

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 53-05

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОВСКОГО СКАНИРОВАНИЯ
ДЕТЕКТОРОВ $sTGS$, ПРОИЗВЕДЕННЫХ В ИНСТИТУТЕ
ВАЙЦМАНА

Научный руководитель:

к.ф.-м.н.

_____ П. Е. Тетерин

Выполнил:

_____ А. И. Дуров

Москва 2021

Содержание

Содержание	1
1 Введение	2
1.1 Основание для проведения работы	2
1.2 Принцип работы sTGC	2
1.3 Взаимодействие мюонов с sTGC	5
1.4 Изготовление sTGC	7
1.5 Тестирование sTGC	8
1.6 Применение метода рентгеновского тестирования (сканирования) для контроля качества изготовленных sTGC	10
2 Ход работы	15
2.1 Следующий этап тестирования	15
2.2 Color map сил тока в рабочей плоскости детектора . .	16
2.3 Color map числа превышений среднего значения тока в рабочей плоскости детектора	17
2.4 Color map числа превышений тока на некоторый процент от среднего значения тока	18
2.5 Color map числа превышений тока на некоторый процент от среднего значения тока для массива сетов испытаний	21
2.6 Дальнейшая работа	24
3 Заключение	25

Цель работы

Целью работы является обработка результатов рентгеновского сканирования детекторов sTGC, произведенных в институте Вайцмана, с целью выявления систематики в дефектных областях детекторов.

1 Введение

1.1 Основание для проведения работы

Как известно, детекторы перед их использованием в реальных экспериментах, подвергаются различным тестам во время и после производства. Один из таких тестов - это рентгеновский тест. Он 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.

Задача состояла в проведении анализа полученных файлов с данными, чтобы определить дефектные области детектора по превышению значения сил тока, снимаемых с детектора над средним значением по одному из видов детектора в конкретной серии испытаний.

1.2 Принцип работы sTGC

Детекторы sTGC были первоначально предложены Маевским и Шарпаком [1][2] и получили дальнейшее развитие в эксперименте OPAL[3][4][5] и для мюонной триггерной системы ATLAS end-cap [6]. Для повышения устойчивости детектора для режима HL-LHC разработан узкостриповый вариант TGC — sTGC (small TGC), который заменит своего предшественника на Малых Мюонных Колесах по окончании Фазы-1 модернизации эксперимента ATLAS [7]. Структура sTGC изображена на рис. 1:

Состоит он из сетки вольфрамовых нитей (wires) толщиной 50 мкм с золотым напылением, расположенных с шагом в 1.8 мм. Находятся они

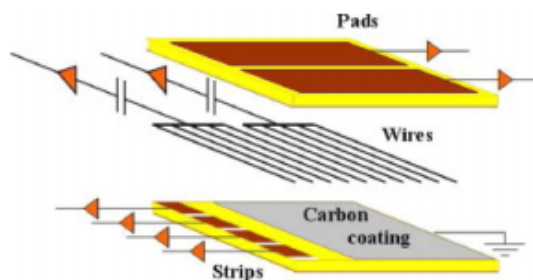


Рисунок 1 – Структура sTGC

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 HL-LHC, 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 накрываются 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). Пады используются в принципе "3 из 4 совпадений" (квадруплетную структуру можно увидеть на рис.2) для обнаружения примерного трека мюона, а значит и примерной области его взаимодействия.

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 [8]. Также стоит отметить, что детектор sTGC обладает хорошим пространственным разрешением в 100 мкм.

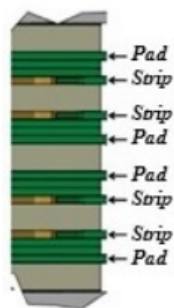


Рисунок 2 – Квадруплетная структура sTGC

Итого, можно выделить следующие особенности детектора sTGC:

1. sTGC может работать в штатном режиме при излучении вплоть до 20 кГц/см^2 с повышенной эффективностью для минимального количества ионизирующих частиц [9] ;
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° ;
3. Детектирование космических мюонов, вследствие их невысокой интенсивности (порядка нескольких Гц/см^2), не вызывает ухудшения работы детектора sTGC (относительно максимальной интенсивности, при которой sTGC работает в штатном режиме).

1.3 Взаимодействие мюонов с sTGC

Когда мюоны пролетают сквозь рабочую плоскость sTGC, они вызывают ионизацию газа, который находится внутри sTGC, и образовавшиеся ионы под действием 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.

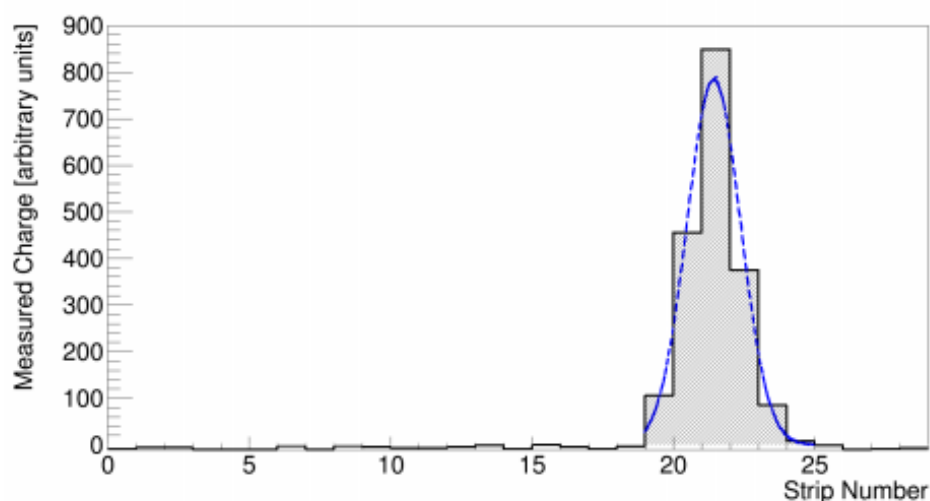


Рисунок 3 – Фитирование сигнала

Следует отметить, что все вышеперечисленные измерения были проведены согласно источнику [10], и этот эксперимент проводился на sTGC, размеры и строение которого можно увидеть на рис. 4.

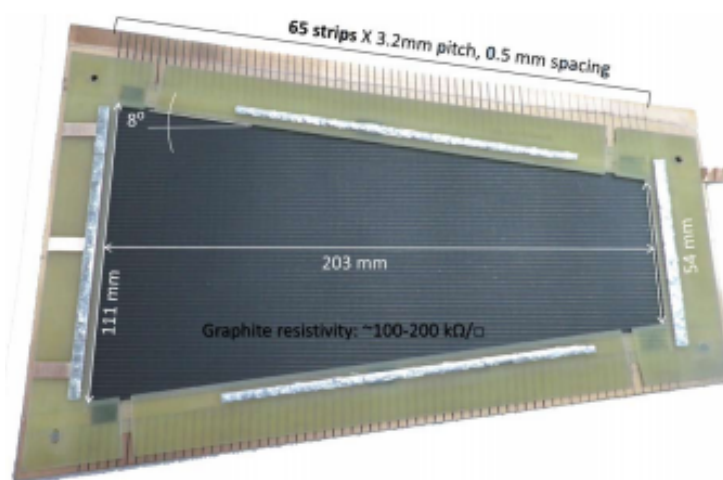


Рисунок 4 – используемый sTGC

1.4 Изготовление sTGC

Непростым является способ изготовления детектора частиц с мультислойными 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 T-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 x 1.0 м². Тот прототип состоял из четырех слоев, содержащих стрипы и пады, и был изготовлен под тщательным контролем, чтобы быть использованным в New Small Wheel upgrade, в частности - в середине малого сектора.

1.5 Тестирование sTGC

Детекторы sTGC будут работать в суровых радиационных условиях, и будут практически недоступны для внешнего взаимодействия во время измерений. А это подразумевает требование очень строгих процедур контроля качества во время их производства и установки. Новоизготовленные детекторы sTGC (а особенно - если они еще и больших размеров) могут содержать разнообразные технологические дефекты, например: отсутствие некоторых проволочек, провисшие проволочки, дефекты толщины катодной полосы и зазора, частицы пыли внутри зазора и на проводах, дефекты при склеивании и т.д.. Все это может привести к неравномерности распределения газа, к потере зарядов или к неправильной интерпретации результатов измерений.

Для проверки качества изготовления детекторов sTGC используется множество различных методов (следует отметить, что контролем качества являются не только методы, позволяющие обнаружить технические дефекты при изготовлении, но и некоторые параметры, свойственные персонально каждому детектору sTGC - например, величина порогового заряда, выделение стрипов, которых не стоит учитывать при подведении результатов экспериментов или различные математические параметры, которые должны быть применены к данному детектору; Иными словами - один sTGC может иметь лучше пространственное разрешение, но хуже величину порогового заряда, а другой - наоборот).

В данной работе речь пойдет о рентгеновском тестировании, однако стоит упомянуть еще один тест, который является альтернативой рентгеновскому - космический тест. Преимуществами такого теста являются: возможность оценить шумы электроники (однако для космического теста чаще всего устанавливается не та электроника, которая потом будет использоваться на The New Small Wheel) и шумы детектора. Тем не менее, существуют дополнительные тесты, которые проще и быстрее и подходят для аналогичных задач (например - импульсный тест, который состоит в том, что на вход пада подается прямоугольный импульс и рассматривается его поведение к выходу из детектора). Результаты такого теста дают следующие особенности, которые могут быть учтены для последующих экспери-

ментов:

1. Амплитуда событий (т.е. максимальный заряд, собранный со стрипа), должна быть выше определенного порога для подавления шума;
2. 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);
3. События, вызвавшие переполнение заряда на стрипе не должны быть включены в результат эксперимента;
4. Фитирование по Гауссу должно сходиться с результатом, используя небольшой параметр χ^2 , чтобы обеспечить хорошее согласование;
5. Стандартное отклонение σ 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. В использовании рентгеновского теста её отсутствие является одним из главных преимуществ. Далее будет описано применение метода рентгеновского сканирования.

1.6 Применение метода рентгеновского тестирования (сканирования) для контроля качества изготовленных sTGC

Основание использования данного метода

Для обеспечения контроля качества изготавливаемых детекторов sTGC был предложен тест облучением всего детектора гамма-излучением (источником Co-60). 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].

Физика процессов внутри sTGC

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 [14].

Описание установки

Рентгеновский сканер представляет собой 2D установку с ЧПУ для сканирования всей площади sTGC в сочетании с рентгеновской трубкой Amptek Mini-X [15] и специализированным программным обеспечением QScanner [16] для измерения высоковольтной токовой характеристики анод-

ных 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 длиной 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 + CO₂ в режиме "высокоэнергетической" рентгеновской трубки (50 кВ и 75 мкА) [12][17]. 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 максимальная энергия была установлена равной 25 кВ 5 мкА для одиночного зазора.

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.

Результаты сканирования

Чтобы определить, какой процесс доминирует, 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.

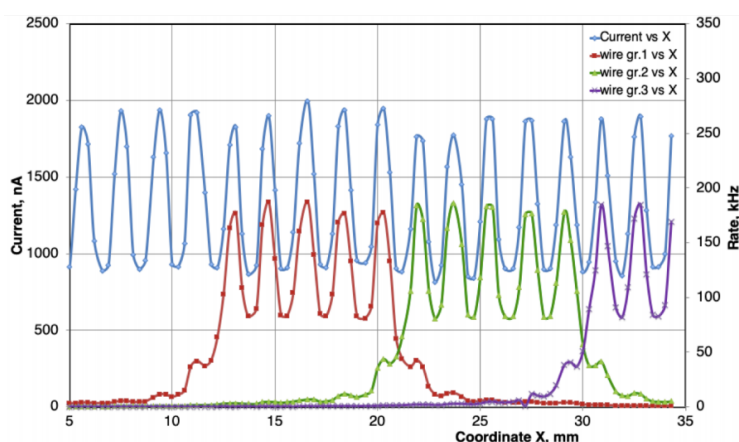


Рисунок 5 – Результаты сканирования камеры

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.

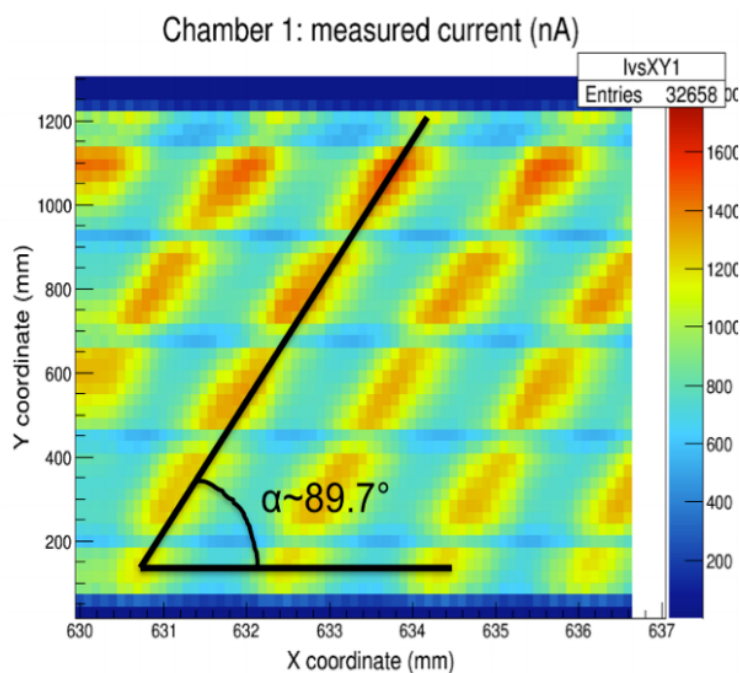


Рисунок 6 – Отображение несоосных проводов

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

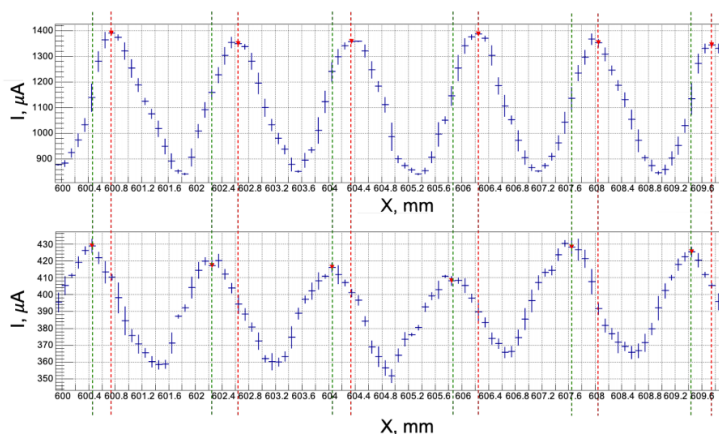


Рисунок 7 – Результаты проверки выравнивания проводов между слоями

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.

2 Ход работы

2.1 Следующий этап тестирования

Следующим этапом тестирования образцов детекторов sTGC - подача напряжения на весь детектор 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 ~ 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. 8.

```
# ***** 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)
<YCalibration 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 XRayY 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 8 – Пример выходного файла с данными о тестировании

2.2 Color map сил тока в рабочей плоскости детектора

Первым этапом обработки результатов было построение color map 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. 9.

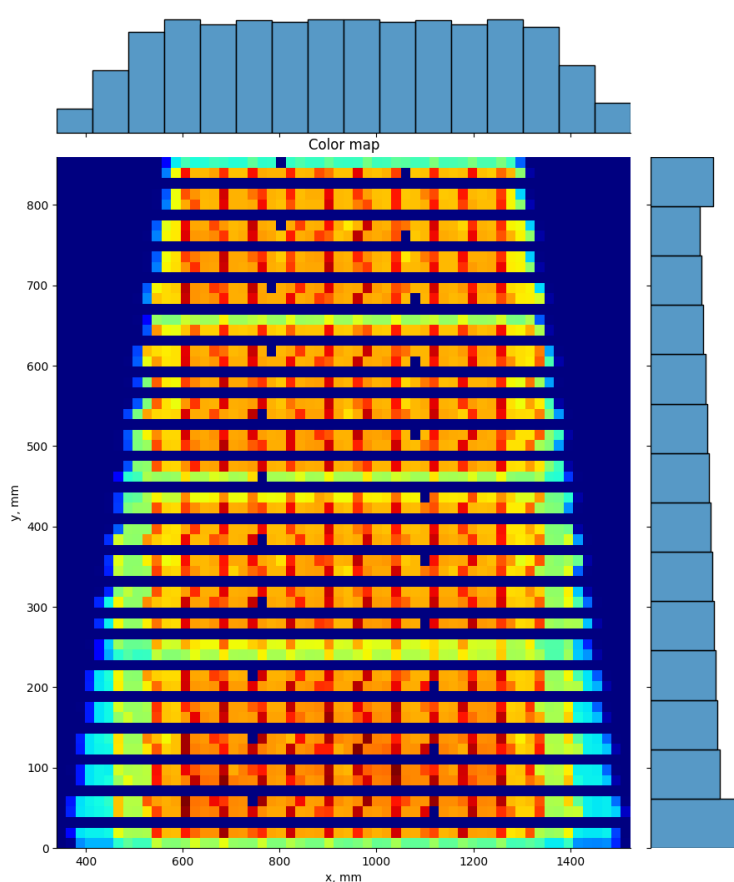


Рисунок 9 – Color map сил тока в одном сете испытаний детектора типа QL1

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.

2.3 Color map числа превышений среднего значения тока в рабочей плоскости детектора

Теперь требуется изменить подход к составлению color map 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 сете 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 color map можно увидеть на рис. 10.

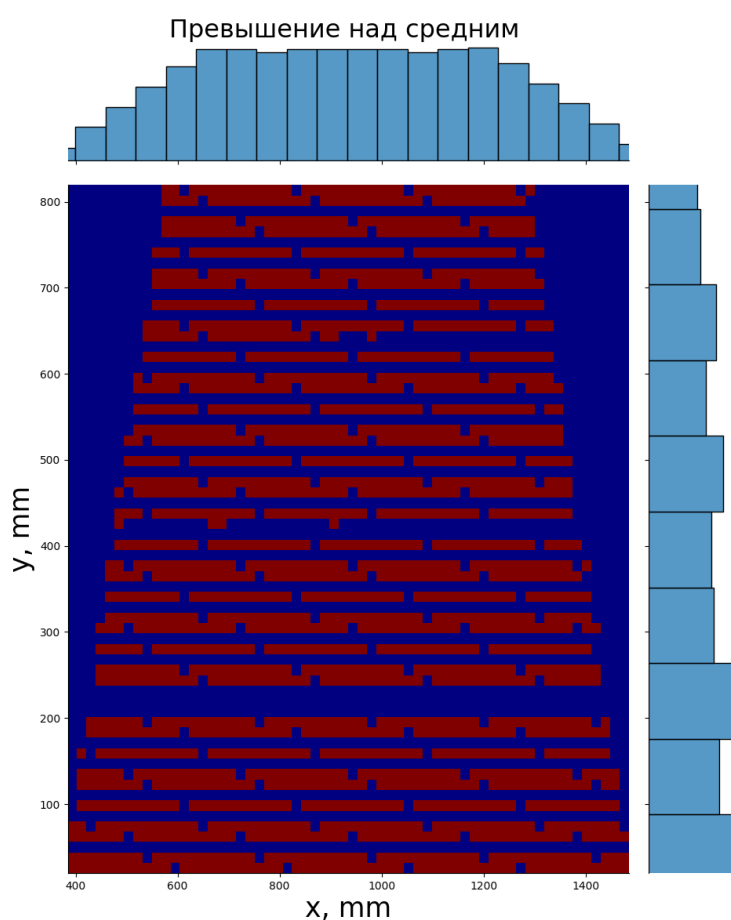


Рисунок 10 – Color map превышения сил тока над средним по детектору типа QL1 в одном сете испытаний

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 си-

лы тока, выдавая на выходе измененные значения силы тока на нескольких первых испытаниях для каждой из точек (см. рис. 11). Чтобы это учесть, было предпринято следующее: первые 4 значения были отброшены, а оставшиеся 11 усреднены для удобства в дальнейшем использовании.

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	26.25	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	10.3	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 11 – Заметные отличия силы тока в первых испытаниях в одной из точек от среднего в этой точке в этой серии испытаний

2.4 Color map числа превышений тока на некоторый процент от среднего значения тока

Большую ценность также представляют Color map'ы, показывающие превышения снимаемых значений тока на 10%, 20% и т.д. над средним по детектору в конкретном сете 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 12,13 ниже:

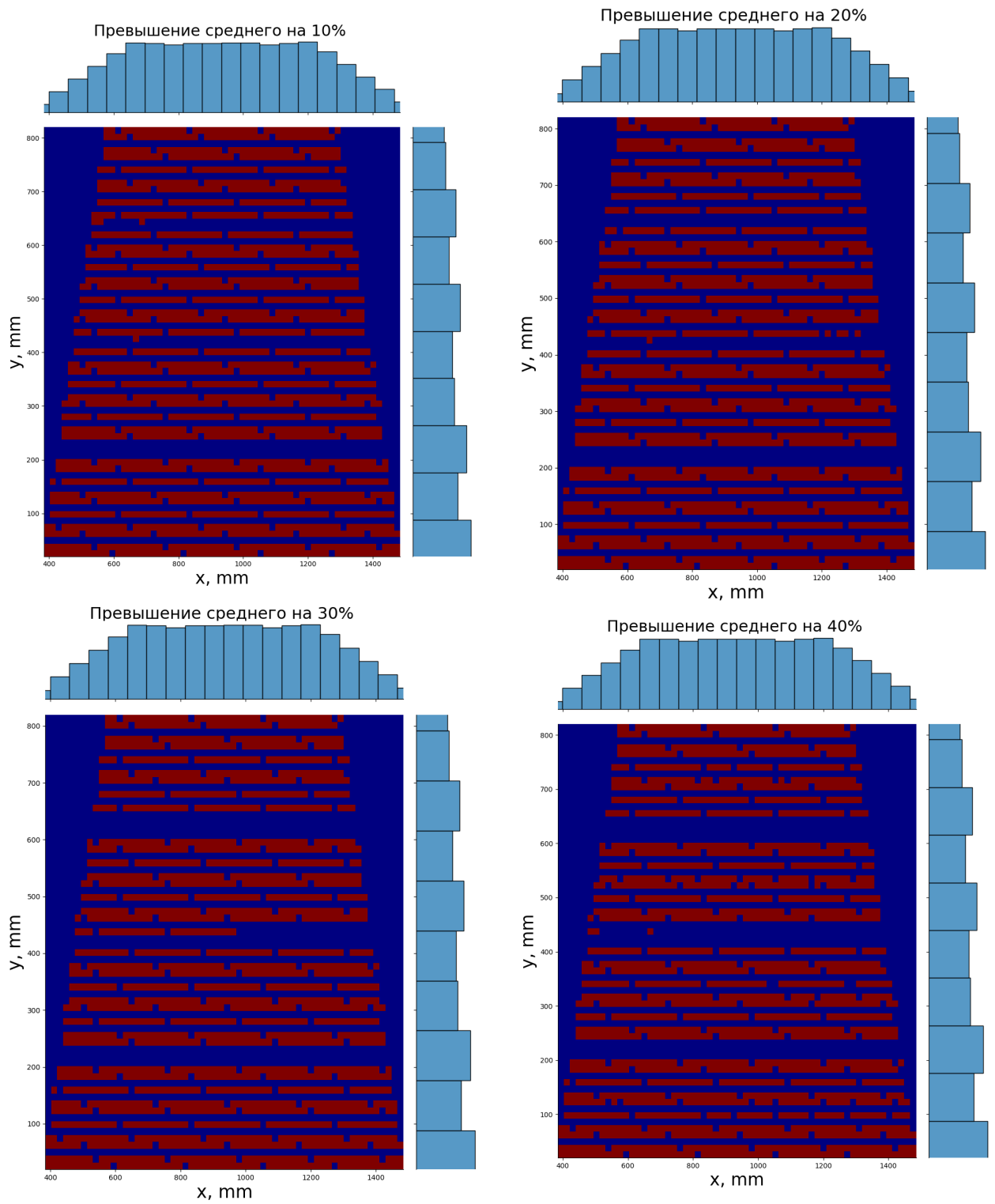


Рисунок 12 – Color map превышения сил тока на 10-40% от среднего по детектору типа QL1 в одном сете испытаний

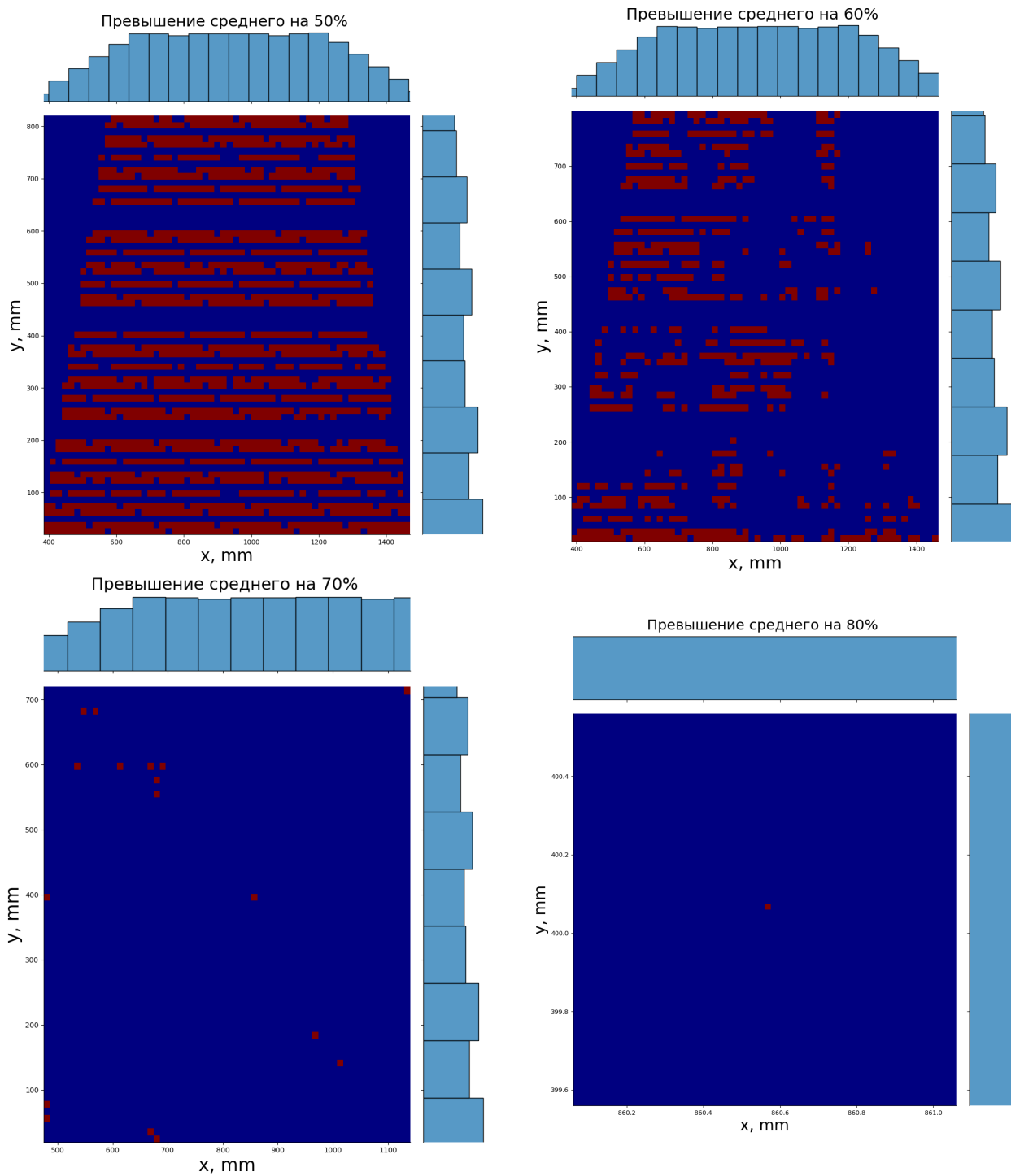


Рисунок 13 – Color map превышения сил тока на 50-80% от среднего по детектору типа QL1 в одном сете испытаний

2.5 Color map числа превышений тока на некоторый процент от среднего значения тока для массива сетов испытаний

Следующим шагом был анализ не одного файла с данными, отвечающими одному сету 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 Color map, отвечающая превышению над средним (рис.14), а на рисунках 15,16 - для превышений на 10-80% над средним для массива сетов 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 Color map. Благодаря последним Color map'ам можно определить, в каких областях чаще всего и сильнее всего происходят превышения сил тока над средним, то есть какие области вероятнее всего являются дефектными.

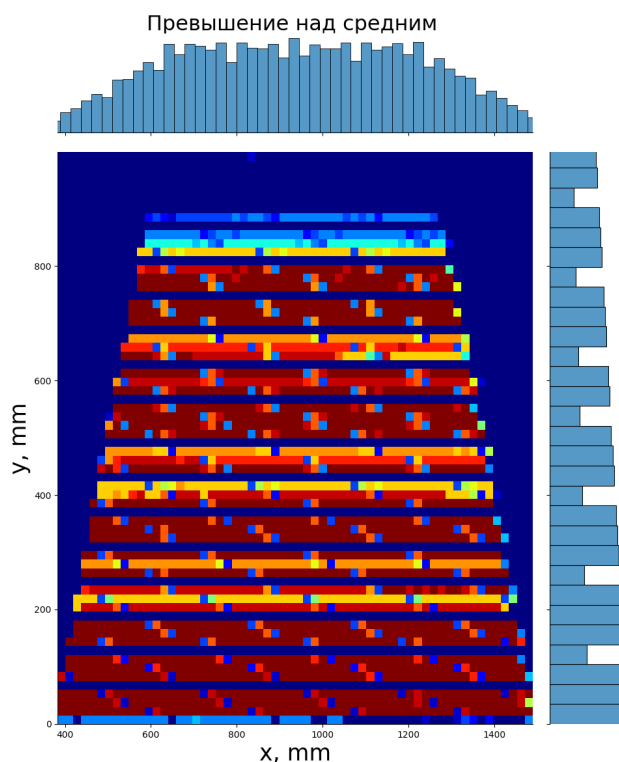


Рисунок 14 – Color map превышения сил тока над средним по детектору типа QL1 в массиве из сетов испытаний

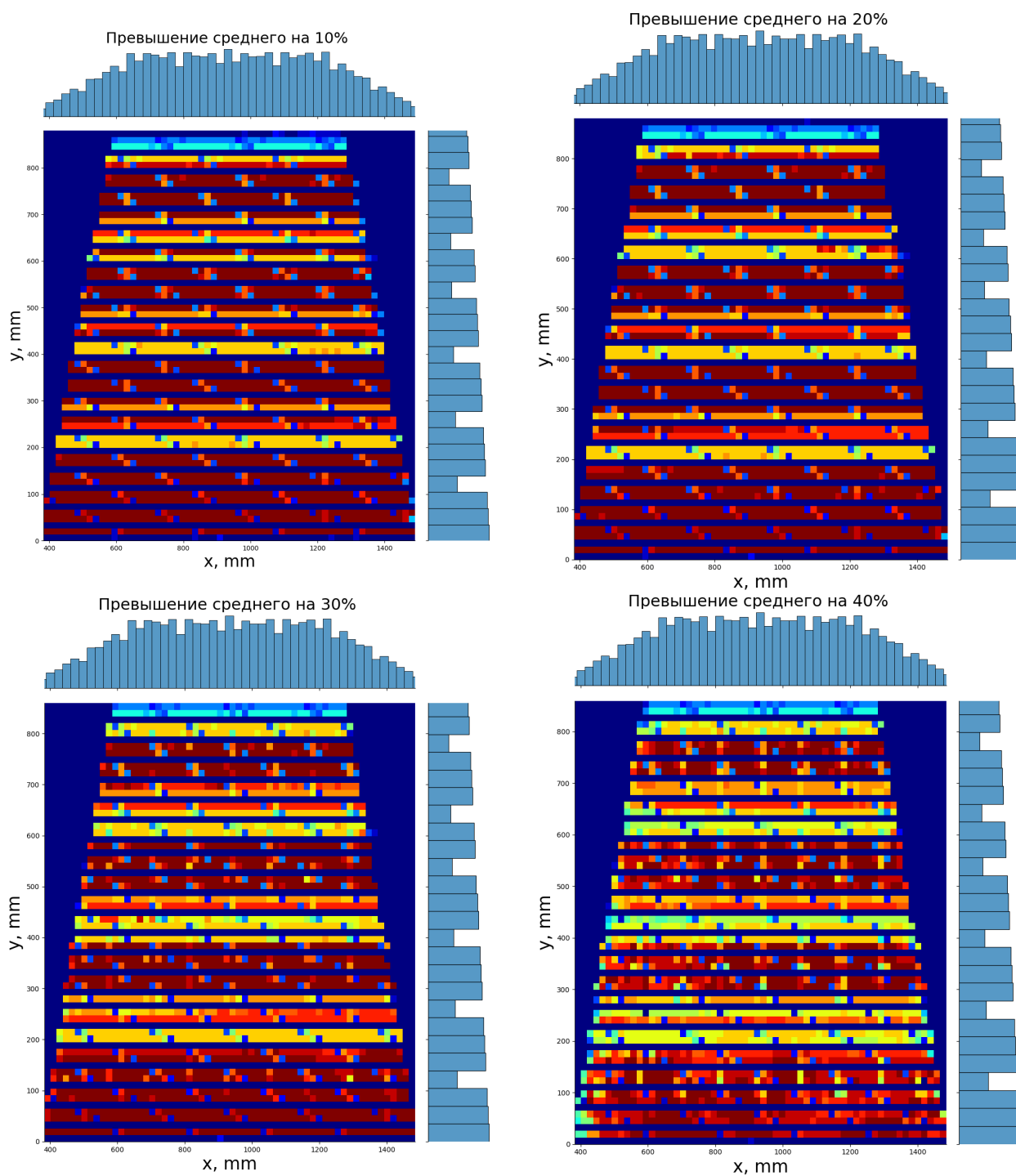


Рисунок 15 – Color map превышения сил тока на 10-40% от среднего по детектору типа QL1 в массиве из сетов испытаний

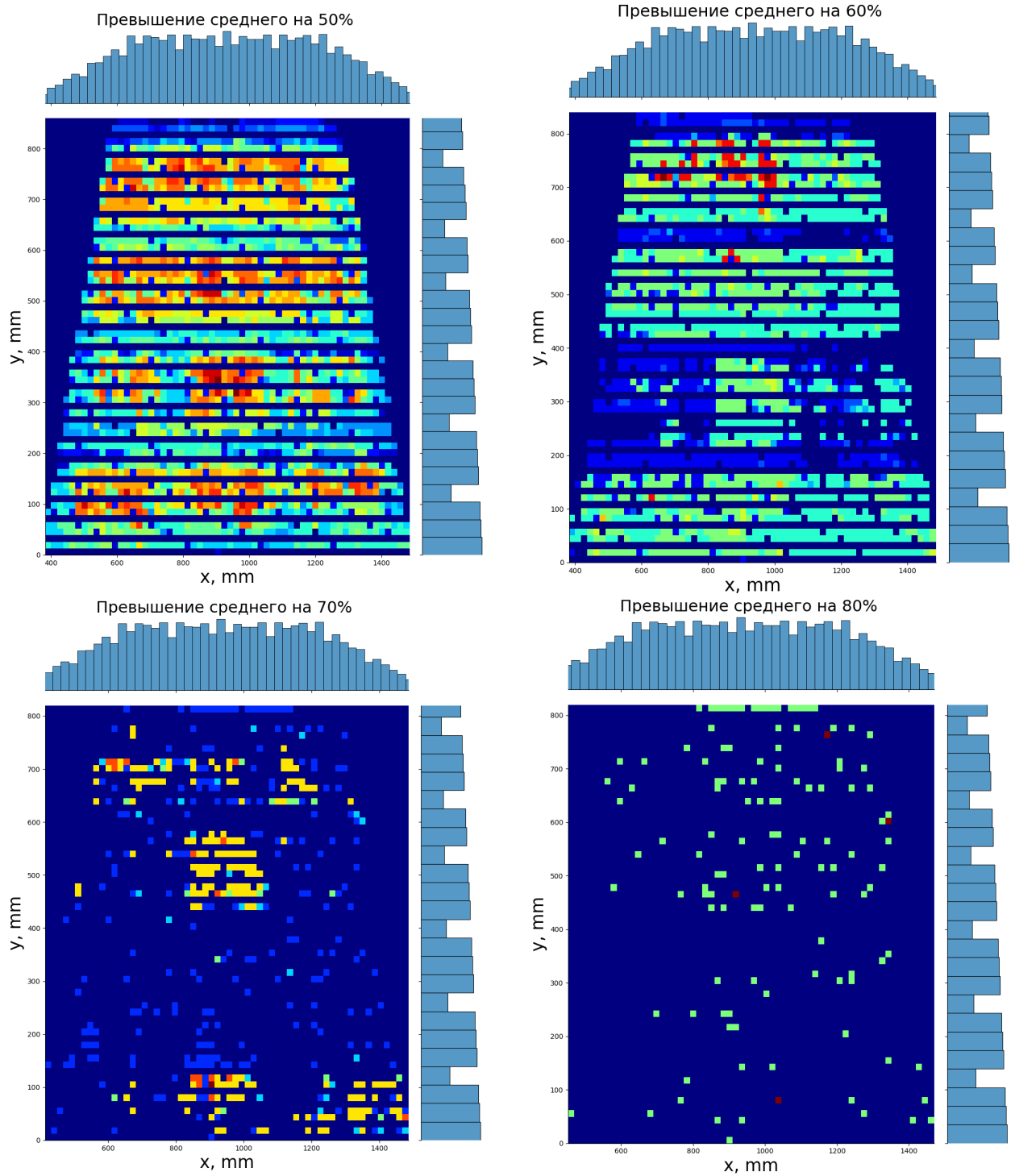


Рисунок 16 – Color map превышения сил тока на 50-80% от среднего по детектору типа QL1 в массиве из сетов испытаний

2.6 Дальнейшая работа

При анализе файлов с данными было обнаружено несколько проблемных моментов, которые усложняют процесс анализа. Например, среди всего массива всех данных по всем типам детектора (всего после тестирования получилось более 500 файлов с данными) иногда встречаются копии, которые должны быть устранены, чтобы не было лишних статистических данных. Также требовалось проделать всю работу выше не только для типа детектора QL1, но и для других типов. Отбор файлов по названию типа детектора внутри файла уже реализован в коде, однако в процессе было замечено, что формат вывода данных в файле несколько отличается для разных типов детектора и эта трудность в дальнейшем будет преодолена. Кроме того, после окончательного анализа всех файлов будет требоваться перенормировать биннинг вследствие того, что в некоторых случаях в разных файлах шаги по координатам x и y различны. Соответственно, будет необходимо выбрать единый биннинг, который будет корректно для всех файлов составлять Color map'ы. Также в некоторых сетях испытаний проводилось не по 15 испытаний для каждой точки с координатами x и y , а по 30 или в другом количестве - такие сети нужно будет обработать по другим алгоритмам.

Также в дальнейшем наравне с анализом "горячих" областей планируется также анализ "холодных" областей. Заключаться он будет в том, что анализу подвергнутся те области детектора, которые чаще остальной части детектора показывают пониженные значения токов по сравнению со средним значением. И только после полного анализа как "горячих" так и "холодных" областей для всех типов детектора и всего массива данных будут сделаны окончательные выводы о дефектных областях детектора sTGC.

3 Заключение

В данной работе был произведен 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 исследования детектора, положении коллиматора, параметрах самого испытания, а также снимаемых с различных частей детектора сил тока. Первым этапом анализа было исследование полученных в ходе тестирования файлов с данными, в результате которого сначала была построена Color map сил тока в одном сете испытаний детектора одного типа - QL1, где по цветной оси отображались значения силы тока. Далее была получена Color map событий превышения сил тока над средним по детектору типа QL1 в одном сете испытаний, показывающая, в каких точках происходит это превышение. После чего были получены 8 Color map'ов, каждая из которых соответствует случаям превышения сил тока на 10%-80% от среднего по детектору в данном сете испытаний. Эти результаты дают информацию о том, в каких точках происходит большее превышение над средним.

Следующим этапом работы являлся анализ массива файлов, соответствующих результатам нескольких сетов испытаний детектора типа QL1. Были получены Color map'ы превышения сил тока над средним и превышения сил тока на 10-80% от среднего по детектору в каждом из сетов испытаний. Результаты дают понять, в каких точках ток сильнее превосходит среднее значение, и, что очень важно, в каких точках чаще всего происходит это превышение. Полученные результаты позволяют определить, какие области детектора вероятнее всего являются дефектными.

Однако не со всеми полученными после тестирования данными удалось провести анализ. Некоторые файлы с данными оказались отличными друг от друга, что усложняет анализ всего массива данных. Таким образом, часть предполагаемой работы (например, анализ не только детекторов типа QL1, но и других типов или корректная разбивка Color map'ов, подходящая каждому сету испытаний из всего массива) еще не завершена. Также планируется анализ "холодных" областей детектора, ре-

зультатом которого будет обнаружение областей, которые чаще всего дают пониженные токи по сравнению со средним по всему детектору (аналогично анализу "горячей областей").

Таким образом, окончательные выводы о дефектных областях детектора sTGC будут сделаны не только после завершения анализа "горячих" областей, но также и после анализа "холодных" областей.

Список литературы

1. *Majewski S., Charpak G.* EP Internal Report 82-02 : tech. rep. / CERN. — 1982.
2. A thin multiwire chamber operating in the high multiplication mode / S. Majewski [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1983. — т. 217, № 1. — с. 265—271.
3. Development of calorimeters using thin chambers operating in a high gain mode / G. Bella [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1986. — т. 252, № 2. — с. 503—510.
4. A new high gain thin gap detector for the opal hadron calorimeter / S. Dado [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1986. — т. 252, № 2. — с. 511—516.
5. *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. — т. 265, № 1. — с. 223—227.
6. *Nagai K.* Thin gap chambers in ATLAS // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1996. — т. 384, № 1. — с. 219—221 ; — BEAUTY '96.
7. A thin multiwire chamber operating in the high multiplication mode / S. Majewski [и др.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. — 1986. — т. A 817 (1). — с. 265.

8. *ATLAS C*. Technical Design Report New Small Wheel : tech. rep. / CERN - LHCC. — 2013.
9. *ATLAS C*. The New Small Wheel Upgrade Project of the ATLAS Experiment : tech. rep. / Simon Fraser University, University Dr. Burnaby. — 2014.
10. Roth, I., Klier, A. and Duchovni, E. "*Testing sTGC with small angle wire edges for the ATLAS new small wheel Muon detector upgrade*" 2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA). т. 6. — ANIMMA, 2015.
11. *Sekhniiaidze G*. Construction and performance of the sTGC and MicroMegas chambers for ATLAS NSW upgrade // JINST. — 2016. — с. 13.
12. Development of scanning technique for sTGC detectors production quality control / P. E. Teterin [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — февр. — т. 675, № 1. — с. 012015.
13. The X-ray scanning technique application for sTGC detectors quality control / P. Teterin [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — авг. — т. 15, № 08. — с. C08008—C08008.
14. *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. — т. 482, № 3. — с. 667—673.
15. Amptek Mini-X X-ray tube, url: <https://www.amptek.com/products/x-ray-sources/mini-x2-ray-tube>.
16. Visualization tool for X-ray scanner for sTGC detector production quality control / V. O. Tikhomirov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — февр. — т. 675, № 1. — с. 012018.
17. Gas mixtures for quality control of the sTGC chambers / K. A. Filippov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — февр. — т. 675, № 1. — с. 012024.