедура сканирования**

Важным критерием качества sTGC является равномерность подачи газа. Для этого была установлена процедура сканирования всего детектора. Сканирование должно охватывать всю площадь с помощью квадратного коллиматора (размерами 20 × 20 мм) или круглого коллиматора (с диаметром 30 мм). Для исследования одиночных зазоров равномерность подачи газа проверяется при параметрах рентгеновской трубки 25 кВ и 5 мкА и при других напряжениях, меньших 3200 В. В ходе сканирования можно обнаружить некоторые «горячие точки» в камере детектора. Далее сканирование может быть повторено локально вокруг выявленных «горячих точек» несколько раз для идентификации проблемы или для устранения дефекта, вызвавшего разряд. После того как горячая точка была обнаружена и устранена с помощью рентгеновских лучей (или другими средствами), сканирование следует повторить для оценки критериев отторжения.

## Описание методики рентгеновского тестирования. Физика процессов внутри sTGC и варианты применения рентгеновского сканера

Фотоны энергий порядка несколько кэВ могут регистрироваться детектором sTGC по двум основным каналам взаимодействия: фотоэффект на катодной плате или проволочном материале с эмиссией заряженных частиц в объем газа и ионизация газа внутри зазора. Важно заметить, что значительный при энергиях энергиях фотонов порядка МэВ эффект Комптона пренебрежимо мал при рентгеновских сканированиях [17]. Для определения преобладания одного процесса над другими, требовалось выяснить, какое положение луча соответствует максимальному высоковольтному току отклика проводов. Если снимается максимальный ток при облучении провода точечным рентгеновским лучом, то это означает доминирование процесса фотоэффекта. В противном случае, главную роль играет ионизация газа. Результаты одновременного снятия тока на соседних группах проводов и в целом в детекторе приведены на рис. 5.

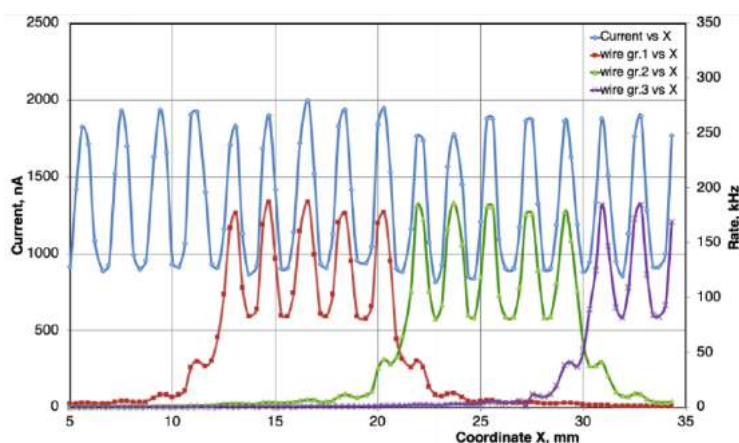


Рисунок 5 – Результаты сканирования камеры узким коллиматором, параллельным проволочкам, с одновременным снятием счета

Наиболее важной областью является зазор между проводами различных групп проводов. Этот минимум соответствует такому провалу графика в токовом отклике, который означает, что минимальный заряд собирается, пока фотон находится между проводами. В этом случае провода собирают заряд в основном от ионизации и почти не собирают заряд от фотоэлектронов, которые могут достигать электродов с гораздо меньшей вероятностью,



чем в ситуации, когда рентгеновский луч попадает непосредственно на провод.

Также важна информация о расположении проволочек в одно- и двух-слойных детекторах. Отображение может помочь с пространственной ориентацией длинных и узких технических элементов внутри детектора, таких как провода, или помочь выявить смещение самого детектора относительно оси сканирования. Отображение несоосных проводов показана на рис. 6.

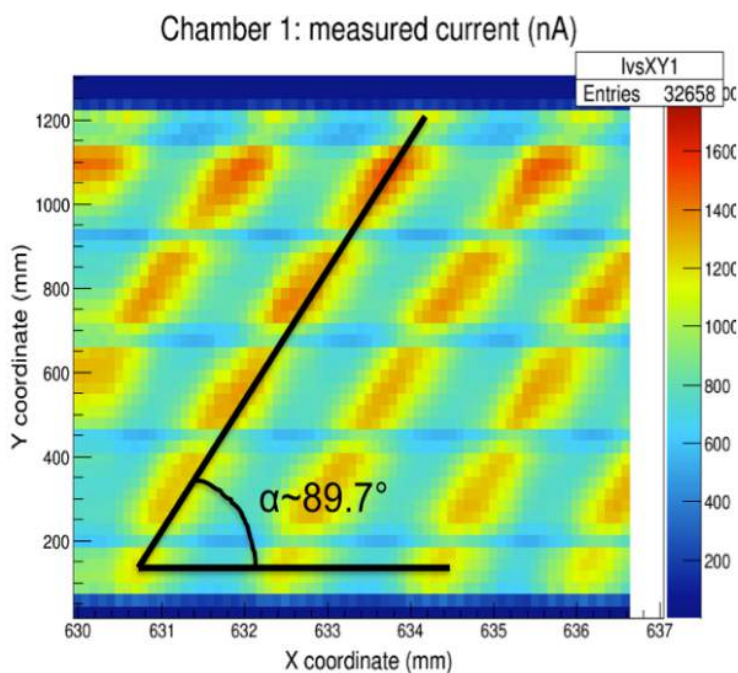


Рисунок 6 – Отображение несоосных проводов

Ориентация коллиматора делает метод нечувствительным к рассогласованиям горизонтальных элементов конструкции детектора. В тех же экспериментальных условиях было проведено сканирование дублета sTGC, чтобы проверить выравнивание проводов между слоями. Результирующее распределение тока показано на рис. 7.



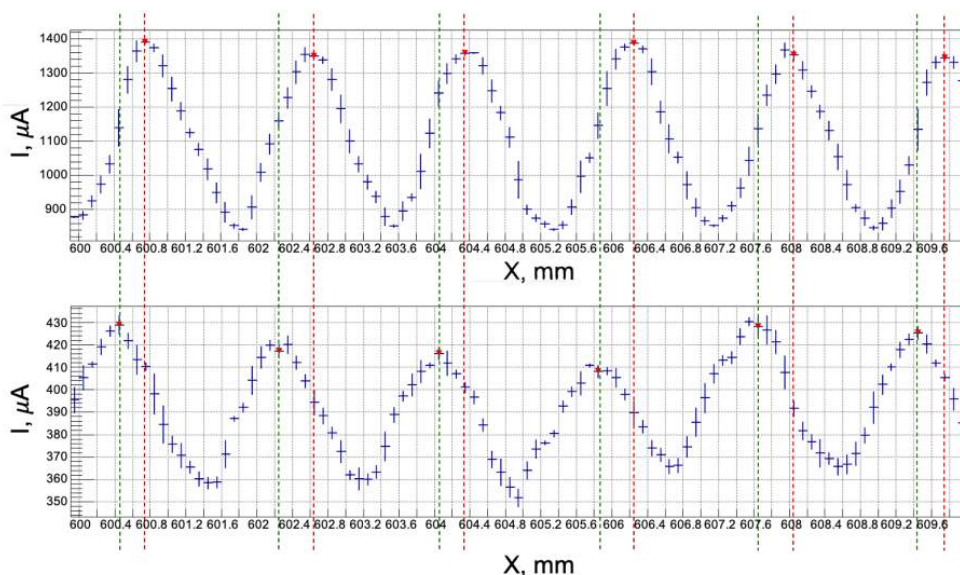


Рисунок 7 – Результаты проверки выравнивания проводов между слоями

Несмотря на значительное уменьшение амплитуды на втором слое, все еще можно отделить пики, соответствующие различным проводам. Из распределения хорошо видны межслойные сдвиги в исследованном дублете образца. Такие исследования с одинаковыми рентгеновскими параметрами возможны только для дублетов в областях с однородными слоями меди на катодных платах. Обеднение медных структур (например, по трекам) может исказить конечное распределение и резко снизить точность измерений.

## 1.2. ТЕСТ НА ПУЧКЕ

### Описание методики

Суть данного метода состоит в регистрации тестируемым детектором заряженных частиц из соответствующего направленного пучка. Тип и интенсивность частиц, а также их источник может варьироваться в зависимости от типа исследуемого детектора и от специфики его функций. Во время этого тестирования определяется точка вхождения пучка заряженных частиц в исследуемый детектор. Для корректного проведения этого тестирования необходимо точно знать координату реального положения пучка перед его входом в рабочую область детектора. Для этой цели будет использоваться установка, описанная в разделе 3. Во время такого тестирования зачастую возникает проблема позиционирования экспериментальной установки с исследуемым детектором относительно пучка, особенно если имеется большое расстояние между одним из исследуемых детекторов и источником частиц или в условиях, когда исследуемый детектор находится на пучке ограниченное время. Иными словами, не всегда удастся точно сказать, что именно в данную координату попали частицы из пучка согласно их предполагаемой траектории, ведь эта траектория могла претерпеть изменения за время движения частиц до исследуемой области.

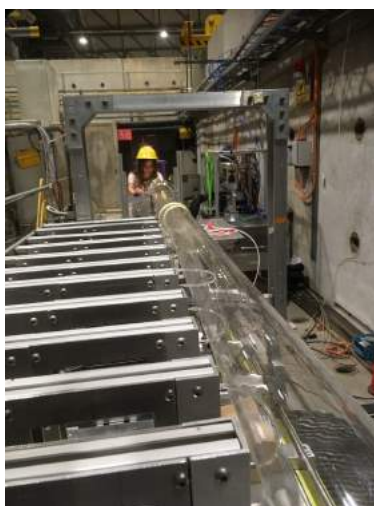


Рисунок 8 – Фотография с теста на пучке 2018 года

## Существующие решения. Использование сцинтилляционных волокон для мониторинга пучка

Тем не менее, существует немало известных решений проблем мониторинга положения пучка заряженных частиц в установке для тестирования детектора. Одним из таких решений является использование сцинтилляционных волокон в детекторе [18].

В экспериментах со встречным пучком для спектрометров удобной является цилиндрическая конфигурация детектора. Вокруг области столкновения обычно располагаются концентрические оболочки из волокон, а из-за гибкости таких волокон они могут быть размещены на оболочке в виде различных конфигураций (см. рис. 9): осевой (измеряющей координату  $r\phi$ , обернутой по окружности (определяющей продольную координату  $z$ ) и спиральной (обеспечивающей стереоизмерение ( $u$  или  $v$ )). Такая оболочка, называемая «суперслоем» (superlayer) может состоять из нескольких слоев волокон, в которых одновременно измеряются несколько координат. Волокна обычно имеют диаметр около 0.5 - 1 мм. Если же используются короткие волокна (длиной менее 1 м), то скорость взаимодействия становится небольшой, и тогда для считывания целесообразно использовать ПЗС-матрицу с усилением изображения.

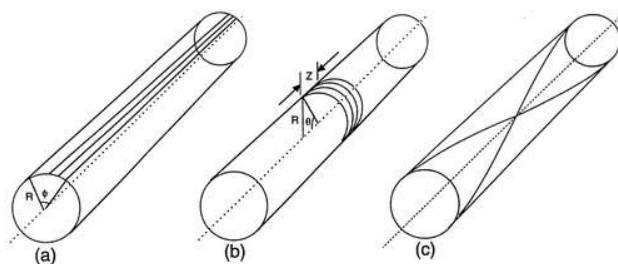


Рисунок 9 – Конфигурации размещения волокон на оболочке детектора

Пластиковый сцинтилляционный волоконный детектор сочетает в себе известную технику обнаружения частиц с использованием сцинтилляционных материалов и разработок в области флуоресцентных органических красителей, в области пластиковых волоконно-оптических технологий и в области фотодатчиков. Для иллюстрации принципа работы на рис. 10 схематически изображен универсальный волоконный детектор для «центрального слежения» в экспериментах со сталкивающимся пучком.

Принцип работы заключается в том, что пластиковые оптические волокна, легированные сцинтилляционными красителями, размещены на опорных цилиндрах, которые окружают точку вылета заряженных частиц. Образованные частицы проходят через волокна и оставляют там свою энергию, которая преобразуется в сцинтилляционный свет. Часть этого света оптически поглощается внутри волокна и перемещается к концу цилиндра, где легированное волокно соединяется с прозрачным оптоволоком. А прозрачное оптоволокну, в свою очередь, «направляет» свет на некоторое расстояние к фотодатчику.

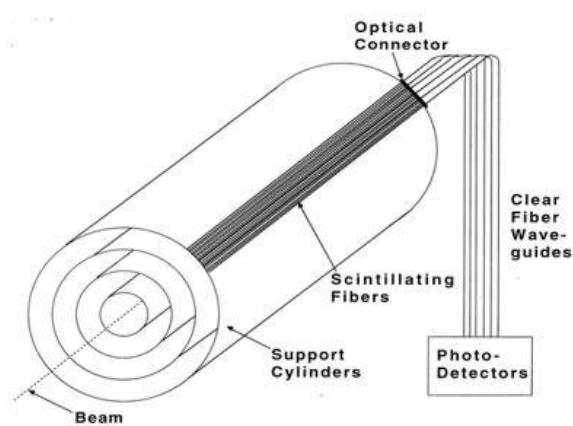


Рисунок 10 – Схематичное изображение установки, использующей сцинтилляционные волокна

## Существующие решения. Использование легированного кварца и оптоволокна для мониторинга пучка

Однако для мониторинга положения пучка сцинтилляционные волокна подходят только для низких токов из-за их очень низкой термостойкости. Но со временем для больших токов были предложены легированные  $Ce^{3+}$  кварцевые поверхности [19], благодаря чему наблюдалось сопротивление до температур 1300°C. Также было выявлено, что сцинтилляционный свет, испускаемый легированным  $Ce^{3+}$  кварцем, достигает максимума при 395нм, и поэтому данный материал хорошо подходит для считывания на основе фотоумножителей. Такие Легированные  $Ce^{3+}$  кремнеземные волокна были предложены для обнаружения нейтронов [20], лучевого мониторинга [21] и дозиметрии в адронотерапии [22]. Благодаря своим сцинтилляционным свойствам и термостойкости непокрытые легированные кварцевые волокна представляют собой перспективный инструмент для мониторинга положения пучка от десятых нА до сотен мкА. Детектор, основанный на достаточно быстрой сцинтилляции, легко адаптируется как к импульсным, так и к непрерывным лучам. Следует также отметить, что волокна, расположенные в определенном порядке, естественно подвержены неоднородному облучению, поэтому их относительная реакция изменяется со времени из-за повреждения, вызванного излучением, что требует частой процедуры калибровки. Более того, в случае производства радиоизотопов интенсивные поля излучения (в основном возникающие за счет нейтронов) не позволяют использовать front-end электронику или ПЗС-матрицы.

## Существующие решения. Использование одного легированного кварцевого волокна, движущегося поперечно пучку

В связи с изложенными выше фактами было разработано еще одно устройство, которое также решает проблему мониторинга позиционирования пучка заряженных частиц, однако которое тоже имеет свои некоторые недостатки. Как следует из названия раздела, в данном устройстве (представленное на рис. 11) используется одно легированное кварцевое волокно, которое движется поперечно пучку [23].

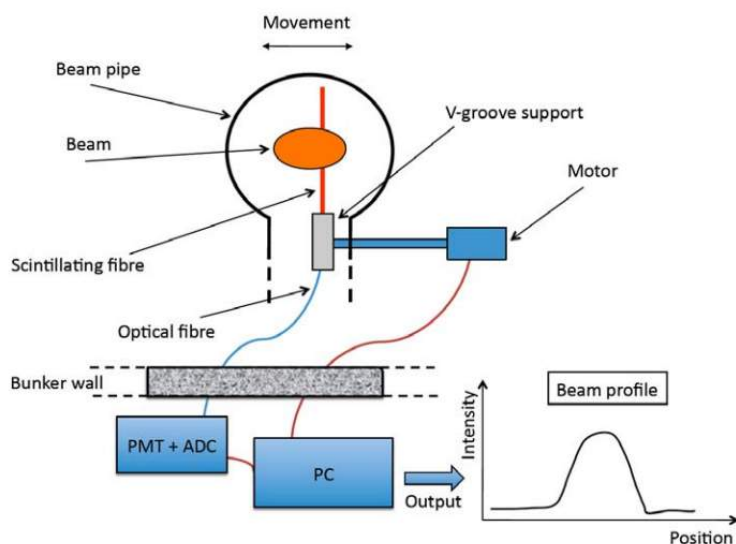


Рисунок 11 – Схематический вид установки, использующей одно легированное кварцевое волокно, движущееся поперечно пучку

В отличие от хрупких и трудных в обращении непокрытых легированных кварцевых волокон, здесь используется сенсорное волокно длиной около 10 см. Для передачи сигнала от сцинтилляции, индуцированной падающими частицами пучка, волокно соединяется с обычным оптоволоком с помощью V-образного соединения. Таким образом, сигнал может передаваться на расстояние нескольких метров с незначительным затуханием. Однако данная реализация требует некоторой осторожности, чтобы ограничить потери сцинтилляционных фотонов. V-образное соединение расположено внутри вакуумной камеры, и оптоволокно выводится к воздуху по специальному пути. Для получения дистанционного управления движением, V-образное соединение соединяется с линейным двигателем (или

можно соединить с любым другим подвижным устройством посредством вакуумной герметичной подачи линейного движения). Таким образом, отпадает необходимость в двигателе, расположенном внутри вакуумной камеры, а считывающее и управляющее устройство может быть расположено в, условно говоря, диспетчерской, вдали от полей излучения, создаваемых вблизи луча. Поскольку детектор состоит из одного волокна, проходящего поперек пучка, влияние износа из-за радиационного повреждения на равномерность отклика заметно подавляется.

### **Предлагаемое в данной работе решение**

Таким образом, перечисленные выше методики обладают некоторыми недостатками, которые имеют немалое значение при использовании в сфере экспериментальной физики элементарных частиц (в основном это вызвано тем, что многие методики разрабатывались и использовались или используются в медицинских целях), а именно:

- 1) Простые сцинтилляционные волокна — применяются только для малых токов из-за низкой термостойкости
- 2) Легированные  $Ce^{3+}$  кварцевые поверхности и оптоволокно — требуют частой калибровки, а также дороги в использовании.
- 3) Установка, использующая одно легированное кварцевое волокно, движущееся поперечно пучку, — сложная в сборке и эксплуатации, а также обладающая достаточно хрупкими и трудными в использовании компонентами (хоть и не такими хрупкими по сравнению с непокрытыми легированными кварцевыми волокнами)

Более того, представленные решения не совсем подходят поставленной задаче — непосредственному поиску пучка в пространстве в тестовых экспериментах, поскольку в тестовых экспериментах не требуется измерение параметров пучка, за исключением распределения интенсивности в пространстве.

Поэтому в данной работе описывается другое решение проблемы, основанное на использовании установки, основанной на применении координатного стола с детектором на кремниевом фотоумножителе (SiPM). Для прототипа этой установки будет использоваться детектор на основе кри-

сталла  $LaBr_3(Ce)$  и SiPM SensL FC30035. SiPM был выбран в связи с тем, что его использование освобождает экспериментатора от перечисленных выше недостатков применения других методик поиска пучка.

## Использование SiPM

Кремниевые фотоумножители (SiPM) — твердотельные однофотонно-чувствительные устройства на основе однофотонного лавинного диода, реализованного на общей кремниевой подложке [24; 25]. SiPM — один из основных и самых часто используемых видов устройств, используемых в экспериментальной физике элементарных частиц.

### 1) Устройство SiPM:

На кремниевом кристалле n-типа создаются микро-области p-типа. такая микро-область (ячейка) называется пикселем. Между ячейками p-типа и кристаллом n-типа образуется p-n переход. Число таких ячеек обычно составляет от 100 до 500 штук на  $\text{мм}^2$ . Каждая ячейка работает независимо и к каждой отдельно подключен высокоомный резистор и приложено одинаковое напряжение смещения. Пример изготовленного SiPM можно увидеть на рис. 12.

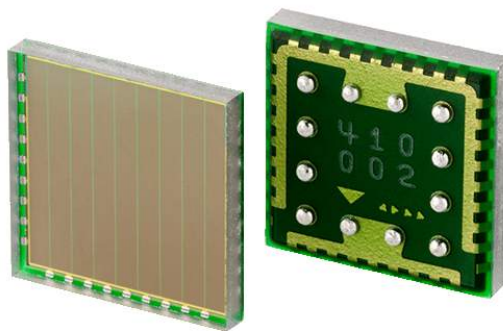


Рисунок 12 – SiPM

### 2) Принцип работы SiPM:

Попавший в ячейку фотон за счёт фотоэффекта создает свободные



носители — электрон и дырку. Напряжение смещения выбирается таким, чтобы в области р-п перехода даже одиночный носитель (как электрон, так и дырка) мог инициировать лавину, переходящую в Гейгеровский разряд.

Гашение Гейгеровского разряда происходит благодаря перераспределению части напряжения смещения с р-п перехода на резистор, в результате чего напряжение на р-п переходе уменьшается и разряд прекращается. Это аналогично гашению разряда в несамогасящемся счётчике Гейгера. Важно отметить, что в SiPM'e каждая ячейка является отдельным независимым микроприёмником фотонов.

### 3) Как снимается сигнал:

Чтобы понять, как происходит снятие сигнала с SiPM'a нужно обратить внимание на несколько следующих фактов:

- (а) Сигнал, снимаемый с SiPM — сумма всех сигналов (т.е. от всех сработавших ячеек);
- (б) Амплитуда не зависит от числа зарядов;
- (в) Сигналы от каждой сработавшей ячейки одинаковый;
- (г) Суммарный сигнал пропорционален числу фотонов, попавших в ячейки SiPM'a (т.е. числу сработавших ячеек);
- (д) Число фотонов в одной ячейке должно быть в несколько раз меньше числа ячеек, т.е. чтобы в каждую ячейку попадал один фотон, тогда SiPM будет пропорциональным фотоприёмником, т.е. сигнал на выходе будет пропорционален числу фотонов;
- (е) При увеличении интенсивности световой вспышки амплитуда сигнала с SiPM'a выходит на насыщение и SiPM теряет свойство пропорциональности, т.е. свет вспышки не должен быть слишком интенсивным;
- (ж) Чувствительная область по отношению к полной поверхности составляет от 30% до 80%;
- (з) Максимальная чувствительная площадь составляет примерно  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ ;
- (и) Коэффициент умножения:  $M \approx 10^5 \div 10^8$

Достоинства SiPM:

- 1) Работа в магнитных полях;
- 2) Низкое напряжение питания (порядка  $50 \div 60$  В);
- 3) Хорошее временное разрешение

Недостатки SiPM:

- 1) Высокие шумы (темновой счёт)

### **Использование сцинтиллятора $LaBr_3(Ce)$**

Для данной задачи подходит использование практически любого сцинтиллятора. В связи с тем, что для испытания прототипа установки было проще использовать сцинтиллятор  $LaBr_3(Ce)$  (был более доступен для использования), об этом сцинтилляторе и пойдет дальше речь.

Сцинтиллятор бромид лантана  $LaBr_3(Ce)$  представляет собой кристалл, который по своим свойствам не уступает кристаллу  $NaI(Tl)$ . Для бромида лантана среднее энергетическое разрешение для линии 662 кэВ изотопа  $Cs137$  составляет порядка 3,2% и световыход, превышающий световыход  $NaI(Tl)$ . На базе кристаллов  $LaBr_3(Ce)$  производятся сцинтилляционные блоки детектирования, обладающие уникальными свойствами для класса сцинтилляционных детекторов:

- 1) энергетическое разрешение для энергии гамма-излучения 662 кэВ от 2,5% до 3,5%. Для кристалла  $NaI(Tl)$  аналогичного размера при тех же условиях, разрешение составляет не менее 6%;
- 2) более высокая эффективность регистрации, чем у детектора с аналогичными размерами кристалла  $NaI(Tl)$ ;
- 3) высокая температурная стабильности характеристики преобразования, обеспечиваемая уникально низким температурным коэффициентом световыхода сцинтилляционного материала



Рисунок 13 – Кристалл  $LaBr_3(Ce)$

Сцинтиллятор  $LaBr_3(Ce)$  обладает собственной внутренней активностью, обусловленной наличием нестабильного изотопа  $^{138}La$  и загрязнением  $^{227}Ac$ . Собственная активность и сильная анизотропия температурного коэффициента линейного расширения являются существенными недостатками этого сцинтиллятора.

## Преимущества и недостатки предложенного решения

Преимущества данной установки состоят в том, что:

- 1) Установка достаточно простая и удобная в использовании;
- 2) Установка достаточно дешевая в реализации по сравнению с использованием оптоволокну или легированного кварца;
- 3) Управление будет как ручным с использованием контроллера, так и дистанционным с помощью соответствующего программного кода. Такая вариативность полезна, например, когда экспериментатор не может находиться рядом с установкой и соответственно он будет управлять ею дистанционно, либо наоборот – если возникнет необходимость вручную изменить положение платформы с детектором;
- 4) Установка обладает маневренностью, что будет полезно в случае, когда нужно будет обеспечить быстрое перемещение детектора на SiPM, например, когда исследуемый детектор находится на пучке ограниченное время

Недостатком является тот факт, что с её помощью невозможно отследить профиль пучка (в отличие от аналогов), так как разрабатывается она по принципу true/false по факту наличия пучка в данной точке пространства.

# РЕЗУЛЬТАТЫ

## 2. РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕСТ

### 2.1. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Заключительным этапом тестирования образцов sTGC — подача напряжения на весь детектор и обработка результатов с целью поиска дефектных «горячих» областей. Иными словами, требуется найти в детекторе такие точки (которые могут быть как на катодных платах, так и на проволоках), которые чаще всего будут показывать повышенное значение тока на них. После серии экспериментов были получены файлы с данными о результатах таких экспериментов для различных типов детекторов. Всего было получено более 500 файлов, в каждом из которых содержалась информация о 15 измерениях с интервалом в  $\sim 1$  с в каждой его точке с некоторым шагом. Все испытания проводились для нескольких типов детекторов: QL1, QL1\_4, QL1C и т.д. Для начала работы с этими файлами был выбран самый распространенный тип детектора — QL1. Все первые версии кода в первую очередь описывали работу именно этого типа. В дальнейшем будет произведен предварительный отбор файлов по типам детектора и можно будет смотреть результаты обработки для каждого типа детектора по выбору. Итак, в каждом испытании содержалась информация о различных снимаемых величин, например: координаты  $x$  и  $y$  исследуемой в данной момент точки, снимаемые силы тока и напряжения в них. Пример такого файла с данными можно увидеть на рис. 14.

```

# ***** Output of QScanner program *****
# Program version: 1.11 for MEPHI cite. Compiled on Mar 9 2017 with ROOT version 5.34/30
# Thu, 09 Mar 2017 20:18:14 +0000 (GMT) +422468000 nsec

# Test measurements

<>FFVERSION 2      File format version
<>HVFREQ 1000      Data measurement frequency (msec)
<>XMIN -7.5        Lower limit of histogram on X (mm)
<>XMAX 202.5        Upper limit of histogram on X (mm)
<>XSTEP 15          Histogram step on X (mm)
<>NBINSX 14         Number of bins on X
<>YMIN -7.5        Lower limit of histogram on Y (mm)
<>YMAX 112.5        Upper limit of histogram on Y (mm)
<>YSTEP 15          Histogram step on Y (mm)
<>NBINSY 8          Number of bins on Y
<>ScanMode 0 (CONTINUOUS)
<>BackMoveMode 0 (SNAKE)
<>ScanDirection 0 (HORIZONTAL)
<>RectangularArea 1 (Yes)
<>Xmax 200 (mm)
<>Ymax 100 (mm)
<>ScanSpeed 15 (auto, mm/sec)
<>XCollimatorSize 30 (mm)
<>YCollimatorSize 30 (mm)
<>XCalibration 0.0938025 (mm/step)
<>YCalibration 0.0938025 (mm/step)

# Before scan of next raw/column: x=0.000000, y=0.000000, time=0.000494, direction=right, distance=195.000000
#
```

#	X	Y	t	I1	I2	I3	I4	HV1	HV2	HV3	HV4	XRayV	XRayI	XRTemp
	0.00	0.00	0.99	956.6	210.4	38.62	7.679	2898.1	2900.4	2900.4	2901.0	51.4	73.5	30.8
	9.94	0.00	1.99	1084	187.3	41.74	8.089	2900.5	2898.0	2898.4	2898.9	49.1	78.5	30.2
	24.48	0.00	2.99	1046	201.6	39.83	7.691	2899.7	2900.4	2899.1	2899.5	48.6	76.4	30.4
	39.02	0.00	3.99	1008	204.4	41.44	8.105	2898.9	2900.2	2901.4	2899.6	49.9	76.0	30.9
	53.47	0.00	4.99	1011	209.5	40.43	8.003	2900.3	2899.9	2899.3	2899.2	51.5	71.8	30.0
	68.10	0.00	5.99	998.2	210.1	38.7	8.045	2900.1	2899.8	2900.7	2899.1	52.4	74.9	32.0
	82.64	0.00	6.99	992.5	189.6	40.35	7.96	2900.2	2899.5	2898.5	2899.7	51.8	72.3	30.8

Рисунок 14 – Пример выходного файла с данными о тестировании

## Цветовая диаграмма сил тока в рабочей плоскости детектора

Первым этапом обработки результатов было построение цветовой диаграммы рабочей плоскости детектора для наглядного выявления тех областей детектора типа QL1, в которых наблюдаются повышенные значения силы тока по сравнению с остальной частью детектора. Сначала этот этап был выполнен не для всех файлов, а только для одного из них. Это было сделано с целью того, чтобы отладить работу кода, выполняющего данную задачу. Результат можно увидеть на рис. 15.

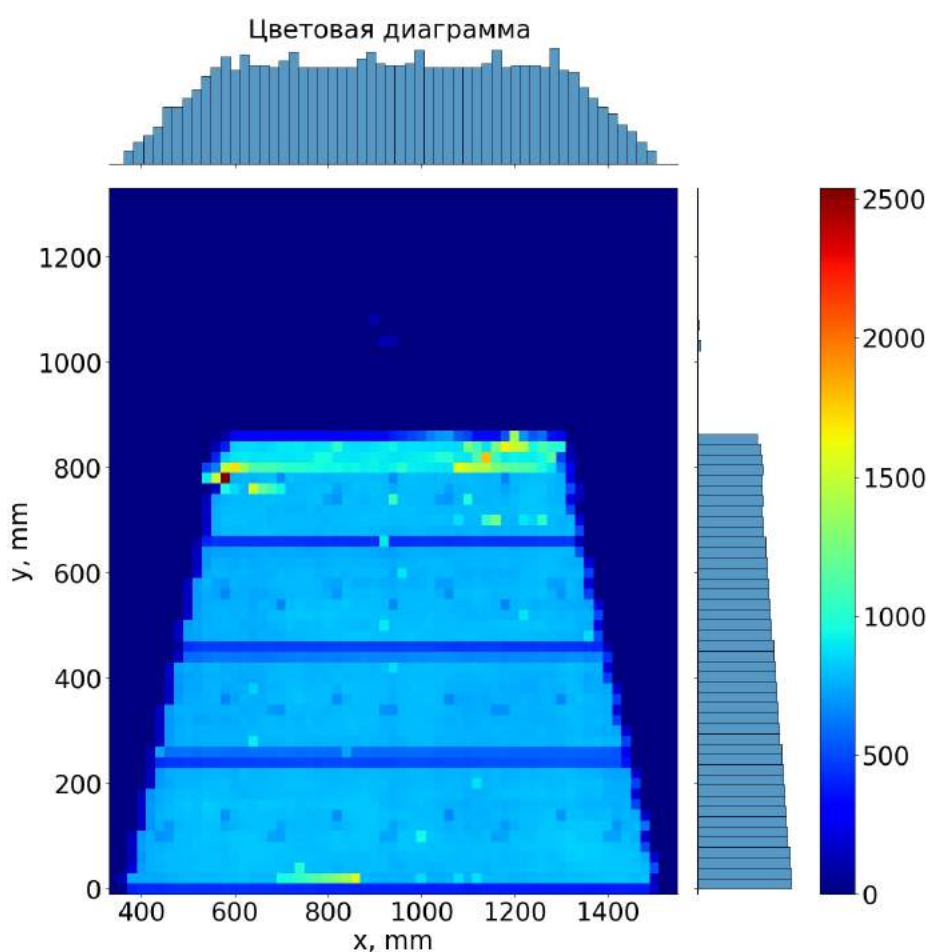


Рисунок 15 – Цветовая диаграмма сил тока в одном наборе испытаний детектора типа QL1

Как оказалось, данное представление результатов эксперимента по тестированию не является максимально информативным для нашей задачи. Тем не менее эта версия кода была сохранена и оставлена для последующих применений в этом или других экспериментах.

Можно заметить несколько цветных бинов, которые расположены выше плоскости детектора, в которой происходит основное наполнение цветовой диаграммы (см. рис. 16).

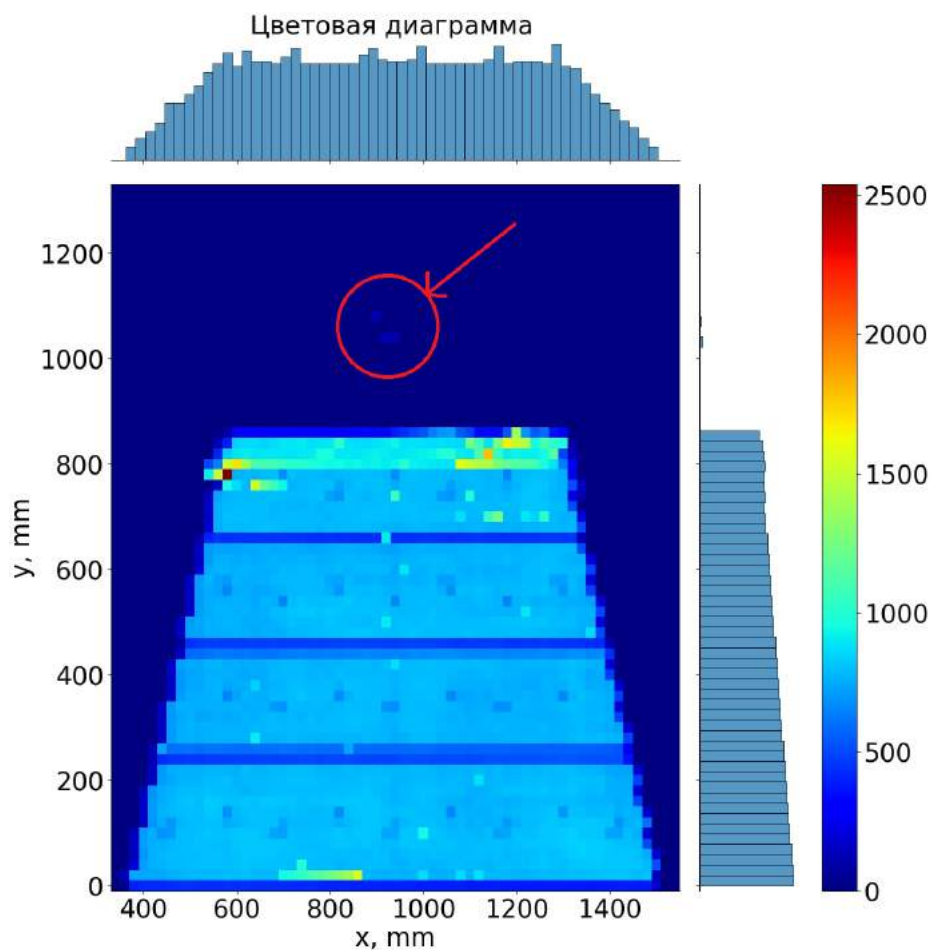


Рисунок 16 – Несколько цветных бинов, расположенных выше основной плоскости детектора



Это связано с тем, что по всей области детектора во время тестирования снимаются две величины сил тока:  $I_1$  и  $I_2$ . В области от 0 до 1525 мм по оси  $X$  и от 0 до 880 по оси  $Y$  значения сил тока  $I_1$  можно представить в виде цветовой диаграммы, которую можно увидеть на рис. 15, при этом снимаемые значения сил тока  $I_2$  во всей этой области в среднем равны 0. В области, расположенной в диапазоне 570 - 1310 мм по оси  $X$  и 870 - 1320 мм по оси  $Y$  (см. рис 17) можно составить цветovou диаграмму значений сил тока  $I_2$  (см. рис. 18), которая будет наглядно показывать их распределение по этой области детектора, а значения сил тока  $I_1$  в этой верхней области в среднем не превосходят 10 мА.

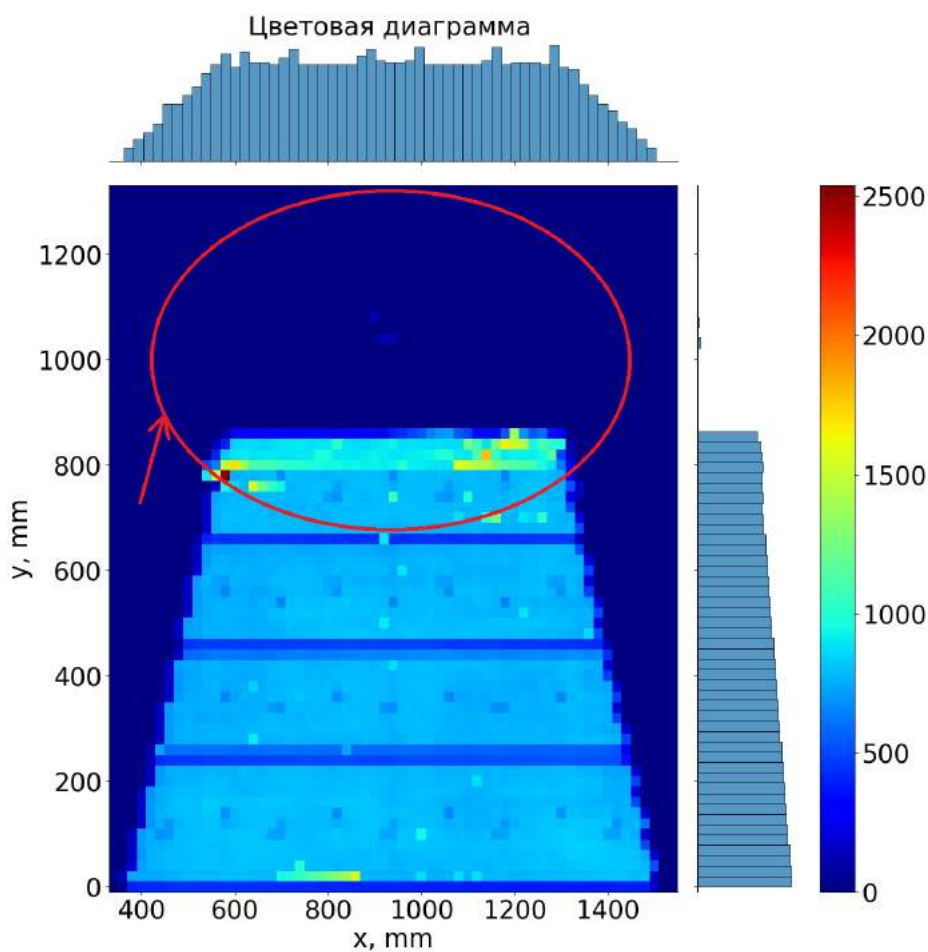


Рисунок 17 – Верхняя область детектора

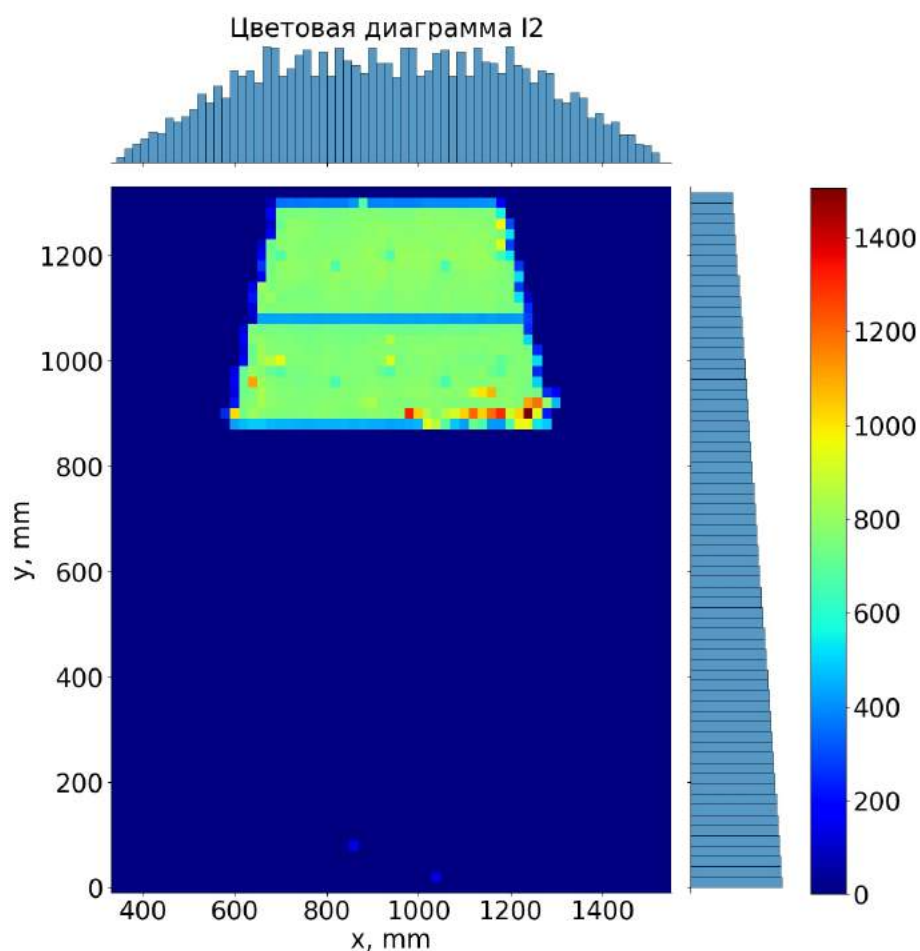


Рисунок 18 – Цветовая диаграмма значений сил тока  $I_2$  в верхней области детектора

Однако иногда наблюдаются резкие повышения значения силы тока  $I_1$  в этой верхней области детектора, которые тоже могут сигнализировать о некотором дефекте в этой области.

Одно из таких резких повышений и можно увидеть на рис. 16.

## Цветовая диаграмма числа превышений среднего значения тока в рабочей плоскости детектора

Теперь требуется изменить подход к составлению цветовой диаграммы таким образом, чтобы финальный вид наглядно показывал такие точки в рабочей плоскости детектора, которые чаще всего имеют превышение среднего значения тока по детектору в конкретном наборе испытаний. Сначала этот этап был так же выполнен не для всего массива файлов, а только для одного из них для отладки работы с ним. Результат построения такой цветовой диаграммы можно увидеть на рис. 19.

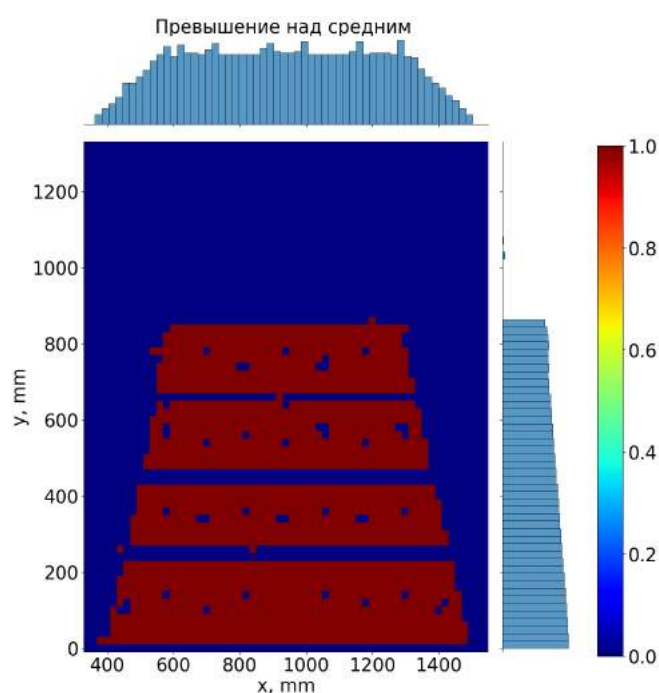


Рисунок 19 – Цветовая диаграмма превышения сил тока над средним по детектору типа QL1 в одном наборе испытаний

Вкрапления синих бинов на вышепредставленной цветовой диаграмме, которые с виду имеют систематический характер, отвечают за места прикрепления детектора к опорам или другим конструкционным особенностям. Если найти эти точки в текстовом выходном файле с тестирования (см. рис. 20), можно удостовериться, что среднее значение силы тока в них меньше среднего по детектору (среднее по детектору в этом наборе испытаний:  $I_{\text{ср.}} = 725$  мА и по сравнению с соседними точками).

634.96	139.99	7583.16	789	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
634.96	139.99	7584.16	802.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
634.96	139.99	7585.16	795.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7588.16	786.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7589.17	775.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7510.17	772.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
594.96	139.99	7511.16	779.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7512.16	781	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7513.16	784	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7514.16	781.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7515.16	784	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7516.16	774	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7517.16	781	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7518.16	780	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7519.17	782	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7520.17	785.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7521.16	769.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
594.96	139.99	7522.16	783	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7524.16	732	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
574.96	139.99	7525.16	676	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7526.16	673.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7527.16	673	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
574.96	139.99	7528.16	676	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7529.17	671	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
574.96	139.99	7530.17	680	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7531.16	670	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7532.16	672.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7533.16	671	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7534.16	669	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7535.16	679	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
574.96	139.99	7536.16	672.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7537.16	676	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
574.96	139.99	7538.16	681	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
554.93	139.99	7540.17	671.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7541.16	793.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7542.16	798.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7543.16	807.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7544.16	811.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7545.16	801	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7546.16	803.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7547.16	808	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.3	31.4
554.93	139.99	7548.16	806.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
554.93	139.99	7549.17	807	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
554.93	139.99	7550.17	812	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
554.93	139.99	7551.16	800	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
554.93	139.99	7552.16	810	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
554.93	139.99	7553.16	812	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
554.93	139.99	7554.16	812	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
534.93	139.99	7557.16	818	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
534.93	139.99	7558.16	813	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4
534.93	139.99	7559.17	821.5	0	0	0	3199.9	3200.1	0.0	0.0	24.9	5.2	31.4

<I1> = 780 mA

<I1> = 674 mA

<I1> = 808 mA

Рисунок 20 – Для точки с координатами  $x=575$  мм и  $y=140$  мм замечено пониженное значение тока по сравнению с соседними точками по оси  $X$

Также стоит отметить, что был несколько изменён подход к обработке получаемых из файлов с данными результатов. Для каждой точки в эксперименте производилось по 15 испытаний. Это было сделано для того, чтобы исключить процесс, происходящий в измерительном модуле блока питания, который некоторым образом усредняет внутри себя значения силы тока, выдавая на выходе изменённые значения силы тока на нескольких первых испытаниях для каждой из точек (см. рис. 21). Чтобы это учесть, было предпринято следующее: первые 4 значения были отброшены, а оставшиеся 11 усреднены для удобства в дальнейшем использовании.

qrslmno_ukl_2018-03-07_16-10 - Блокнот													
Файл Правка Вставка Вид Справка													
<>TetragonX 340 670 1200 1530 (mm)													
<>TetragonY 0 1315 1315 0 (mm)													
<>ScanSpeed 20 (auto, mm/sec)													
<>XCollimatorSize 40 (mm)													
<>YCollimatorSize 40 (mm)													
<>XCalibration 0.03124 (mm/step)													
<>YCalibration 0.02821 (mm/step)													
339.99	0.00	22.25	8	0	23.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	23.25	7.5	0	20	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	24.25	7.5	0.5	20	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	25.25	7	0	20	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	26.26	9	0	20.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	27.25	6.5	0	21	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	28.25	8.5	0	20.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	29.25	8.5	0	21	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	30.25	8	0	19.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.3	34.3
339.99	0.00	31.25	8.5	0	21.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
339.99	0.00	32.25	7.5	0	20.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.3	34.3
339.99	0.00	33.25	8.5	0	19.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.3	34.3
339.99	0.00	34.25	8.5	0	20	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.3	34.3
339.99	0.00	35.25	8	0	19	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.3	34.3
339.99	0.00	36.25	7.5	0	20	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.3	34.3
359.99	0.00	39.25	12	0	23	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	40.25	17.5	0	35	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	41.25	16.5	0	34.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	42.25	17	0	34	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	43.25	16	0	33.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	44.25	15.5	0	33.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	45.25	16	0	33	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	46.25	17.5	0	35.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	47.25	16.5	0	33.5	0	3199.8	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	48.25	15.5	0	35	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	49.25	15	0	34	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	50.25	15.5	0	34	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.3	49.8	10.2	34.3
359.99	0.00	51.25	14.5	0	34.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.3	34.3
359.99	0.00	52.25	17.5	0	34.5	0	3199.9	3200.1	3199.8	3200.2	49.8	10.3	34.3

Рисунок 21 – Заметные отличия силы тока в первых испытаниях в одной из точек от среднего в этой точке в этой серии испытаний

## Цветовая диаграмма числа событий, в которых снимаемый ток ниже среднего по детектору

Аналогично с предыдущим пунктом можно посмотреть на такие события, в которых снимаемый ток оказывается ниже среднего тока по детектору. В последующем нам понадобится такой подход к анализу для определения «холодных зон».

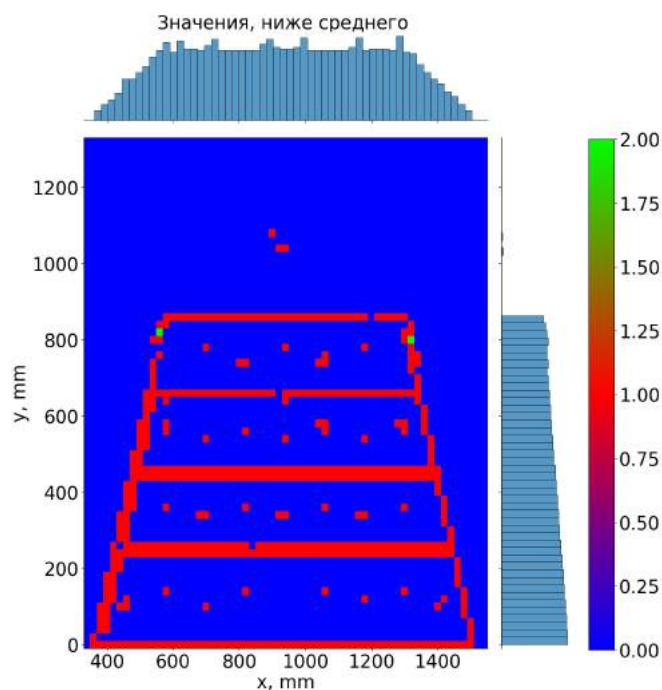


Рисунок 22 – Цветовая диаграмма числа событий, в которых сила тока ниже средней по детектору типа QL1 в одном наборе испытаний

Объяснение видимой систиматики красных бинов между горизонтальными линиями (соответствующими опорам детектора), которую можно увидеть на рис. 22 и нескольких «выбившихся» красных бинов выше основной плоскости детектора — точно такое же, как и было представлено в пунктах 2.1 и 2.1. Также стоит отметить следующие особенности отображения цветовой диаграммы в данном случае, а также во всех дальнейших случаях, когда речь будет идти об анализе «холодных» зон, то есть о цветовых диаграммах, соответствующих событиям, когда снимаемая сила тока ниже средней по детектору:

- 1) Красные горизонтальные и наклонные вертикальные линии соответствуют границам плоскости детектора. Явление того, что на границах детектора снимаемая сила тока ниже, чем средняя по детектору

не говорит о дефектности точек, соответствующих этим границам. Эти линии скорее можно рассматривать в качестве визуального представления фактических границ плоскости детектора;

- 2) Зеленые или синие бины на красных линиях, описанных выше, — это результат ошибки нормировки бинирования. Во время тестирования рентгеновский пучок сканирует всю плоскость детектора с шагом по оси  $X$  и по оси  $Y$  в 20 мм. Однако, когда сканер доходит до фактической границы детектора, он делает шаг не в 20 мм, а в ту величину, которая приведет сканер в точку фактической границы детектора. Величина такого измененного шага варьируется от нескольких мм до нормального шага в 20 мм. Поэтому при анализе при использовании нужного биннинга не получилось избежать такого явления, когда в один бин попадали сразу два измерения силы тока — такие бины на вышепредставленной цветовой диаграмме являются зелеными — либо когда в бин не попадало ни одного значения — такие бины на вышепредставленной цветовой диаграмме являются синими. Поэтому, эти бины не следует рассматривать в качестве сигнала о местонахождении дефектных зон. Такая ошибка будет и в дальнейшем встречаться в анализе «холодных» зон.

### **Цветовая диаграмма числа превышений тока на некоторый процент от среднего значения тока**

Большую ценность также представляют цветковые диаграммы, показывающие превышения снимаемых значений тока на 10%, 20% и т.д. над средним по детектору в конкретном наборе испытаний. Анализируя данные, было принято решение смотреть превышения вплоть до 80%-го превышения над средним, так как превышение на 90% и дальше имеют мало входных событий (менее 0.3% от общего числа событий, которые отвечают превышениям над средним значением тока). Это было реализовано аналогичным способом, результаты можно увидеть на рисунках 23, 24 ниже:



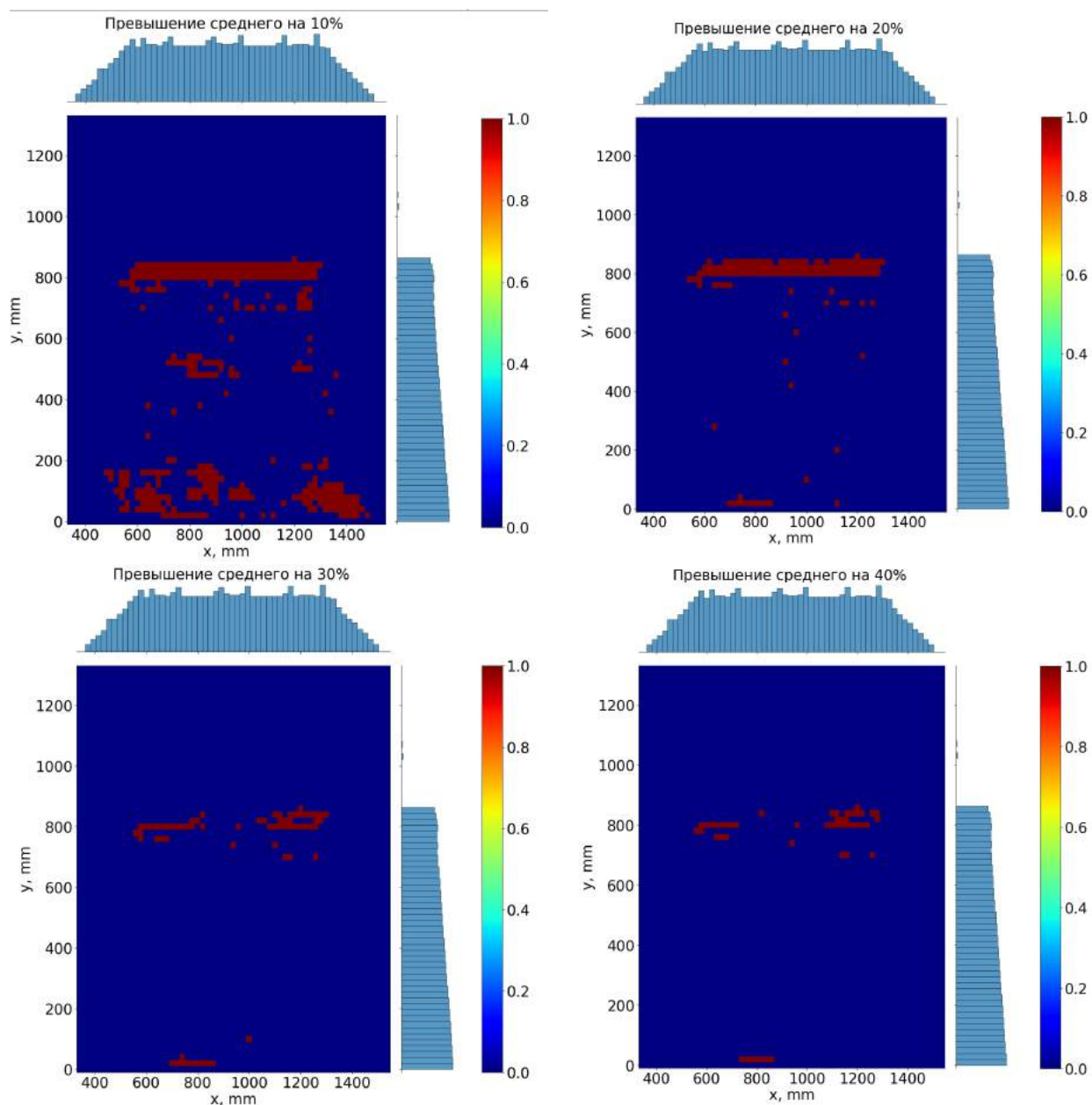


Рисунок 23 – Цветовая диаграмма превышения сил тока на 10 - 40% от среднего по детектору типа QL1 в одном наборе испытаний

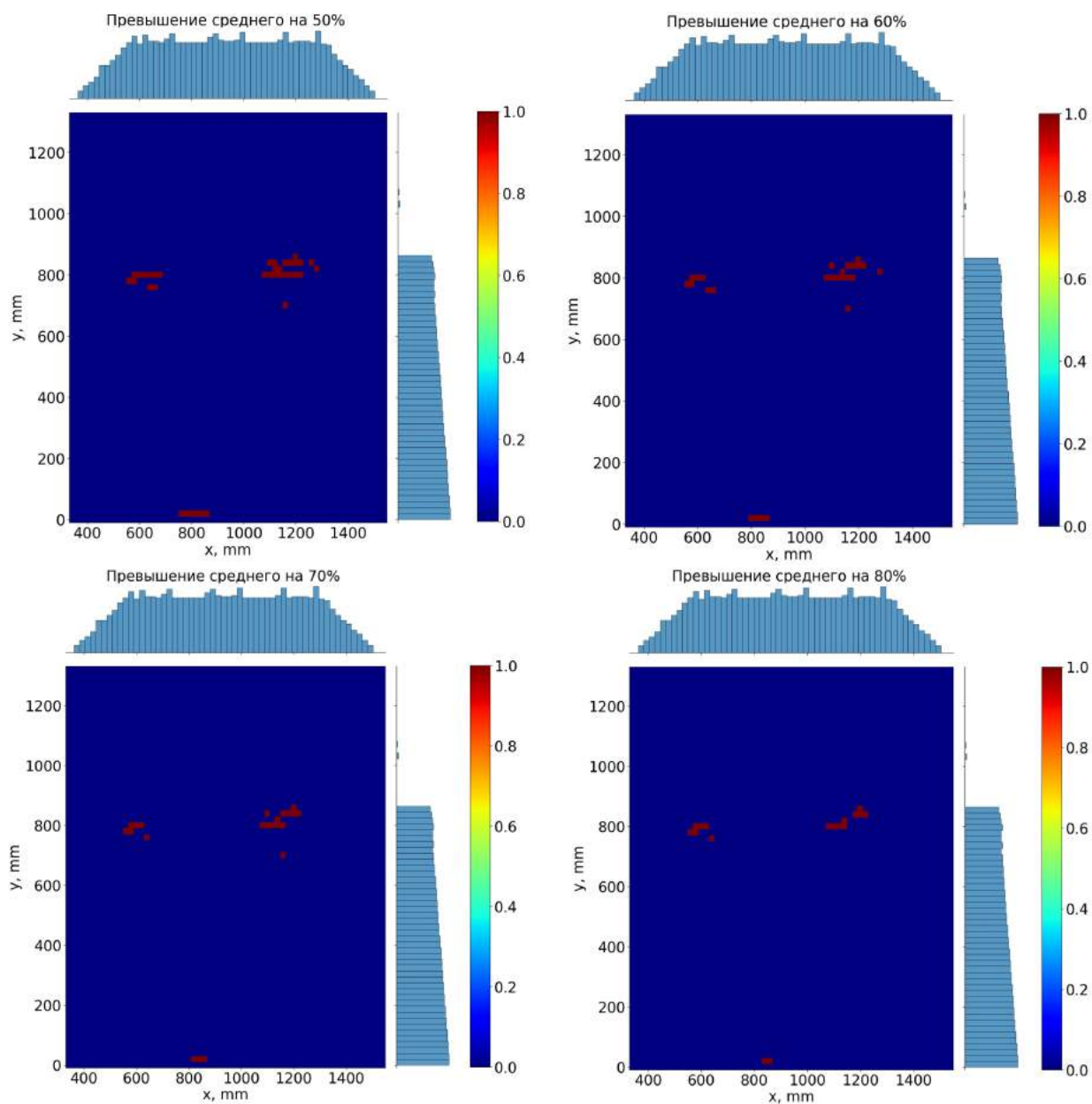


Рисунок 24 – Цветовая диаграмма превышения сил тока на 50 - 80% от среднего по детектору типа QL1 в одном наборе испытаний



## Цветовая диаграмма числа событий, в которых снимаемый ток ниже среднего значения на некоторый процент от среднего

Аналогично с предыдущим пунктом можно получить цветové диаграммы, показывающие такие события, при которых снимаемая сила тока ниже среднего по детектору на 10%, 20% и т.д.. Такие цветové диаграммы можно увидеть ниже на рис. 25, 26.

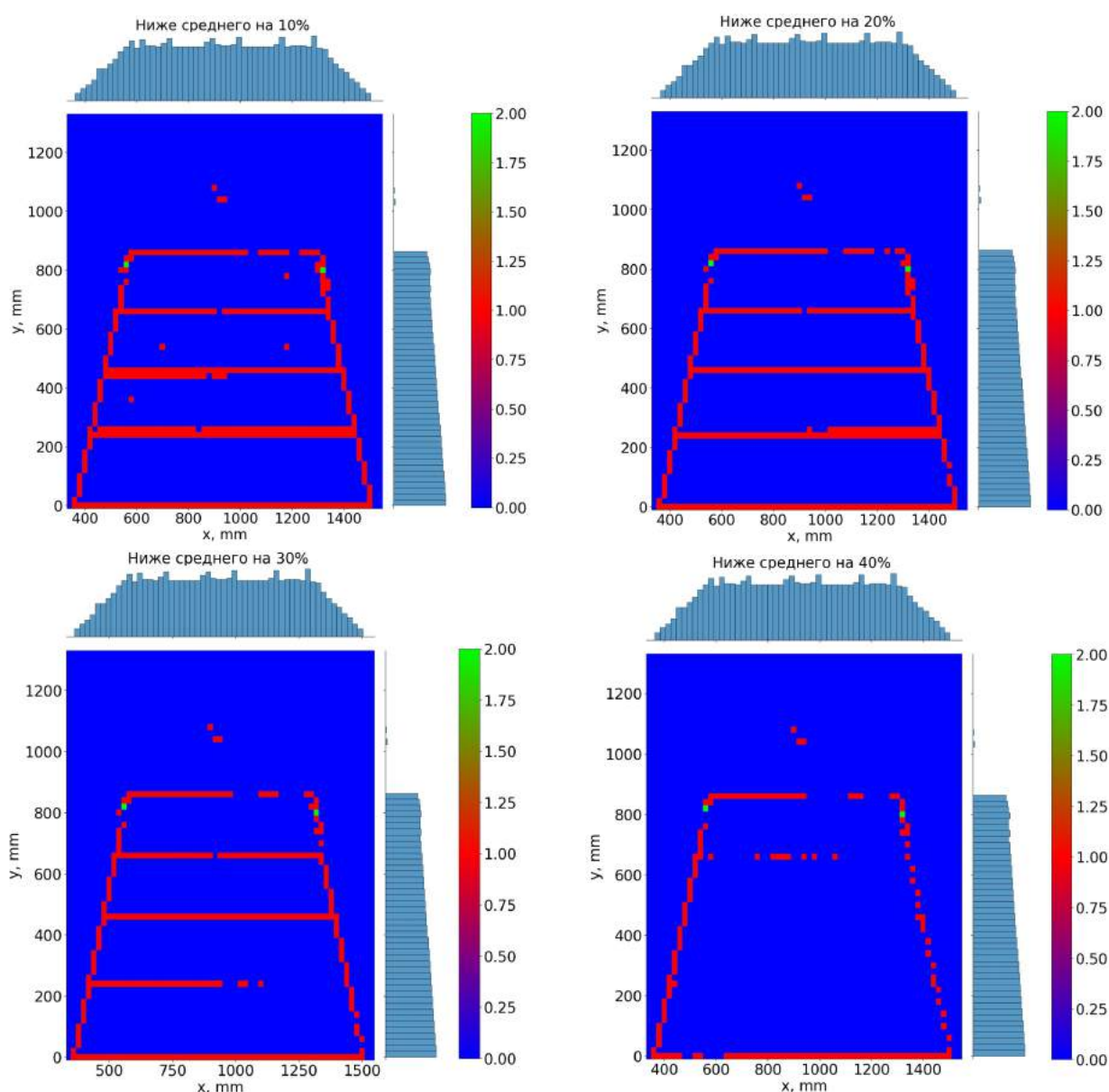


Рисунок 25 – Цветовая диаграмма событий, в которых сила тока ниже на 10 - 40% от среднего по детектору типа QL1 в одном наборе испытаний

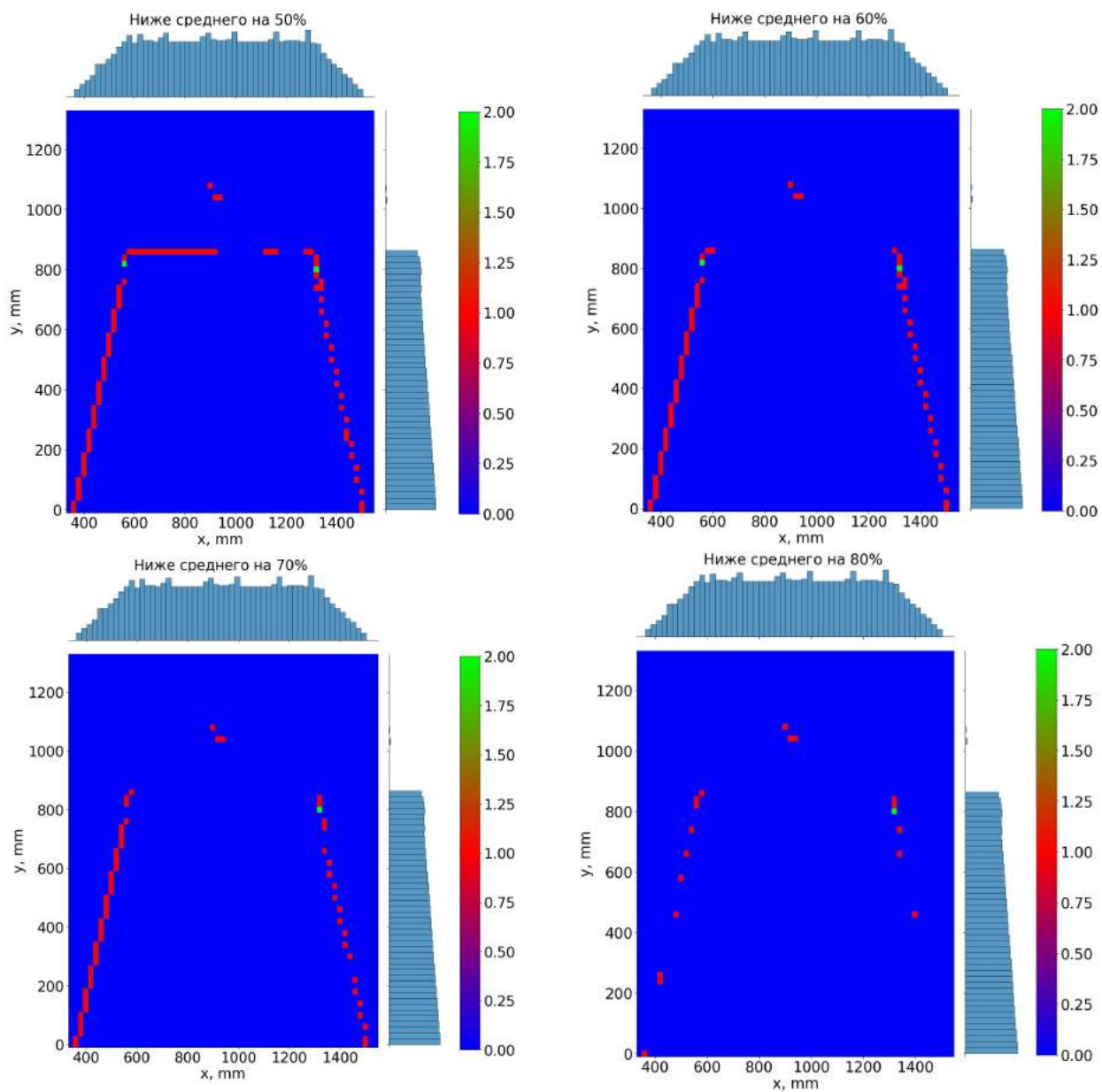


Рисунок 26 – Цветовая диаграмма событий, в которых сила тока ниже на 50 - 80% от среднего по детектору типа QL1 в одном наборе испытаний

## Цветовая диаграмма числа превышений тока на некоторый процент от среднего значения тока для массива наборов испытаний

Следующим шагом был анализ не одного файла с данными, отвечающими одному набору испытаний для конкретного типа детектора, а массива таких файлов. В этом случае цветовая градация выглядит нагляднее, позволяя определить примерное положение дефектных областей детектора. Для начала была построена Цветовая диаграмма, отвечающая превышению над средним (рис. 27), а на рисунках 28, 29 — для превышений на 10 - 80% над средним для массива наборов испытаний детектора типа QL1. Цветовая градация следующая: чем чаще в точке обнаруживается превышение значения тока над средним (или на определенный процент от среднего) — тем краснее эта точка отображается на цветовой диаграмме. Благодаря последним цветовым диаграммам можно определить, в каких областях чаще всего и сильнее всего происходят превышения сил тока над средним, то есть какие области вероятнее всего являются дефектными.

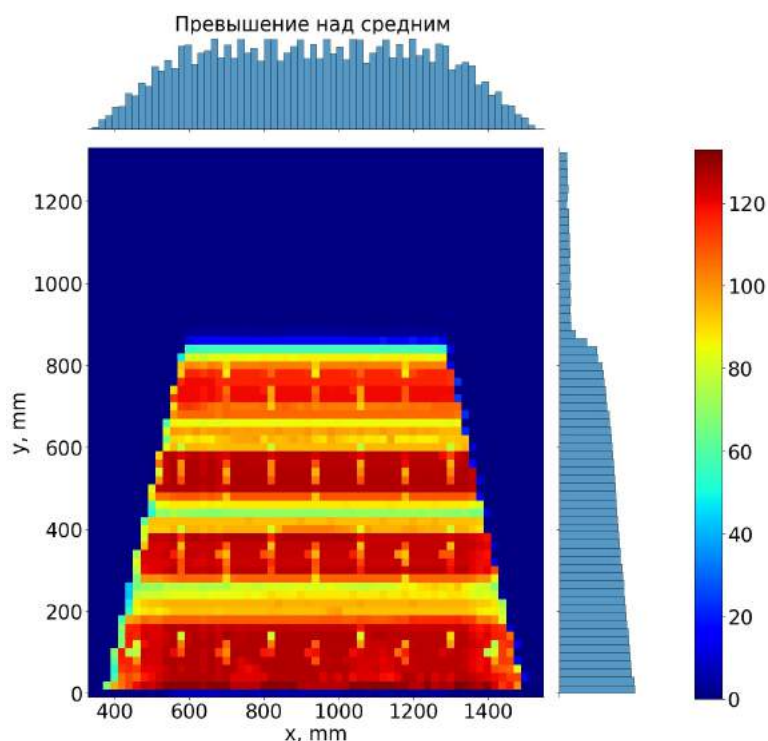


Рисунок 27 – Цветовая диаграмма превышения сил тока над средним по детектору типа QL1 в массиве из наборов испытаний

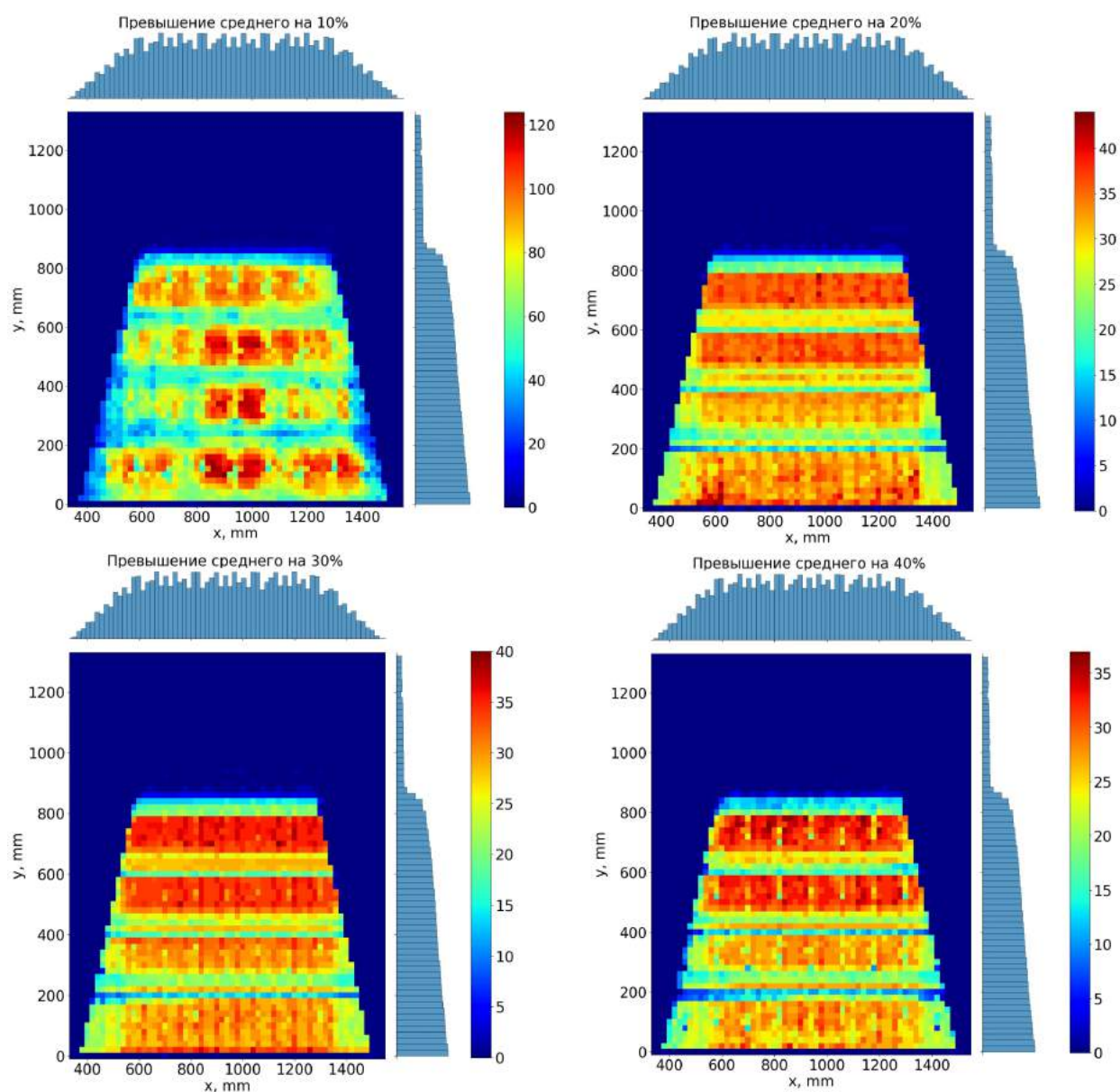


Рисунок 28 – Цветовая диаграмма превышения сил тока на 10 - 40% от среднего по детектору типа QL1 в массиве из наборов испытаний



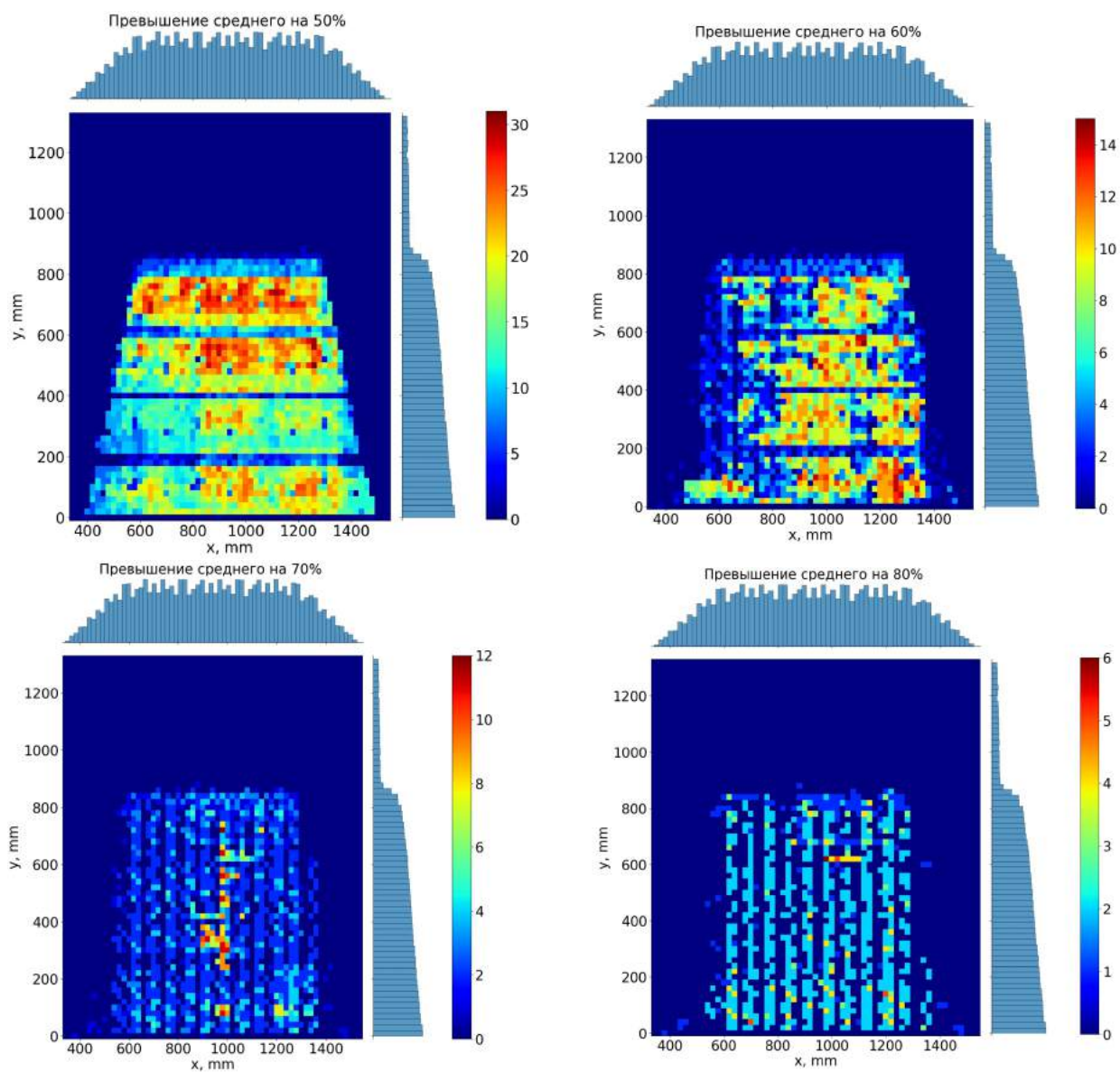


Рисунок 29 – Цветовая диаграмма превышения сил тока на 50 - 80% от среднего по детектору типа QL1 в массиве из наборов испытаний

По вышепредставленным цветовым диаграммам можно сделать предположение о местонахождении «горячих» зон детектора (см. рис. 30):

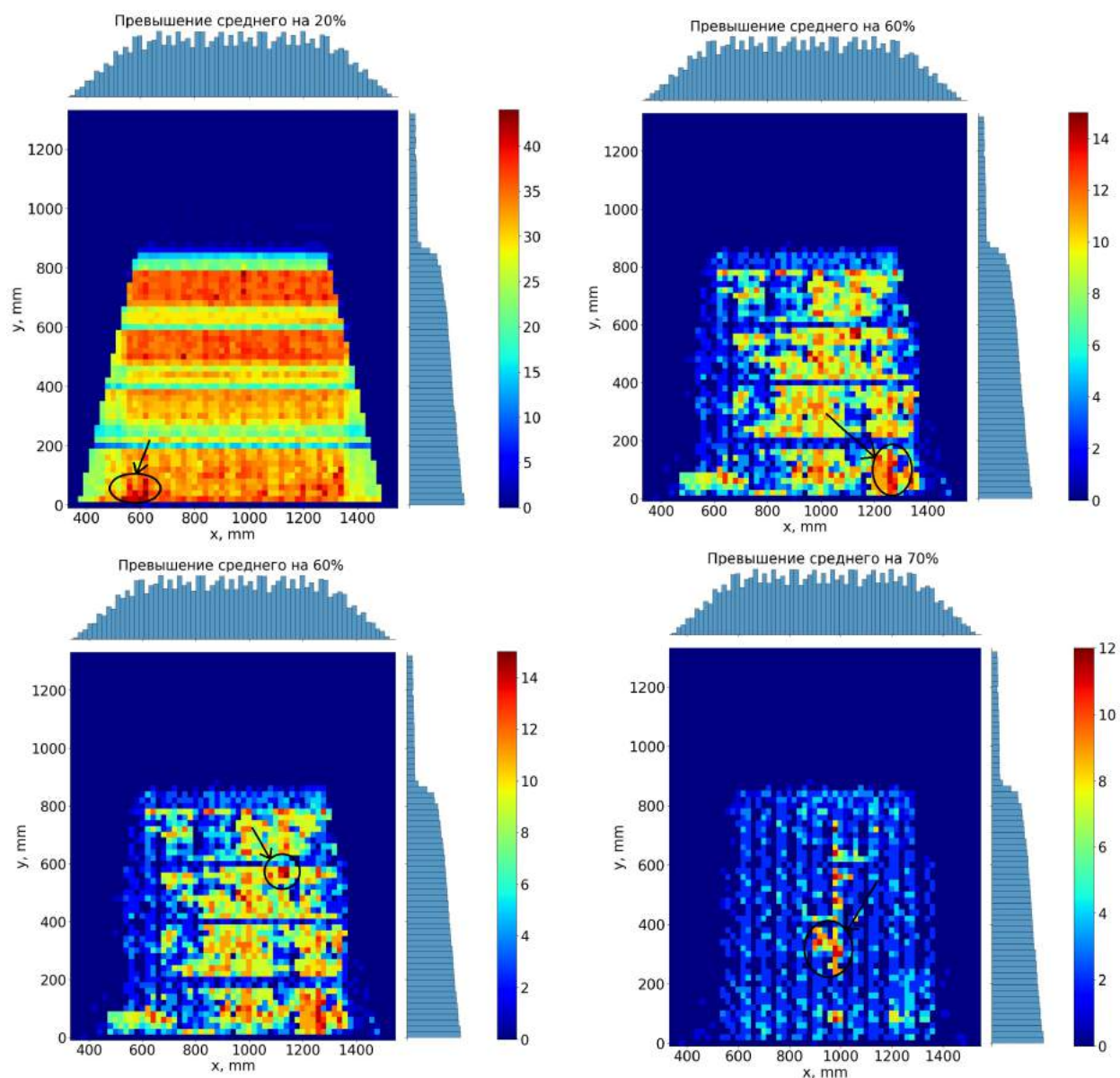


Рисунок 30 – Местонахождение возможных «горячих» зон

### Цветовая диаграмма числа событий, в которых снимаемый ток ниже среднего значения на некоторый процент от среднего для массива наборов испытаний

Аналогично с предыдущим пунктом можно получить цветные диаграммы, показывающие такие события, при которых снимаемая сила тока ниже среднего по детектору на 10%, 20% и т.д. для всего массива наборов испытаний. Цветовую диаграмму событий, в которых сила тока ниже среднего по детектору можно увидеть на рис. 31. Цветовые диаграммы событий, в которых сила тока ниже на определенных процент от среднего по детектору можно увидеть на рис. 32, 33. Такой анализ должен помочь определить местонахождение «холодных» зон при их наличии в детекторе.

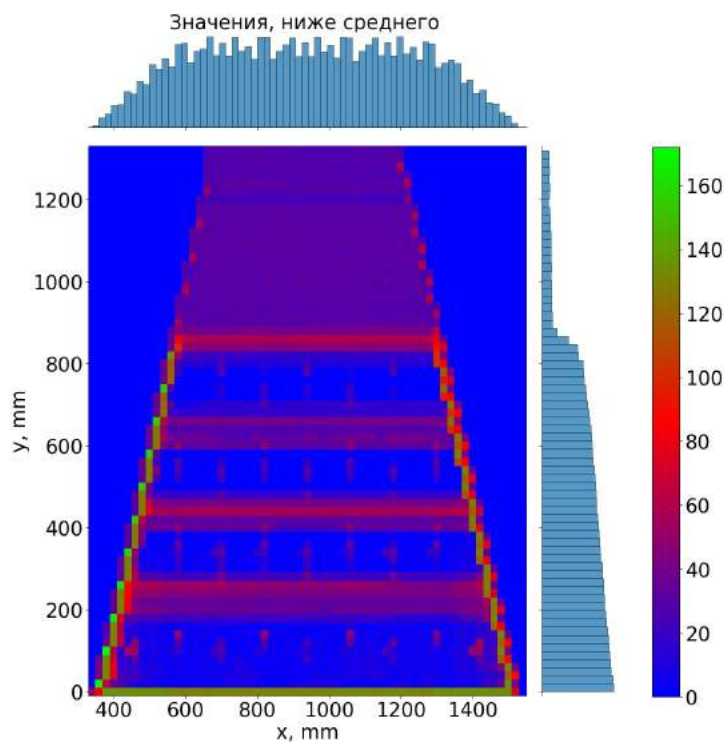


Рисунок 31 – Цветовая диаграмма событий, в которых сила тока ниже среднего по детектору типа QL1 в массиве из наборов испытаний

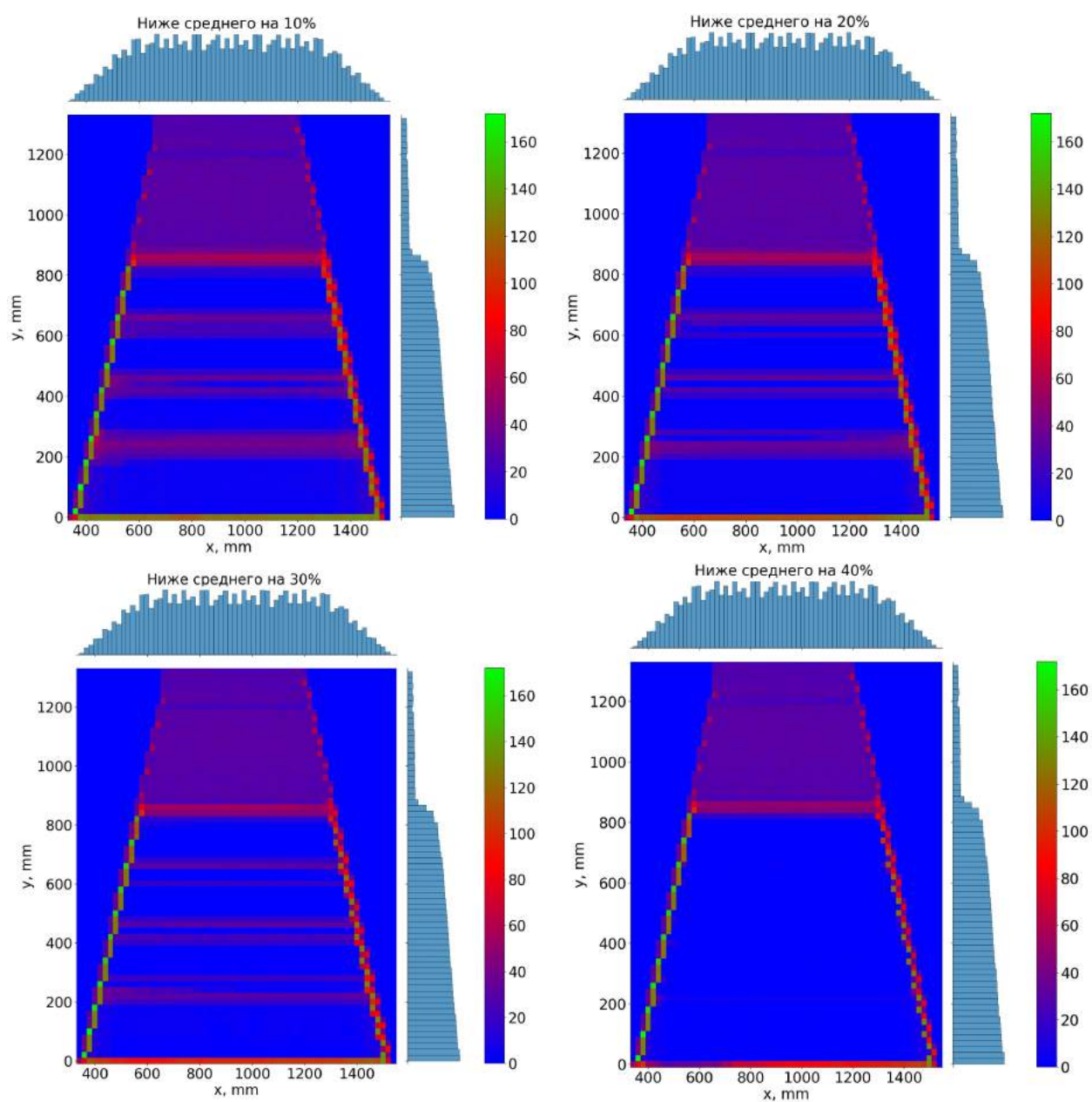


Рисунок 32 – Цветовая диаграмма событий, в которых сила тока ниже на 10 - 40% от среднего по детектору типа QL1 в массиве из наборов испытаний



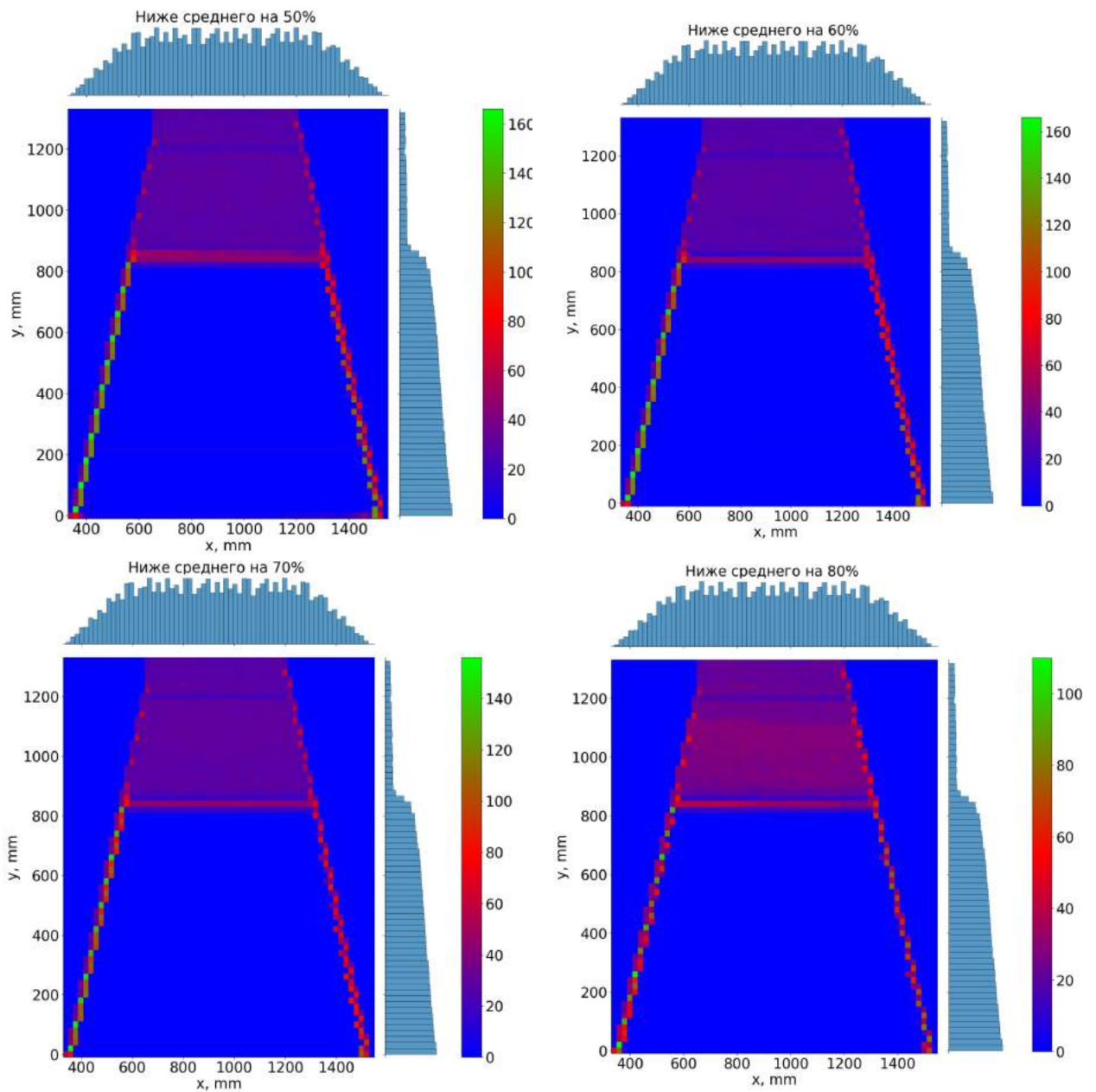


Рисунок 33 – Цветовая диаграмма событий, в которых сила тока ниже на 50 - 80% от среднего по детектору типа QL1 в массиве из наборов испытаний

По вышепредставленным цветовым диаграммам можно сделать вывод, что «холодных» зон в детекторах sTGC типа QL1 практически нет. Красные горизонтальные полосы на цветовых диаграммах не являются «холодными» зонами — эти полосы отвечают за подпорки, на которых держится детектор. Единственные претенденты на роль «холодных» зон — это небольшие увеличения плотности красных бинов в области 1380 мм по оси  $X$  и 220 мм по оси  $Y$  (см. рис. 34а), а также в области 500 мм по оси  $X$  и 210 мм по оси  $Y$  (см. рис. 34б)

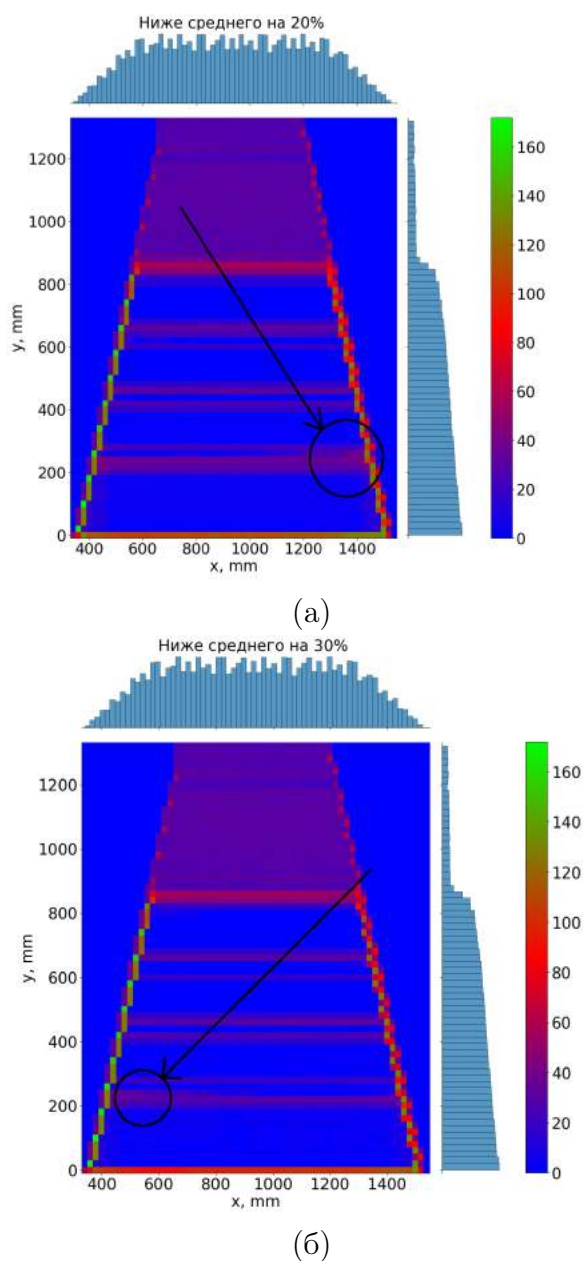


Рисунок 34 – Возможные «холодные» зоны

## 3. ТЕСТ НА ПУЧКЕ

### 3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ

Первым этапом работы было проектирование установки в программе для 3D-моделирования T-Flex. Данный выбор программы основывался на большом опыте работы с ней, однако в связи с некоторыми недостатками в дальнейшем будет осуществлен переход на другую платформу для моделирования.

Задача для проектирования состояла в том, чтобы получить такую установку, которая будет осуществлять передвижение небольшой платформы с установленным детектором на основе SiPM по двум координатам. Сравнив некоторые варианты реализации идеи, было решено сделать конструкцию, принцип работы которой основывается на работе фрезерного станка CNC 3018 (см. рис. 35).

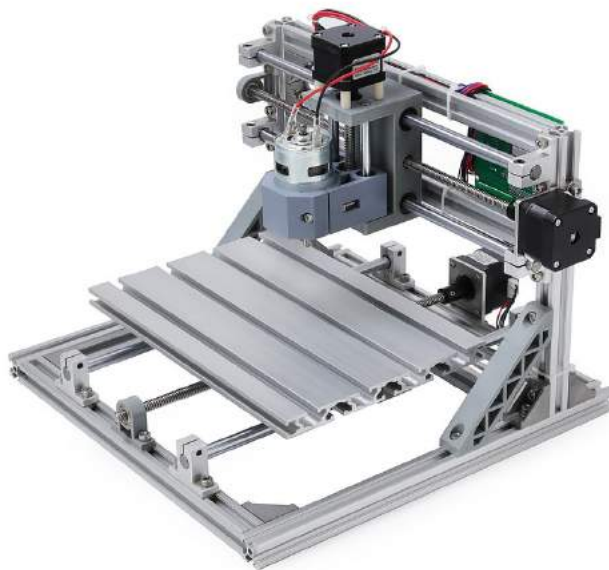


Рисунок 35 – Фрезерный станок CNC 3018

Принцип заключается в следующем: Передвижение рабочего устройства по каждой из координатных прямых осуществляется с помощью ходовых винтов, приводимых во вращение с помощью шаговых двигателей. Чтобы обеспечить неподвижность рабочего устройства относительно отклонений от прямой, вдоль которой происходит движение, используются

направляющие валы. Также стоит отметить, что вся конструкция в целом имеет прочную, устойчивую опору.

После изучения изложенного выше принципа было произведено 3D моделирование установки, обладающей схожим механизмом действия. Результат можно увидеть на рис. 36.

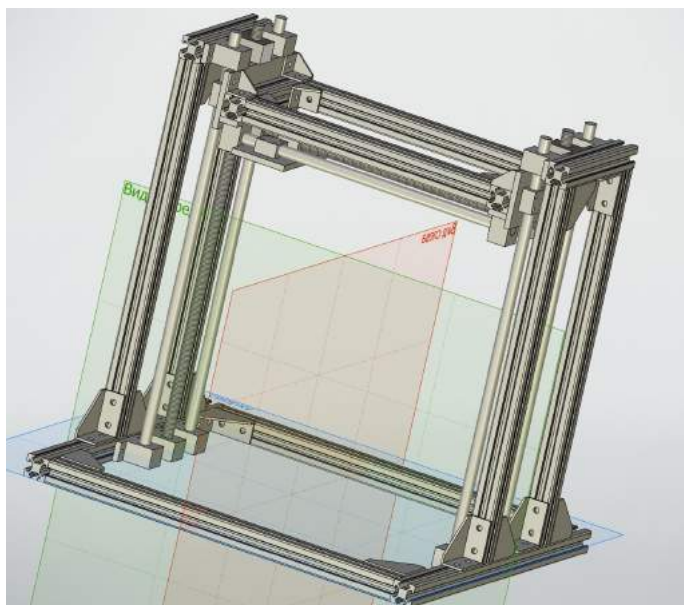


Рисунок 36 – Внешний вид спроектированной установки

### 3.2. КОРРЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ПОД РЕАЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ И ДАЛЬНЕЙШАЯ РАБОТА

После моделирования установки идет этап покупки необходимых материалов для изготовления прототипа. Однако в связи с недостатком деталей необходимых размеров возникла проблема покупки необходимых материалов. В связи с чем были произведены корректировки в модели, а именно: были изменены размеры рабочей плоскости установки, и, как следствие, габаритные размеры установки. Также в качестве шагового двигателя была выбрана модель NEMA17, обладающая определенными размерами, под которые пришлось изменять некоторые параметры установки. Итоговый результат проектирования можно увидеть на рис. 37.



Рисунок 37 – Внешний вид спроектированной установки после изменений

### 3.3. ФИНАЛЬНЫЙ ВИД УСТАНОВКИ

В результате проектирования и сборки была изготовлена установка, её внешний вид можно увидеть на рис. 38.

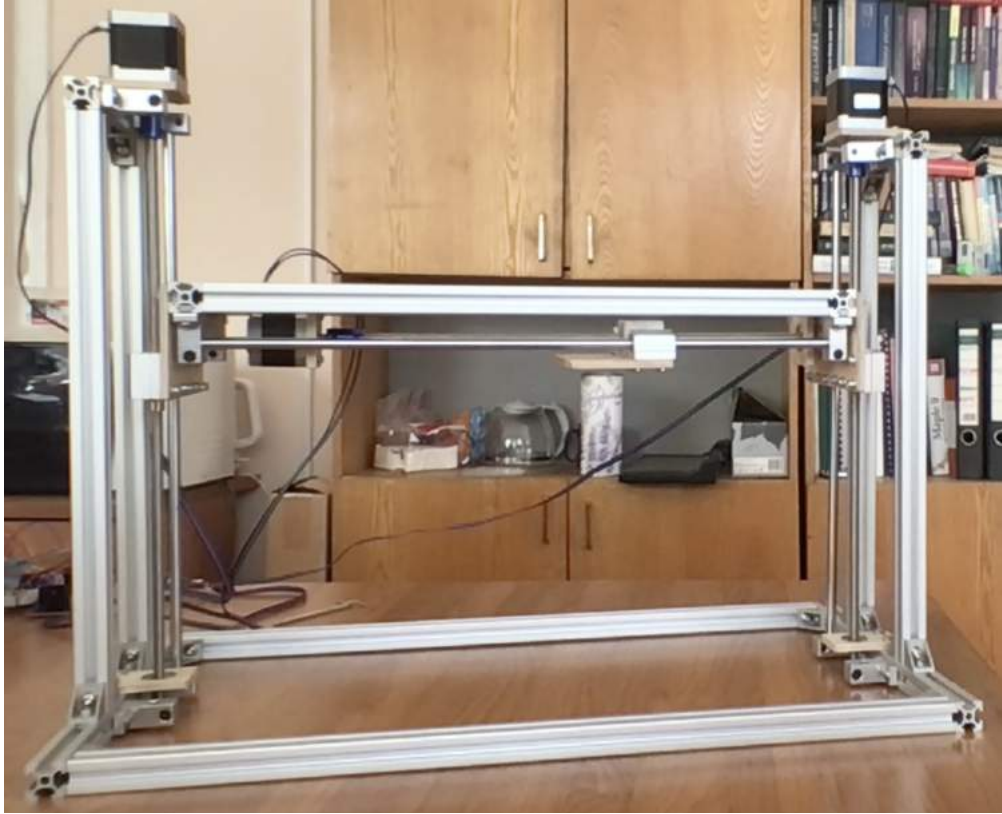


Рисунок 38 – Собранная установка

Установка, как и требовалось, обеспечивает передвижение площадки по осям  $X$  и  $Y$ . Управление передвижением, обеспеченное шаговыми двигателями NEMA17, происходит либо с помощью нажатия кнопок, отвечающих за передвижение в заданном направлении (вверх-вниз по оси  $Y$ , влево-вправо по оси  $X$ ), либо с помощью ручного ввода в программный код. Преимущество использования кода — можно вручную в каждой итерации передвижения задавать необходимую скорость. При управлении кнопками передвижение осуществляется с заданной скоростью. Чтобы изменить эту скорость, необходимо подключить установку к компьютеру и задать необходимую скорость, после чего можно продолжить управление с помощью кнопок уже с измененной скоростью. Итоговые габаритные размеры установки: 60 см  $\times$  35 см  $\times$  50 см. Размеры рабочей плоскости, в которых осуществляется передвижение площадки с детектором — 30 см  $\times$  30 см. Весь код, благодаря которому происходит передвижение установки, напи-



сан в среде разработки Arduino. Финальная версия кода, переданная плате Arduino Uno для обеспечения передвижения площадки выглядит следующим образом:

```
#include "NemaStepper.h"

NemaStepper Stepper1(7,6,5,4, 200, 50, false);
NemaStepper Stepper2(11,10,9,8, 200, 50, false);
NemaStepper Stepper3(13,12,3,2, 200, 50, false);

void setup()
{
    pinMode(A0, INPUT_PULLUP);
    pinMode(A1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(A2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(A3, INPUT_PULLUP);
}

void loop()
{
    if ((!digitalRead(A0)) == true) {
        Stepper1.Step();
        Stepper1.SetStepCount(1);
        Stepper2.Step();
        Stepper2.SetStepCount(1);

    } else {
        if ((!digitalRead(A1)) == true) {
            Stepper1.Step();
            Stepper1.SetStepCount((-1));
            Stepper2.Step();
            Stepper2.SetStepCount((-1));

        } else {
            Stepper1.Step();
```

```

        Stepper1.SetStepCount(0);
        Stepper2.Step();
        Stepper2.SetStepCount(0);

    }

}

if ((!digitalRead(A2)) == true) {
    Stepper3.Step();
    Stepper3.SetStepCount(1);

} else {
    if ((!digitalRead(A3)) == true) {
        Stepper3.Step();
        Stepper3.SetStepCount((-1));

    } else {
        Stepper3.Step();
        Stepper3.SetStepCount(0);

    }

}

}

```



### 3.4. ИСПЫТАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЛЯ ТЕСТОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

#### Подготовка

Для проверки работоспособности установки был проведен следующий эксперимент. На передвижную площадку был установлен и закреплен детектор на основе кристалла  $LaBr_3(Ce)$  и SiPM SensL FC-30035. Детектор был подключен в цепь, схему которой можно увидеть на рис. 39.

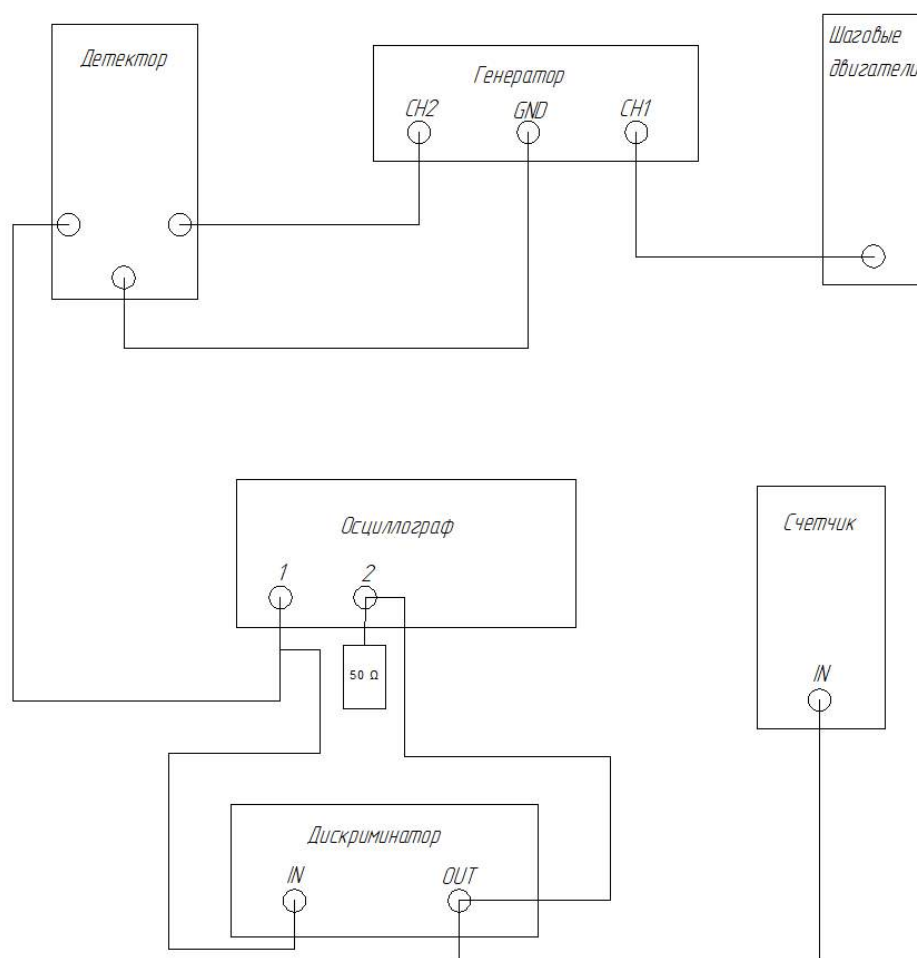


Рисунок 39 – Цепь, включающая в себя детектор

В этой цепи использовался осциллограф модели Tektronix MSO2022B, а также NIM-модули. В качестве источника использовался Цезий 137 ( $^{137}Cs$ ) с коллиматором. Целью проверки работоспособности установки являлась задача по обнаружению пучка частиц от коллиматора и определение его координат.

## Ход эксперимента

После сборки всей экспериментальной установки был проведен эксперимент по обнаружению пучка и определению её координат. Чтобы определить координаты пучка, требовалось задать оси, по которым будут определяться эти координаты. В качестве начала отсчета координат было выбрано такое положение установки, при котором центр детектора располагался в самой верхней точки контейнера с цезием (см. рис. 40). В этом эксперименте считалось (с помощью счетчика) количество зарегистрированных детектором событий. Чем больше событий было зарегистрировано — тем ближе к центру пучка находился детектор.

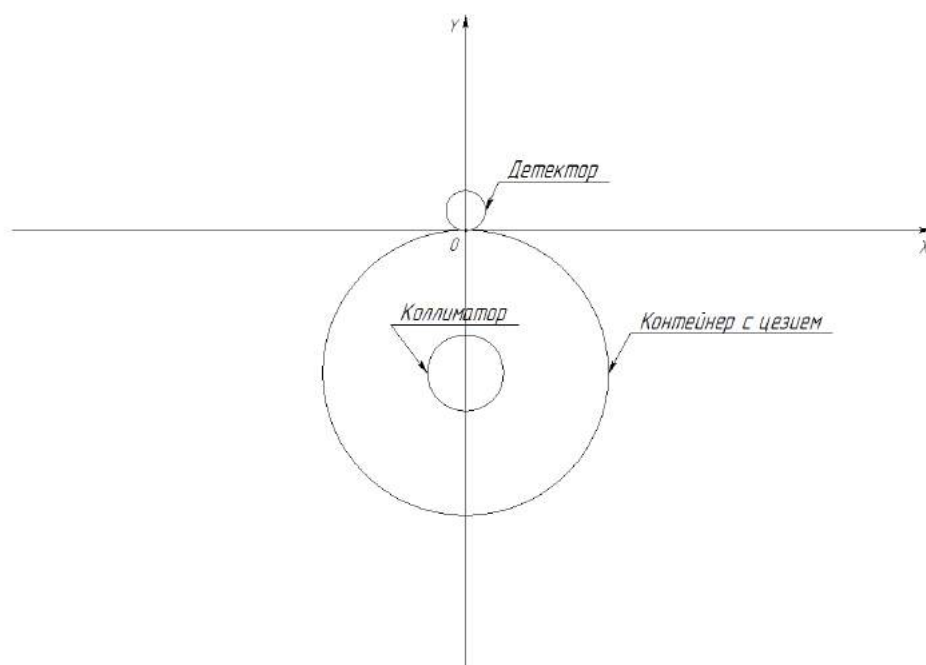
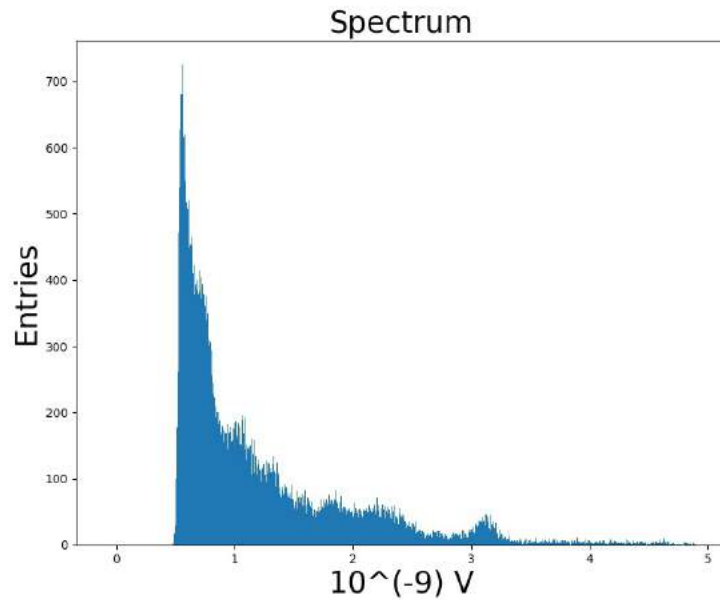


Рисунок 40 – Начало координат

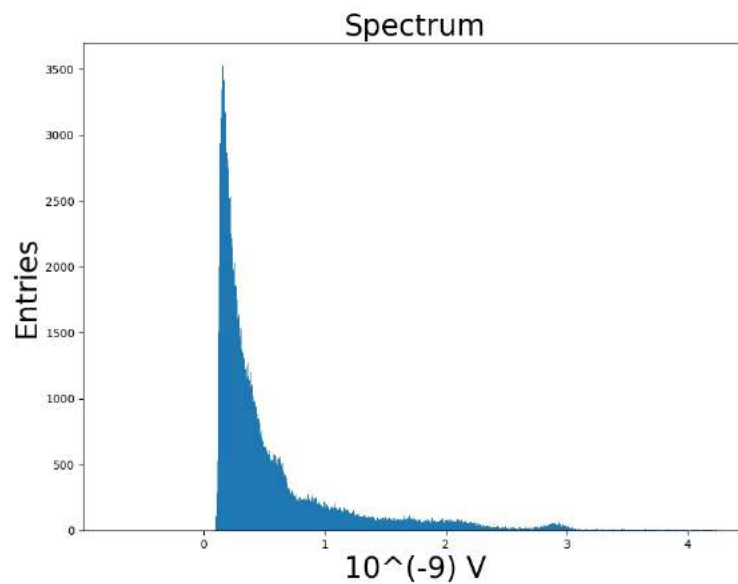
Кроме того, обнаружение пучка можно осуществлять не только с использованием счетчика, но и визуально с помощью осциллографа. Такой метод является более простым и быстрым, однако и менее точным по сравнению с использованием счетчика. Его суть заключается в следующем: наблюдая за картинкой осциллографа и перемещая площадку с детектором можно увидеть различия в поведении сигнала, который снимается с детектора — чем ближе детектор к центру пучка, тем чаще импульсы приходят на вход осциллографа — это можно определить визуально, либо с помощью специальной функции осциллографа, позволяющей определить среднюю ча-

стоту импульсов.

Также был измерен спектр излучения, координаты пучка которого искались. Был измерен спектр как в условиях проводимого эксперимента (см. рис. 41а), так и в условиях, когда не использовался дискриминатор для более точного описания спектра (см. рис. 41б).



(а) Спектр при использовании дискриминатора



(б) Спектр без использования дискриминатора

Рисунок 41 – Спектры излучения  $^{137}\text{Cs}$

## Результат эксперимента

В результате проведенного эксперимента была измерена координата центра пучка, а также составлена цветовая диаграмма событий, зарегистрированных детектором для каждой координаты исследуемой плоскости. Шаг каждого измерения — 0.5 мм. Получившееся значение координат центра пучка — от 0 до 0.5 мм по оси  $X$  и от -4.5 до -4.0 мм по оси  $Y$ . Цветовую диаграмму можно увидеть на рис. 42).

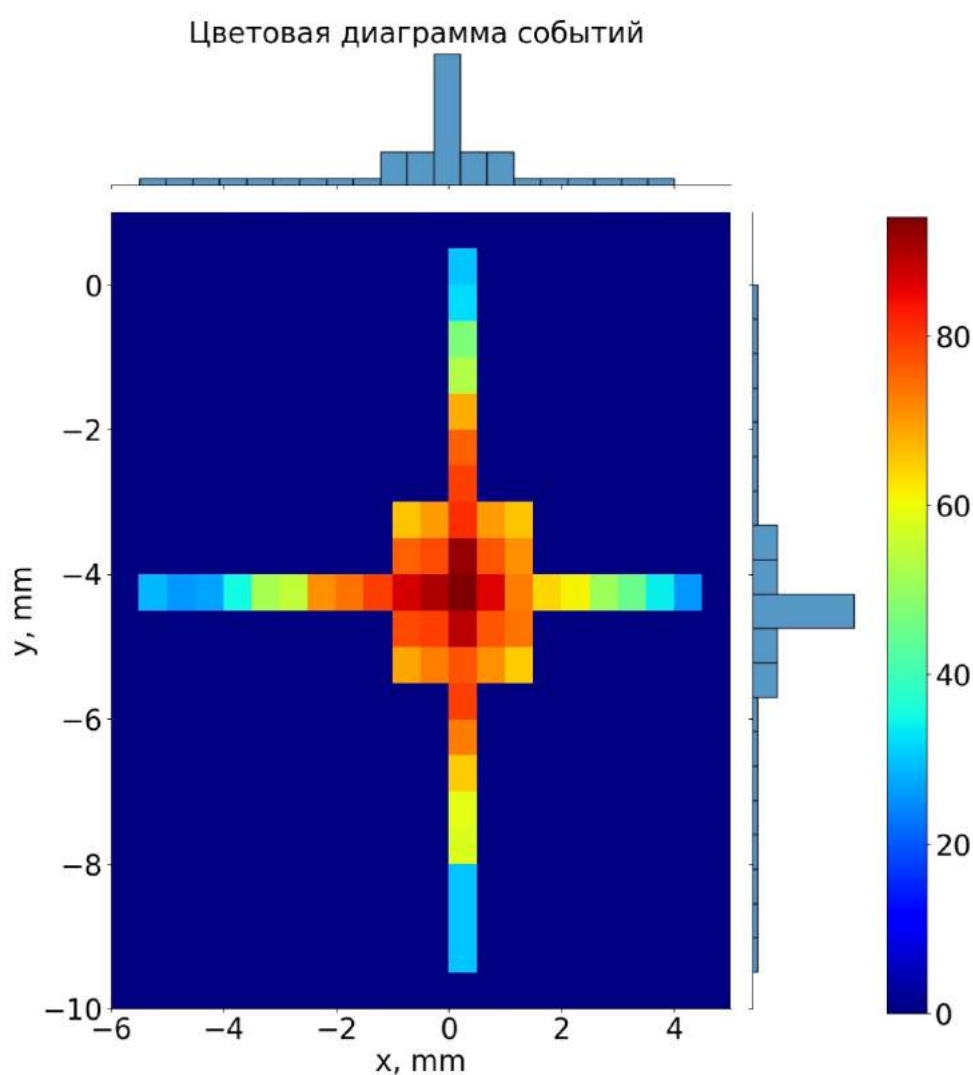


Рисунок 42 – Цветовая диаграмма событий на каждом участке исследуемой области

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя общие принципы работы координатных систем для получения данных о пространственных характеристиках объектов исследований, были проведены следующие исследования:

## РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕСТ

Проведен анализ результатов, полученных после рентгеновского сканирования детекторов sTGC, произведенных в институте Вайцмана с целью выявления дефектных областей детектора. Результаты такого тестирования представляют собой набор снимаемых во время тестирования переменных, содержащих информацию о типе исследованного детектора, положении коллиматора, параметрах самого испытания, а также снимаемых с различных частей детектора сил тока. Исследование включало в себя следующие этапы: Для одного набора испытаний одного детектора:

- 1) Для поиска «горячих» зон: получение цветовой диаграммы событий превышения сил тока над средним по детектору типа QL1 в одном наборе испытаний, показывающая, в каких точках происходит это превышение. Получение 8 цветowych диаграмм, каждая из которых соответствует случаям превышения сил тока на 10% - 80% от среднего по детектору в данном наборе испытаний;
- 2) Для поиска «холодных» зон: цветowe карты событий, в которых снимаемая сила тока меньше средней по детектору, а также 8 диаграмм событий, в которых сила тока ниже на 10% - 80% от среднего по детектору

На основании этого, для массива из 701 файла, соответствующих результатам нескольких наборов испытаний детектора типа QL1:

- 1) Получены цветowe диаграммы, в которых показано количество значений сил тока в каждой точке, которые выше среднего значения токового отклика по детектору в каждом из наборов испытаний на

- 10% - 80% (всего 8 диаграмм) для поиска «горячих» зон;
- 2) Получены цветковые диаграммы, в которых показано количество значений сил тока в каждой точке, которые ниже среднего значения токового отклика по детектору в каждом из наборов испытаний на 10% - 80% (всего 8 диаграмм) для поиска «холодных» зон;

Были выявлены зоны детекторов, которые требуют доработки технологии сборки, а также особого внимания при анализе физических данных во время сеансов на ускорителе, например, повышенной частоты ложных срабатываний. Преимущественно, такие зоны расположены по углам детекторов. Полученные результаты могут быть учтены при анализе данных с экспериментов с использованием протестированных детекторов sTGC.

## ТЕСТ НА ПУЧКЕ

Был использован опыт, полученный при изучении работы и обработке результатов данных рентгеновских тестов. Была создана и испытана установка, предназначенная для определения позиции пучка заряженных частиц на тестовых экспериментах на ускорителях:

- 1) Произведено 3D-моделирование установки и её корректировка под реальные условия;
- 2) Осуществлена сборка и проверка работоспособности установки;
- 3) Поставлен эксперимент по обнаружению положения источника  $^{137}\text{Cs}$  с использованием детектора на основе кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и SiPM SensL FC30035. В результате такого испытания получена цветковая диаграмма, позволяющая определить центр пучка

Дальнейшая доработка установки позволит автоматизировать процесс поиска пучка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Roth I., Klier A., Duchovni E.* Testing sTGC with small angle wire edges for the ATLAS new small wheel Muon detector upgrade //. — 2015. — P. 1–6.
2. *Majewski S., Charpak G.* EP Internal Report 82-02 : tech. rep. / CERN. — 1982.
3. A thin multiwire chamber operating in the high multiplication mode / S. Majewski [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1983. — Vol. 217. — P. 265–271.
4. Development of calorimeters using thin chambers operating in a high gain mode / G. Bella [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1986. — Vol. 252, no. 2. — P. 503–510.
5. A new high gain thin gap detector for the opal hadron calorimeter / S. Dado [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1986. — Vol. 252, no. 2. — P. 511–516.
6. *Mikenberg G.* Thin-gap gas chambers for hadronic calorimetry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1988. — Vol. 265, no. 1. — P. 223–227.
7. *Nagai K.* Thin gap chambers in ATLAS // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1996. — Vol. 384, no. 1. — P. 219–221.
8. A thin multiwire chamber operating in the high multiplication mode / S. Majewski [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. — 1986. — Vol. A 317 (1). — P. 265.

9. Technical Design Report New Small Wheel : tech. rep. / CERN - LHCC. — 2013.
10. The New Small Wheel Upgrage Project of the ATLAS Experiment : tech. rep. / Simon Fraser University, University Dr. Burnaby. — 2014.
11. *Sekhniaidze G.* Construction and performance of the sTGC and MicroMegas chambers for ATLAS NSW upgrade // JINST. — 2016. — P. 13.
12. Development of scanning technique for sTGC detectors production quality control / P. E. Teterin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012015.
13. The X-ray scanning technique application for sTGC detectors quality control / P. Teterin [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — Vol. 15, no. 08. — P. C08008–C08008.
14. Amptek Mini-X X-ray tube, URL: <https://www.amptek.com/products/x-ray-sources/mini-x2-ray-tube>.
15. Visualization tool for X-ray scanner for sTGC detector production quality control / V. O. Tikhomirov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012018.
16. Gas mixtures for quality control of the sTGC chambers / K. A. Filippov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012024.
17. *Tsuno S., Kobayashi T., Ye B.* Gamma-ray sensitivity of a thin gap chamber // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2002. — Vol. 482, no. 3. — P. 667–673.
18. *Ruchti R. C.* The use of scintillating fibers for charged-particle tracking // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 1996. — Vol. 46:281–319. — P. 645.
19. *Akchurin N., Wigmans R.* Quartz fibers as active elements in detectors for particle physics // Review of Scientific Instruments. — 2003. — Vol. 74(6):2955–2972.



20. *Ottonello P.* Slow neutron beam diagnostics with a scintillating fiber detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 366. — 1995. — Vol. 248–253.
21. *Finocchiaro P.* A scintillating fibre-based profiler for low intensity ion beams // Instruments and Methods in Physics Research 385. — 1997. — Vol. 31–36.
22. *Veronese I.* Feasibility study for the use of cerium-doped silica fibres in proton therapy // Radiation Measurements 45. — 2010. — Vol. 635–639.
23. A beam monitor detector based on doped silica and optical fibres / S. Braccini [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2011. — Vol. T02001. — P. 13.
24. *Gundacker Stefan T. R. M.* Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission // Physics in Medicine & Biology. — 2020.
25. *Клемин С. Кузнецов Ю. Ф. Л.* Кремниевый фотоэлектронный умножитель // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — с. 80–86.