



Детектор локальной поляриметрии Beam-Beam Counter для эксперимента SPD на коллайдере NICA

A24-101

А. М. Захаров*
НИЯУ МИФИ

Москва, 2026

*amzakharov1@mephi.ru

Эксперимент Spin Physics Detector

Spin Physics Detector (SPD) - эксперимент на коллайдере NICA (ОИЯИ, Дубна), предназначенный для изучения спиновой структуры протона и дейтрона и других спиновых явлений, используя уникальную возможность работы с поляризованными пучками протонов и дейтронов при энергии столкновений до 27 ГэВ и светимости до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

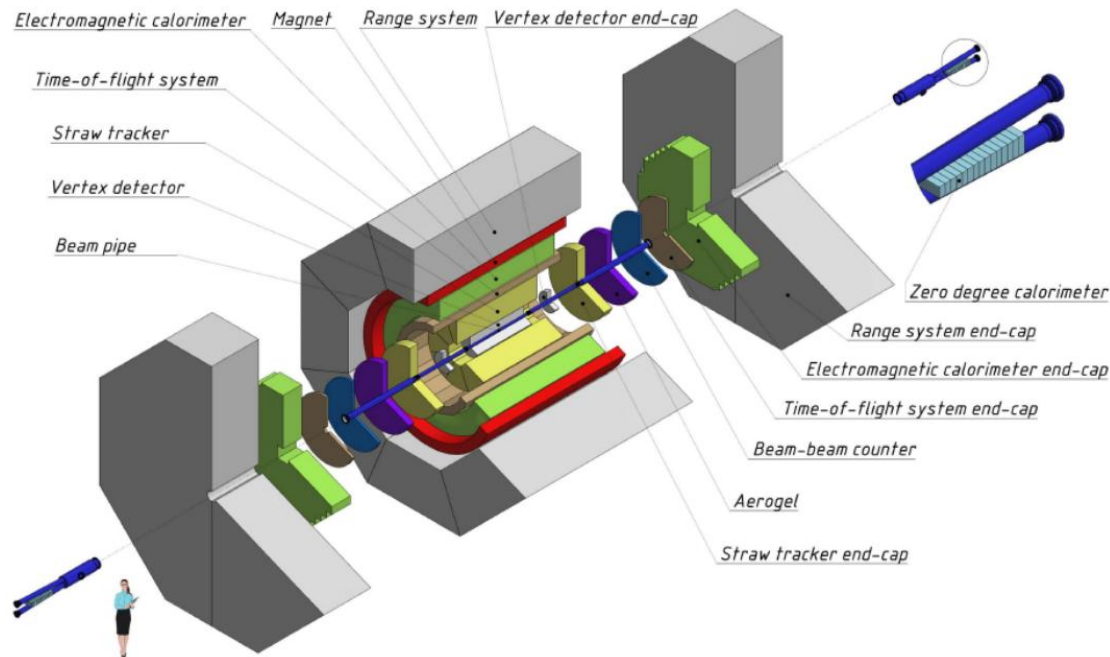


Рис. 1 – Схема SPD

В поляризованных протон-протонных столкновениях данный эксперимент покрывает кинематический разрыв между низкоэнергетическими измерениями в экспериментах ANKE-COSY и SATURNE, и высокоэнергетическими измерениями, полученными на БАК

Два торцевых детекторных колеса сцинтилляционных счетчиков пучковых столкновений **Beam-Beam Counters (BBCs)** планируется установить перед TOF системой установки SPD симметрично относительно точки взаимодействия.

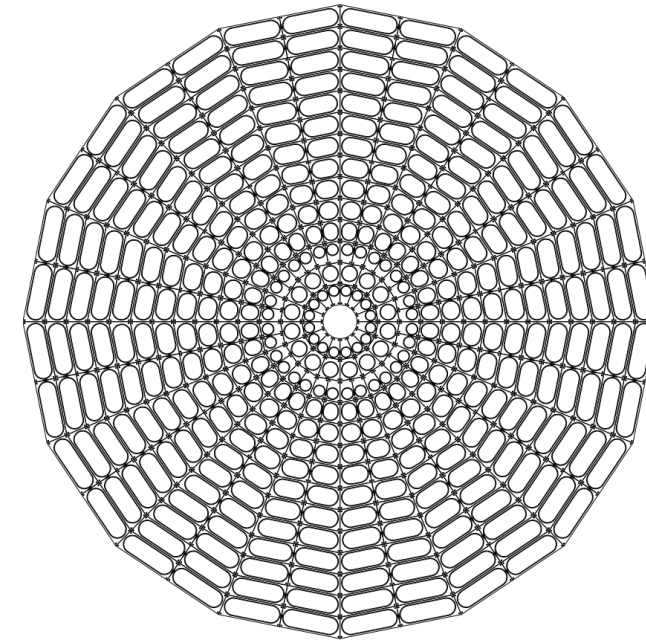


Рис. 2 – Схема BBCs

Основными задачами Beam-Beam Counters являются:

- **Локальная поляриметрия** в SPD, основанная на измерениях азимутальных асимметрий поляризованных протонных пучков;
- Мониторинг столкновений пучков;

Конструкция Beam-Beam Counters

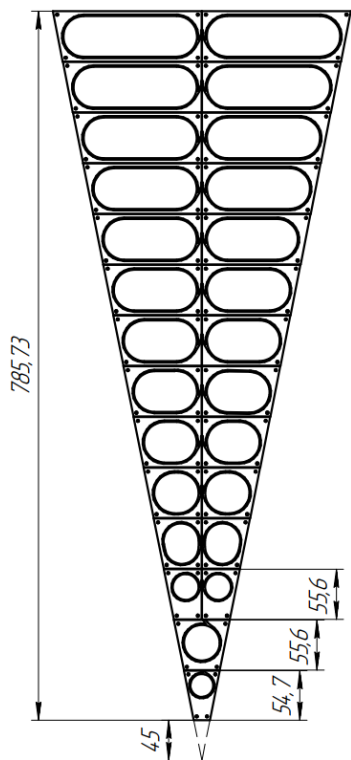


Рис. 3 – Сектор BBCs

- SPD BBC будет состоять из **16 секторов с 26 (24) тайлами в каждом секторе в одном колесе**. Каждый тайл представляет собой отдельный источник сигнала, считывающийся с помощью кремниевого фотоумножителя (SiPM), подведенного к торцу WLS оптоволоконна.
- Одной из возможных опций FEE может быть используемая в данной работе система считывания **CAEN FERS-5200**, разработанная специально для больших массивов детекторов.

Ряд

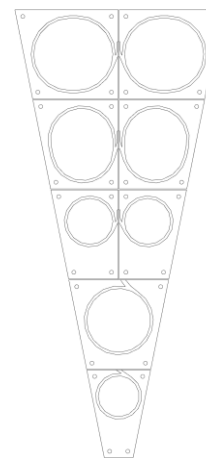
4 (L;R)

3 (L;R)

2 (L;R)

1 (L;R)

0 (L;R)



В работе используем:

- Матированное покрытие
- Saint-Gobain Crystals BCF92 WLS волокно
- Оптические клеи СКТН Б, Е, ОК-72
- SiPM Onsemi FC30035

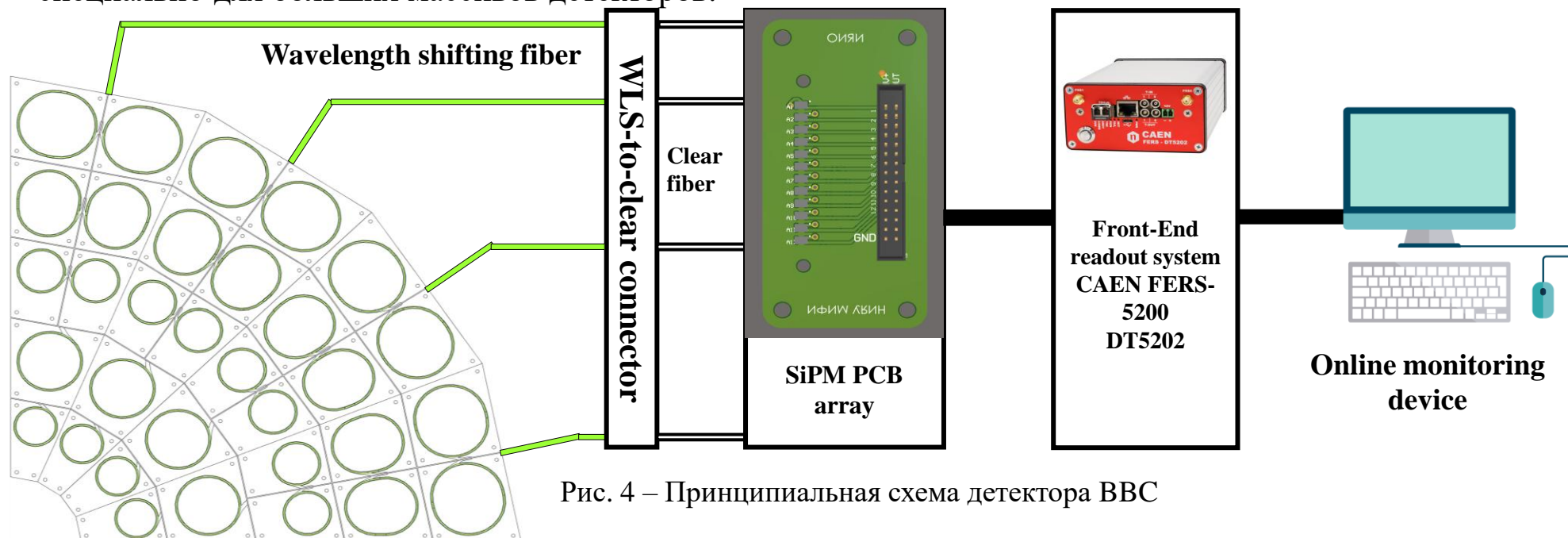


Рис. 4 – Принципиальная схема детектора BBC

- Спектрсмещающее волокно (WLS) сдвигает ультрафиолетовый спектр в сторону зеленого света
- Чистое волокно имеет большую длину затухания
- Устройство мониторинга служит инструментом для предварительного анализа

Экспериментальная установка

Координатный столик на основе рентгеновской трубки для изучения однородности сцинтилляторов включает в себя:

- **АМРТЕК Mini-X X-ray tube**
Ag мишень, 50 kV / 75 μ A, 2 мм коллиматор (5° X-ray конус) на высоте ~ 3.5 мм от тайла
- **НЕМА 17 шаговый двигатель**
Угловой шаг 1.8°, около 20 мкм разрешение (X и Y оси, механическое)
- **Arduino and CNC Shield**
Микроконтроллерная плата для автоматизации движения
- **САЕН DT5202**
Источник питания A7585D с разрешением 1 мкА
- **Свинцовая защита**
- **Черная светоизолирующая коробка**

Рис. 5 – Спектр Mini-X X-Ray

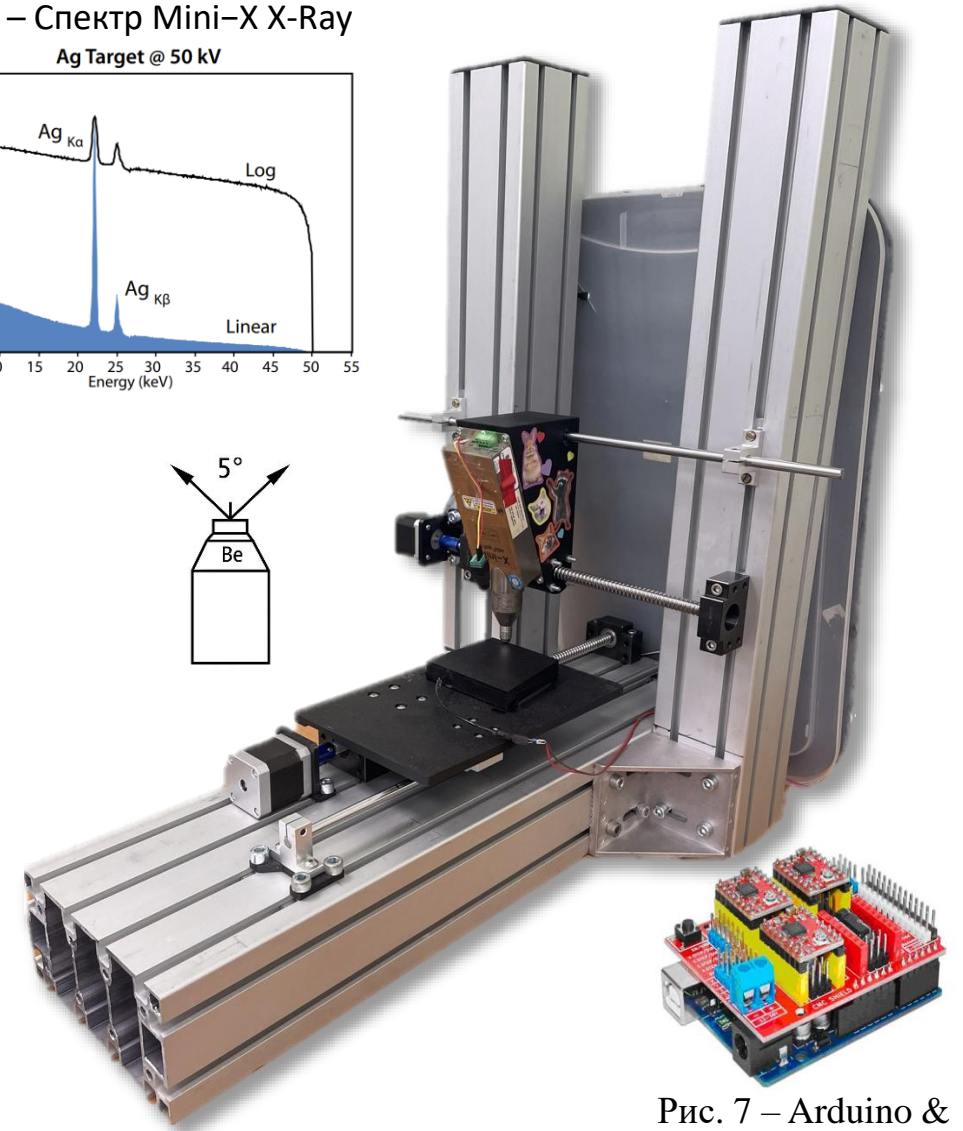
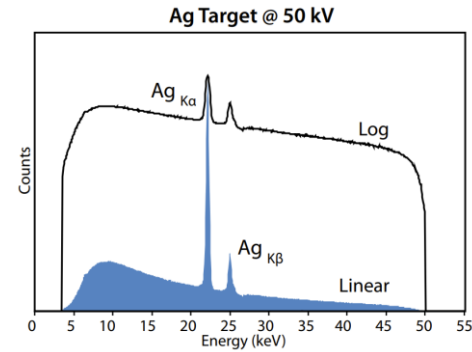
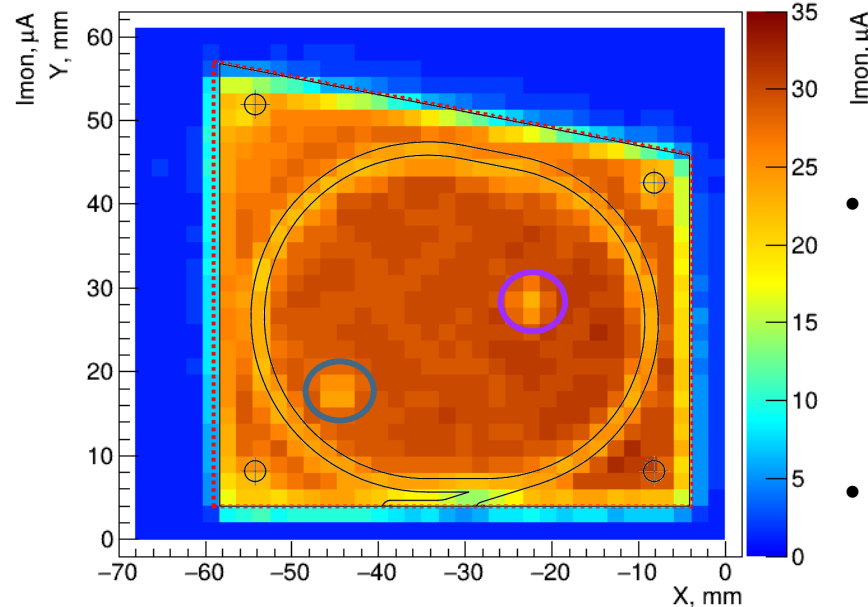
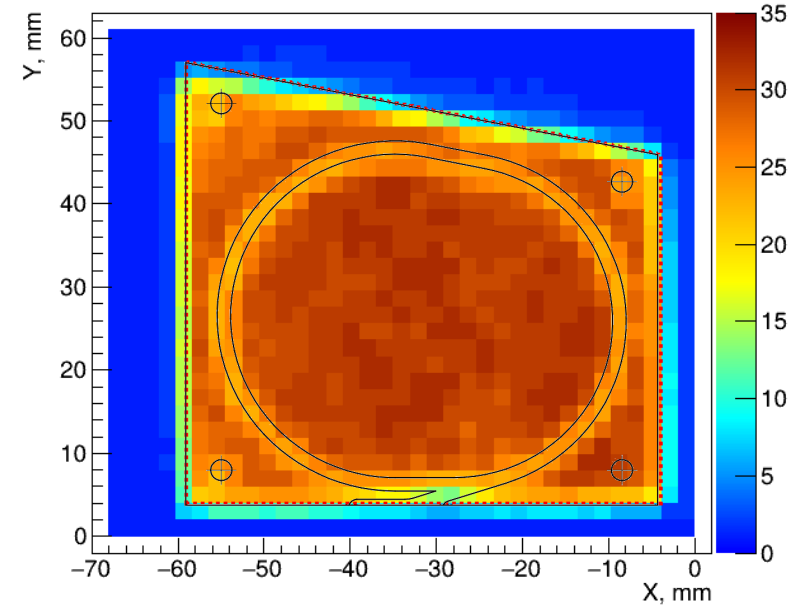


Рис. 6 – Экспериментальная установка

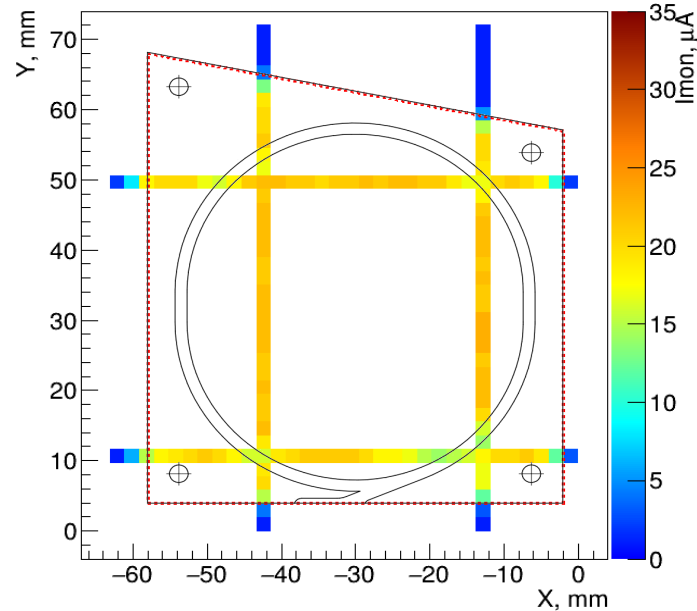
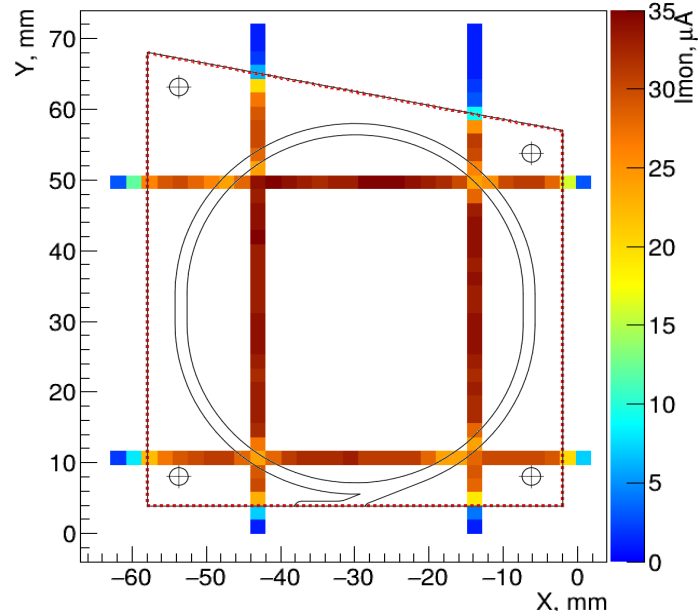
Рис. 7 – Arduino & CNC shield

Методы дефектоскопии сцинтилляторов

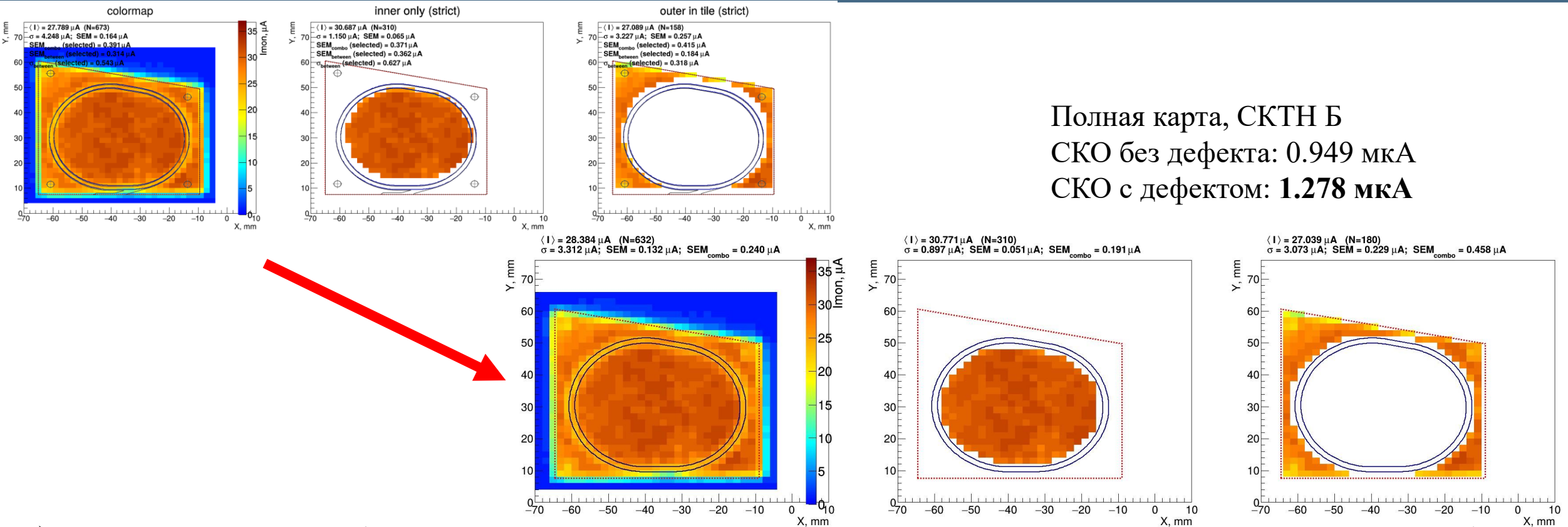


$$\langle I \rangle_{\text{внутри}} = 30.734 \pm 0.192 \mu\text{A},$$
$$\langle I \rangle_{\text{внешн}} = 27.005 \pm 0.457 \mu\text{A} - 88\% \text{ от } \langle I \rangle_{\text{внутри}}$$

- Были разработаны два основных метода снятия зависимости тока SiPM от точки облучения рентгеновской трубкой – полная и сеточная тепловая карта
- Полная карта информативна, однако строго неэффективна ввиду большой затраты времени на один образец
- Сеточная карта снимается в 10 раз быстрее, но способна однозначно показать наличие глобального и грубого производственного дефекта
- Анализ ведется по внутренней области сцинтиллятора, ограниченной волокном

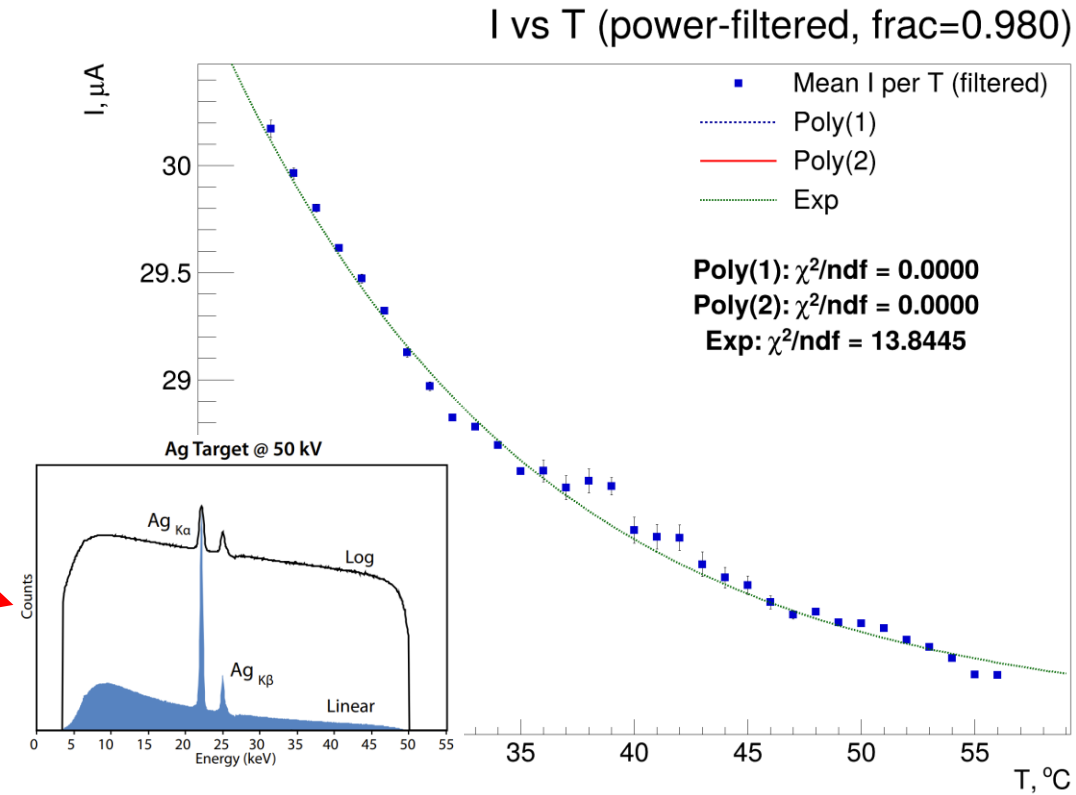
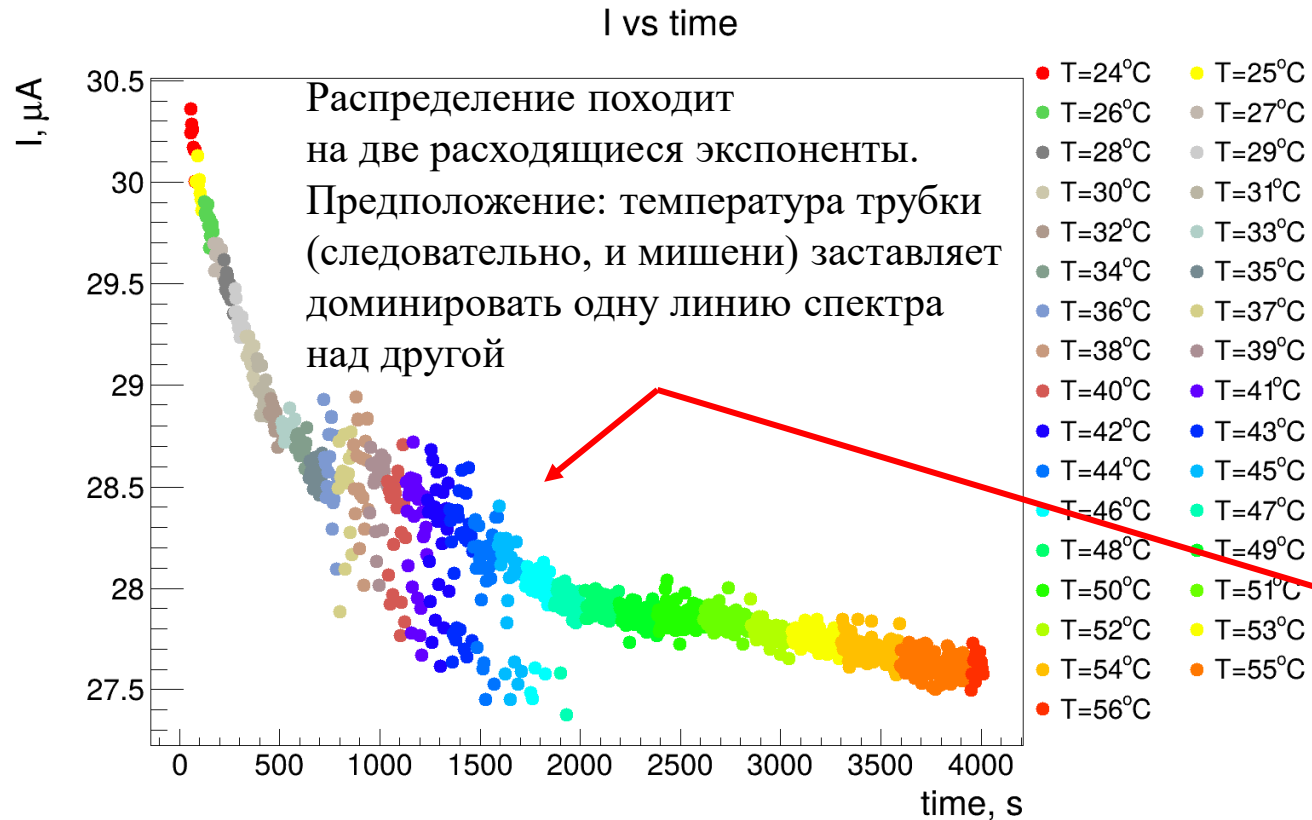


ПО для дефектоскопии сцинтилляторов



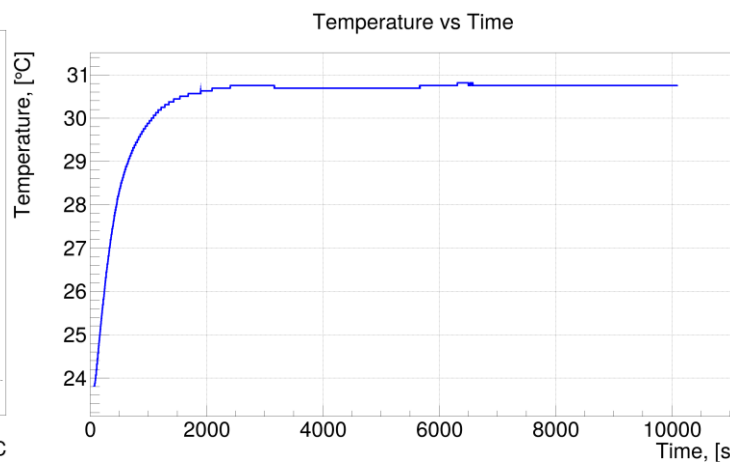
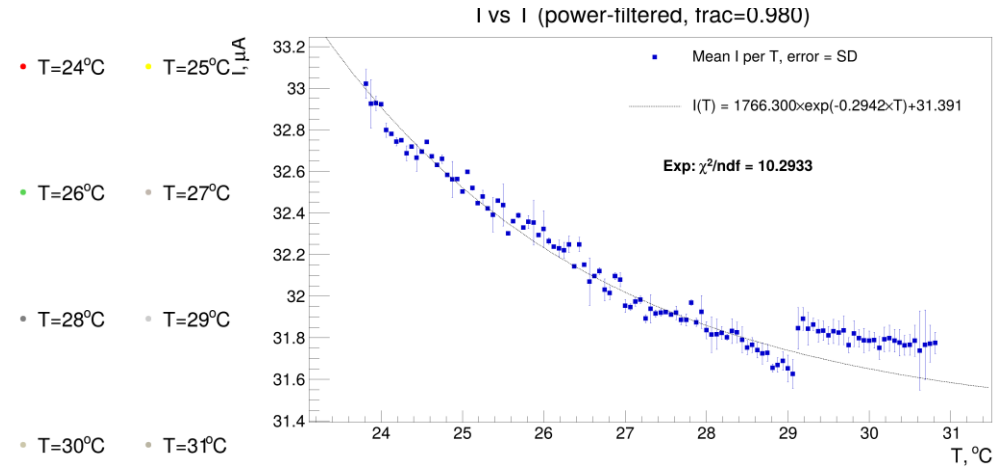
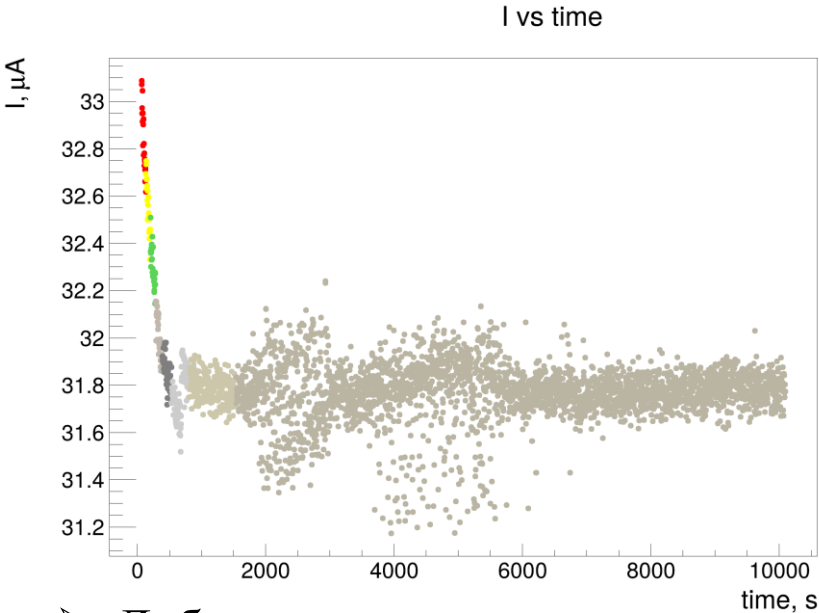
- ПО учитывает форму тайла и отдельно выделяет внутреннюю и внешнюю области сцинтиллятора; область канавки с WLS-волокном не включается в расчет.
- Чтобы аккуратно обработать пиксели на границах областей, каждый пиксель делится на 13×13 маленьких частей. По их числу программа определяет, к какой области относится пиксель.

Зависимость тока SiPM от температуры трубки (режим 50 кВ / 75 мкА)



- Одна точка сцинтиллятора облучалась рентгеновской трубкой в течение продолжительного времени; были собраны данные об отклике детектора, мощности и температуре трубки (режим 50 кВ / 75 мкА)
- Были построены графики зависимости тока фотоумножителя от времени и температуры (для одной температуры было определено среднее значение отклика; значения с дрейфом мощности были отброшены; температура окружающей SiPM среды примерно постоянна) с помощью Keithley 2400
- За час температура изменилась на 20 °С, а ток фотодетектора уменьшился на 3 мкА.

Зависимость тока SiPM от температуры трубки (режим 50 кВ / 75 мкА)

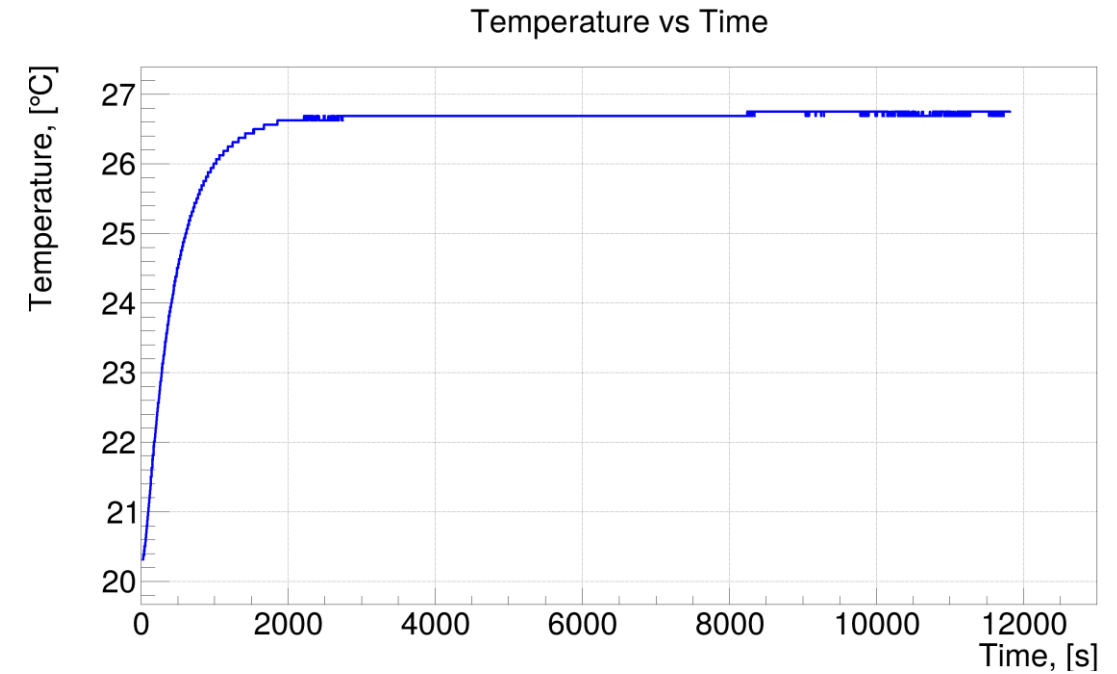
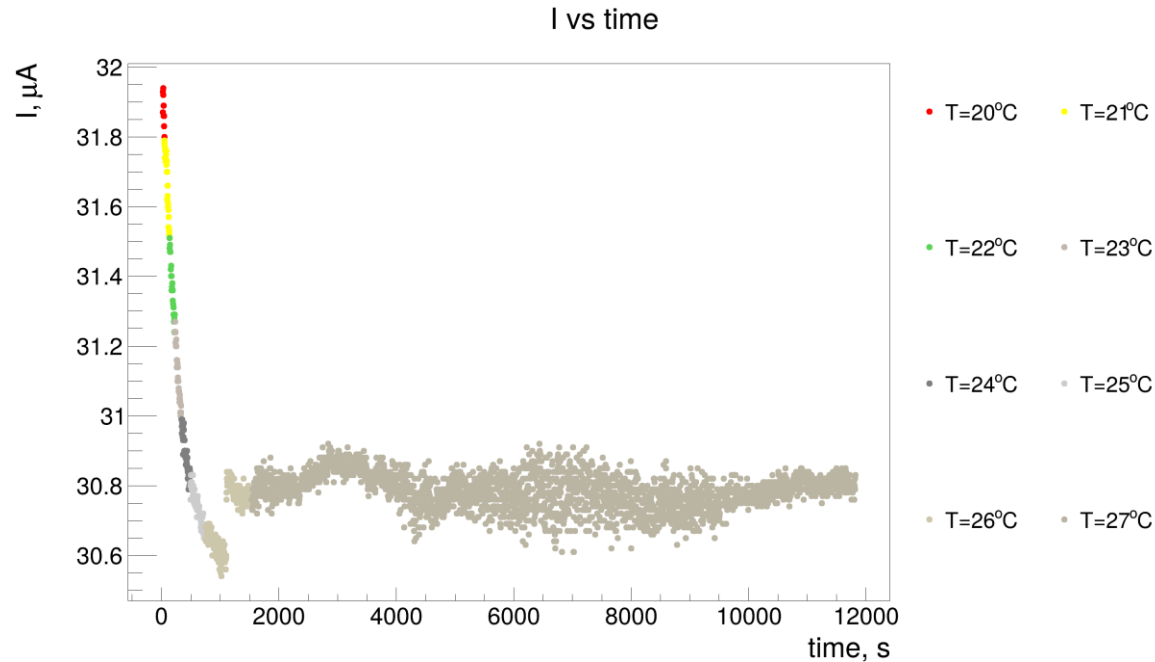


Onsemi FC30035
HV_bias = 29 V

- Добавлено активное охлаждение: кулеры с радиаторами;
- Интегрирующая RC-цепочка: фильтр высоких частот, 1мкФ и 330 Ом;
- Источник-измеритель Keithley 2400 высокого разрешения: до 10 нА;
- Перенос исследования в помещение с более стабильной внешней средой;
- Работа с трубкой осуществлена напрямую, не через приложение minix.exe: более высокое разрешение внутреннего термометра;
- Внешний термометр в объеме черного ящика: 21.3 vs 21.0 °C в начале и в конце измерения, соответственно;

Стабильное температурное плато до температуры «разделения», однако наблюдается выбросы в районе 2-6 тыс. секунд

Зависимость тока SiPM от температуры трубки (режим 50 кВ / 75 мкА)



- Активное охлаждение: кулеры с радиаторами;
- Интегрирующая RC-цепочка: фильтр высоких частот, 1 мкФ и 330 Ом;
- Амперметр АКТАКОМ, источник питания АГН2031;
- Перенос исследования в помещение с более стабильной внешней средой;
- Работа с трубкой осуществлена напрямую, не через приложение minix.exe: более высокое разрешение внутреннего термометра;
- Внешний термометр в объеме черного ящика: 21.0 vs 21.0 $^{\circ}\text{C}$ в начале и в конце измерения, соответственно;

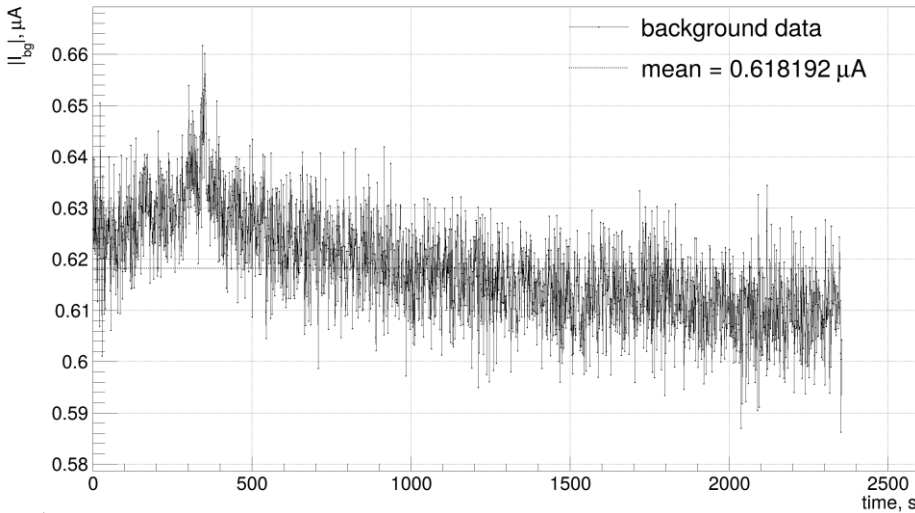
Onsemi FC30035

HV_bias = 29 V

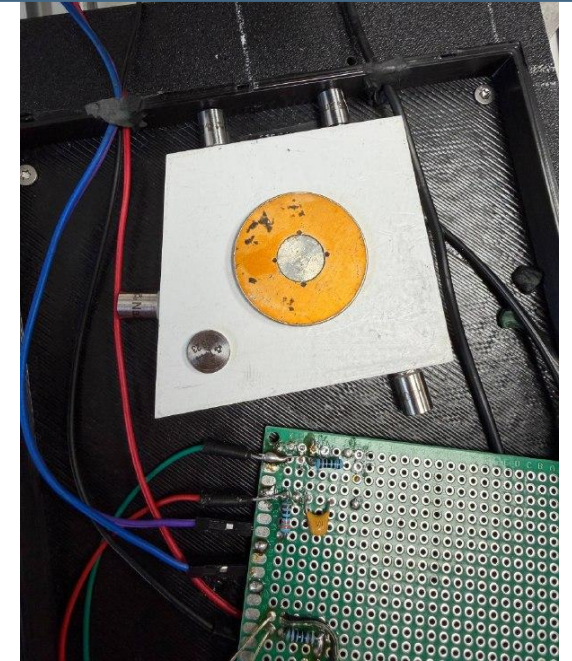
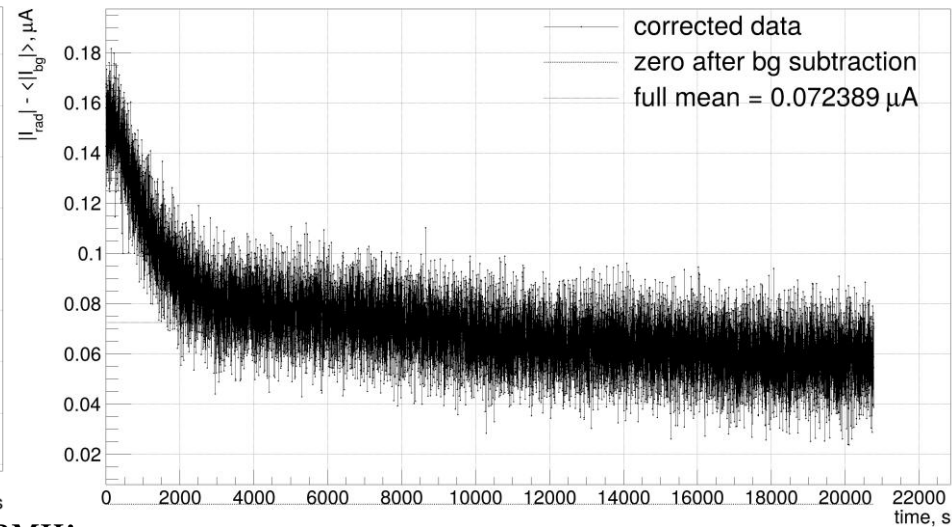
Стабильное температурное плато до температуры «разделения», нестабильный источник питания (29 vs 28.8 V в начале и в конце набора; «волнообразное» распределение тока

Зависимость тока SiPM от температуры трубки (источники)

Background current



Background-subtracted current



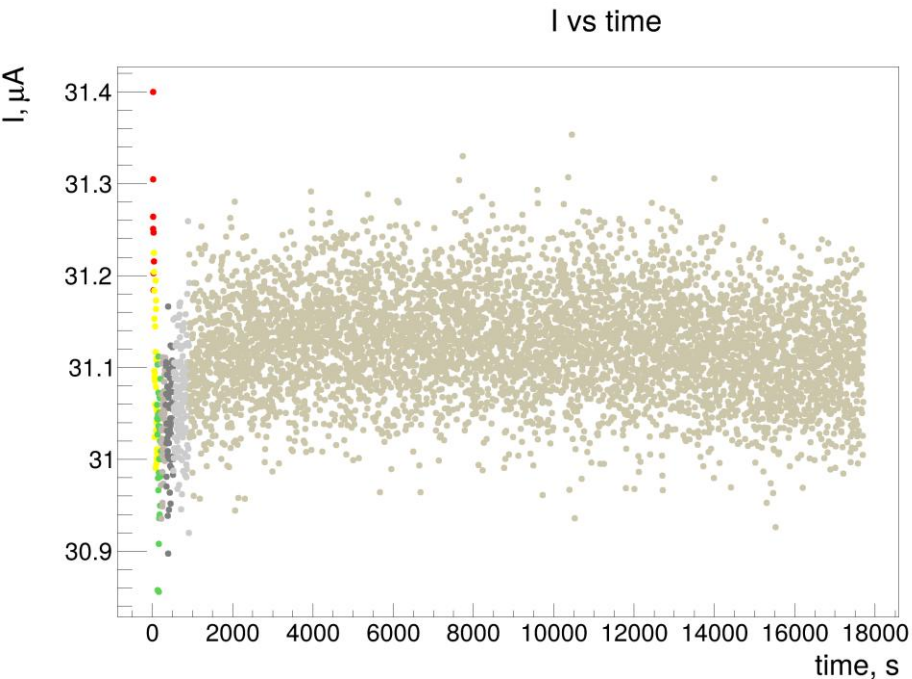
- Активное охлаждение: кулеры с радиаторами;
- Интегрирующая RC-цепочка: фильтр высоких частот, $1 \mu F$ и 330Ω ;
- Источник-измеритель Keithley 2400 высокого разрешения: до 10 nA ;
- Перенос исследования в помещение с более стабильной внешней средой;
- Работа с трубкой осуществлена напрямую, не через приложение minix.exe
- Внешний термометр в объеме черного ящика: $21.0 \text{ vs } 21.0 \text{ }^\circ C$ в начале и в конце измерения, соответственно;
- Источники ^{137}Ce , ^{60}Co , ^{22}Na и другие: в условиях отсутствия набран фон, который вычтен из получаемого с источниками сигнала;

Onsemi FC30035

HV_bias = 29 V

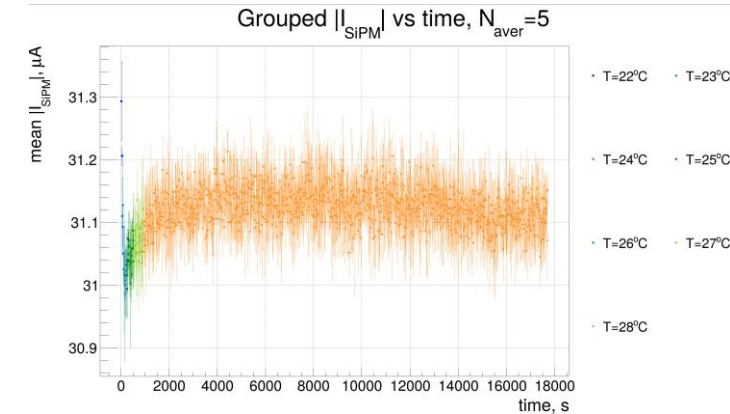
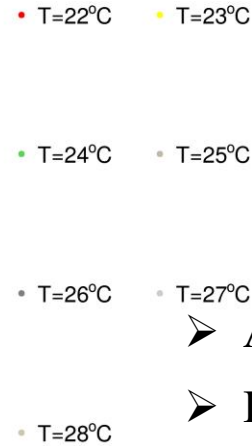
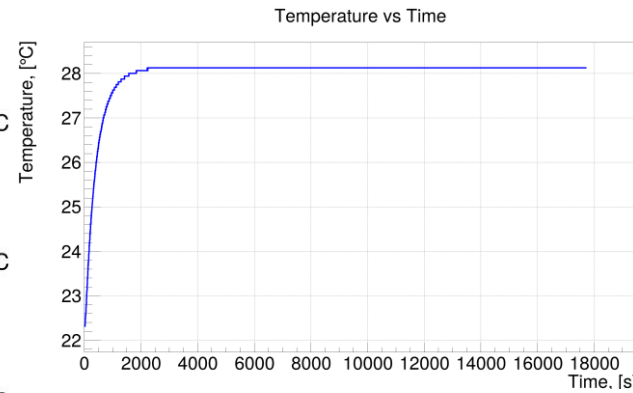
Ток SiPM со временем стабилизируется после включения питания; этот переходный процесс даёт наблюдаемый спад порядка 10% (релаксация SiPM, паразитных ёмкостей и токов утечки после подачи напряжения смещения.)

Зависимость тока SiPM от температуры трубки (40 кВ / 93 мкА)



Onsemi FC30035
HV_bias = 29 V

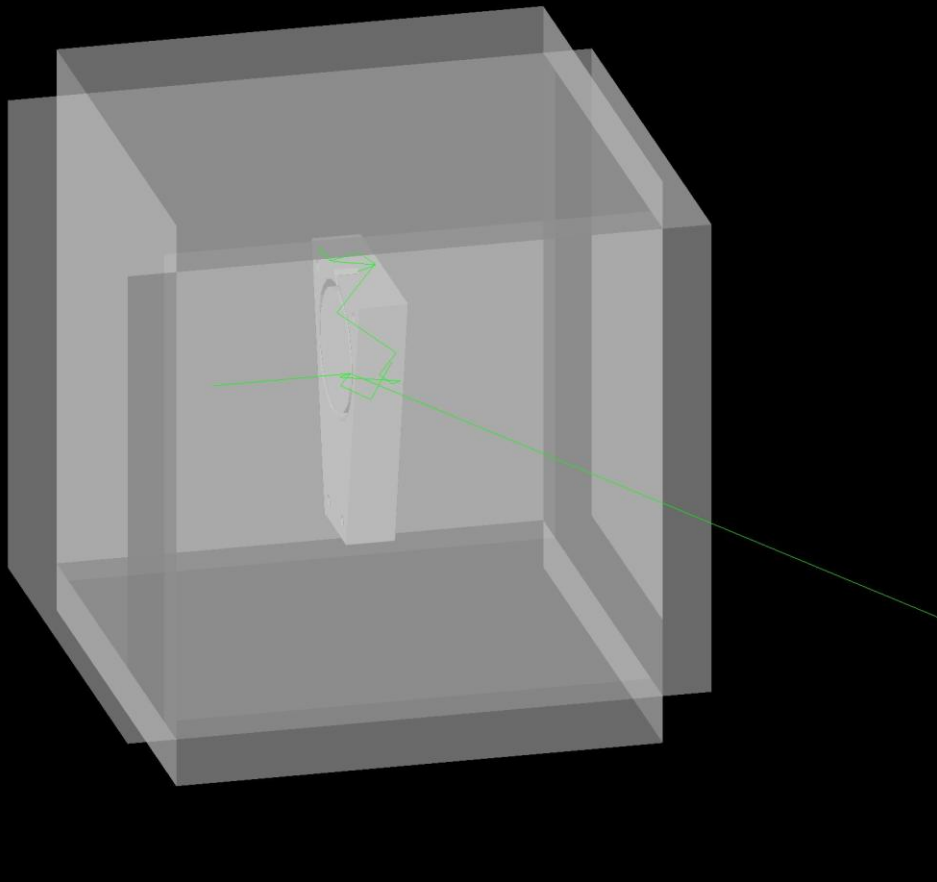
Проблемы: разветвление питания и опроса
одного канала на 8



- Активное охлаждение: кулеры с радиаторами;
- Интегрирующая RC-цепочка: фильтр высоких частот, 1мкФ и 330 Ом;
- Источник-измеритель Keithley 2400 высокого разрешения: до 10 нА;
- Исследования в помещении с более стабильной внешней средой;
- Работа с трубкой осуществлена напрямую
- Внешний термометр в объеме черного ящика: 21.0 vs 21.0 °C;
- Режим трубки 40кВ и 93 мкА

Отсутствуют явные выбросы; СКО не более 1-2%; Высокое разрешение (Keithley vs DT5202, лежавший в основе первой концепции), к тому же Keithley проще программируется и опрашивается.

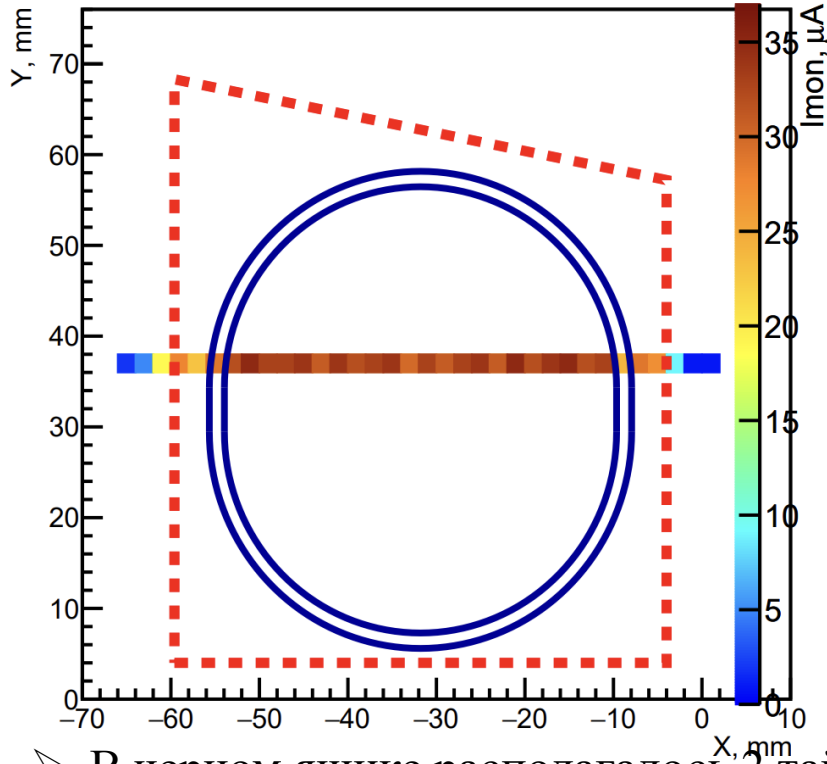
Моделирование облучения в GEANT4



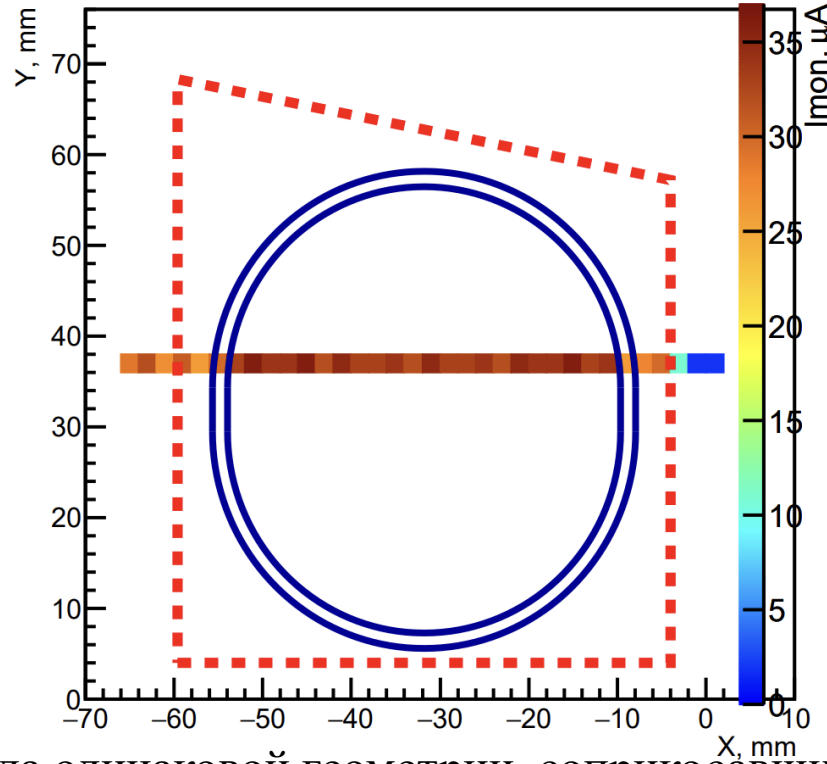
- В GEANT4 была построена модель сцинтиллятора, облучаемого квантами рентгеновского излучения (до 22 кэВ; не спектр трубки!).
- Многократное рассеяние убивает локальность облучения.
- Сцинтиллятор окружен чувствительными детекторами.
- Задняя детекторная панель поглощает 72% фотонов, все остальные грани — до 13%.
- Таким образом, несмотря на обратное рассеяние, около 85% исходного потока покидает детектор и может стать вторичным источником.
- Этот эффект, помимо прочих, может влиять на разницу в отклике детектора между центральной и внешними областями.

Оценка кросстока

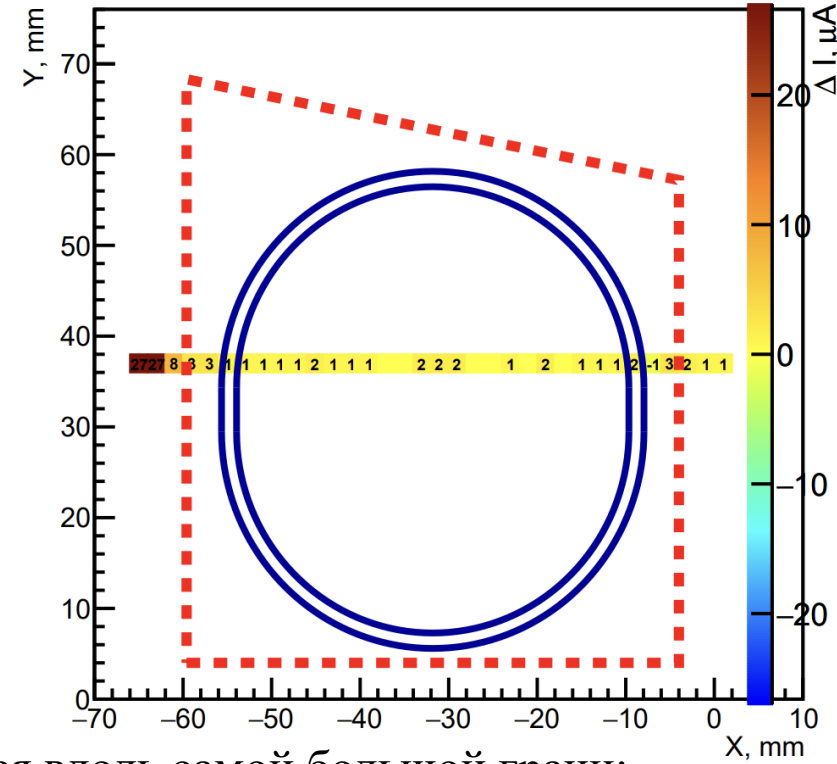
Main (CH1)



Neighbor (CH2)



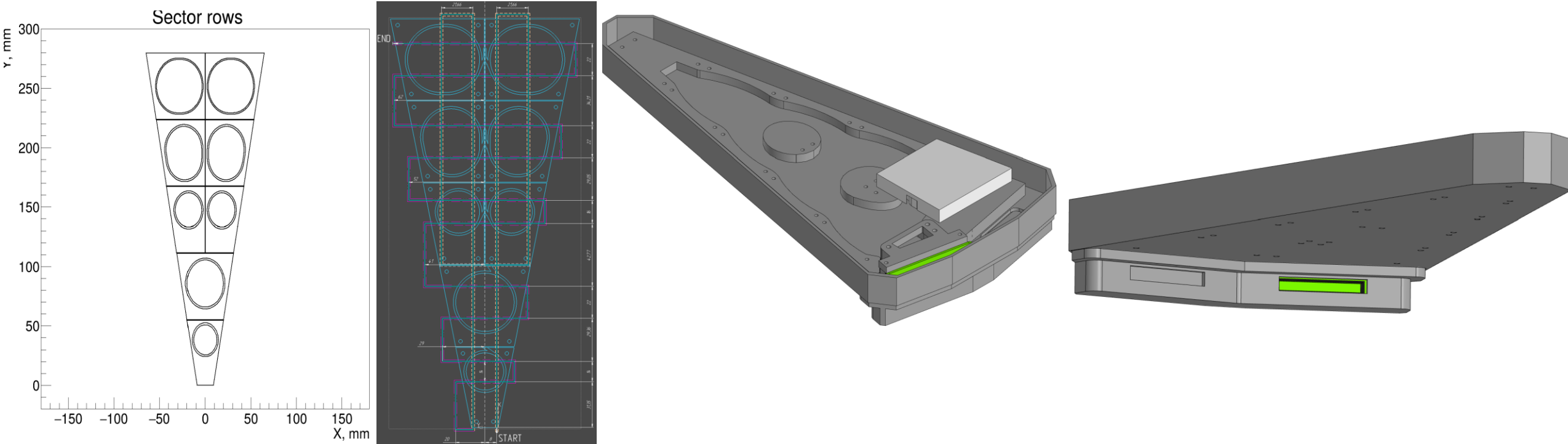
Delta (B - A)



- В черном ящике располагалось 2 тайла одинаковой геометрии, соприкоснувшись вдоль самой большой грани;
- Режим работы 50 кВ и 75 мкА (набор приведен в старых условиях);
- Левый пад – к DT5202 подключен исходный SiPM с облучаемым сцинтиллятором;
- Средний пад – к DT5202 подключены оба SiPM (т.е. оба сцинтиллятора);
- Правый пад – разность «2 – 1», кроссток: показывает ток сцинтиллятора при облучении соседнего.

Учитывая фоновый ток SiPM и разрешение (для DT5202) в 1 мкА, результат удовлетворительный.

Текущее состояние методики



- Карта сектора уже внесена в ПО;
- Рассматриваются разные карты обхода сектора за итерацию набора;
- Разработана модель черного ящика для сектора, учитывая SiPM PCB и выход шлейфа под питание платы;
- Выбран режим работы и используемая электроника
- Необходимо обновить столик с креплением черной коробки

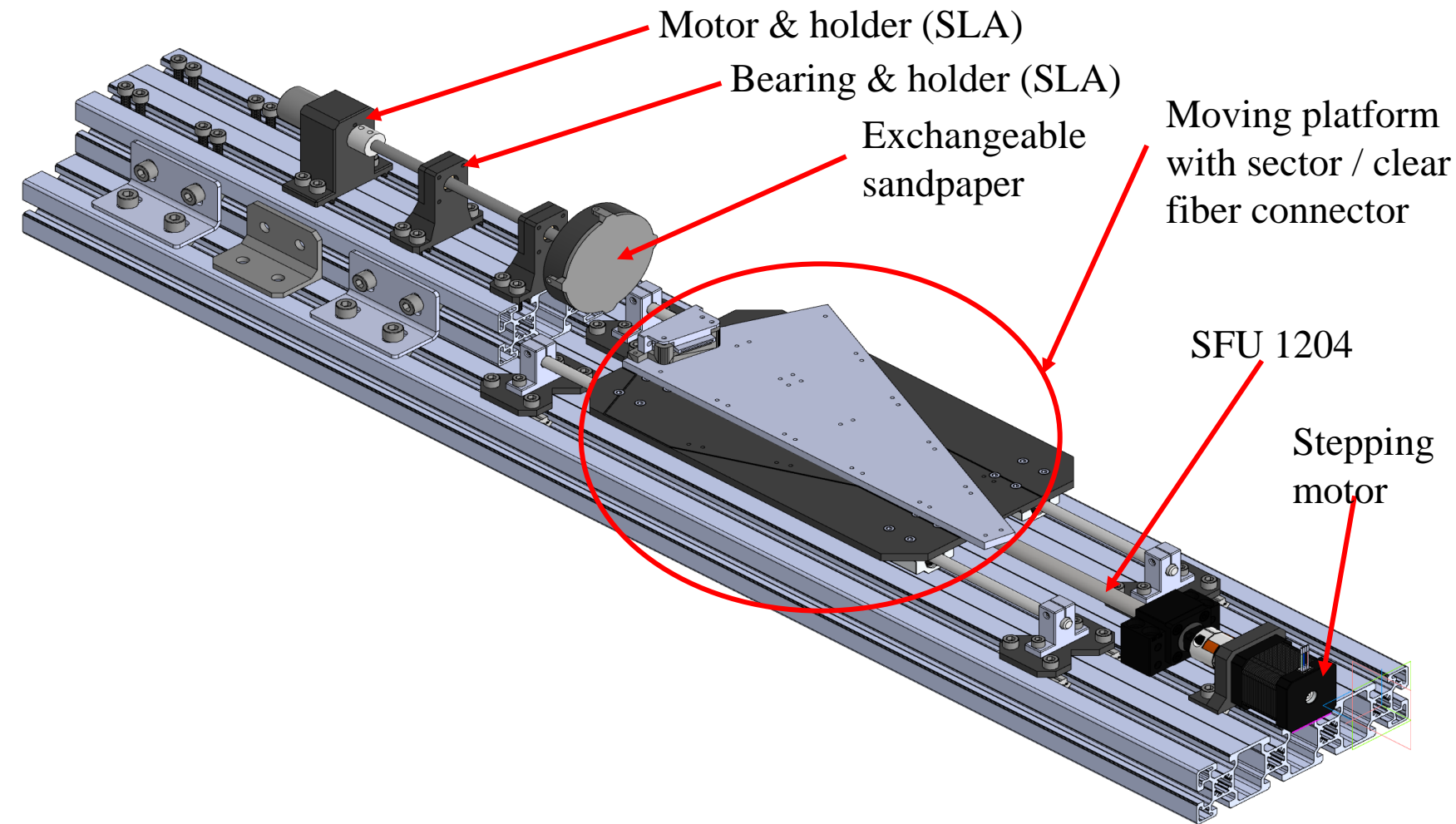
Изготовление прототипа Beam-Beam Counter



Был изготовлен прототип BBC:

- **Колесо из усеченных секторов**
- **SG BCF92 WLS** вклеено с использованием СКТН Б
- **В коннектор волокно вклеено на эпоксидную смолу**
- **Выполнена дополнительная накрутка волокна (технология ОИЯИ), чтобы ускоренно исправить дефектные образцы, не выбрасывая образцы**
- **Доп. накрутка проклеена коптоновым скотчем (ожидаются проверки потерь)**
- **В текущий момент идет работа над вторым колесом**
- **Работа выполнена согласно приближающемуся тестовому пучку (осень 2026)**

Разработка шлифовального ЧПУ станка

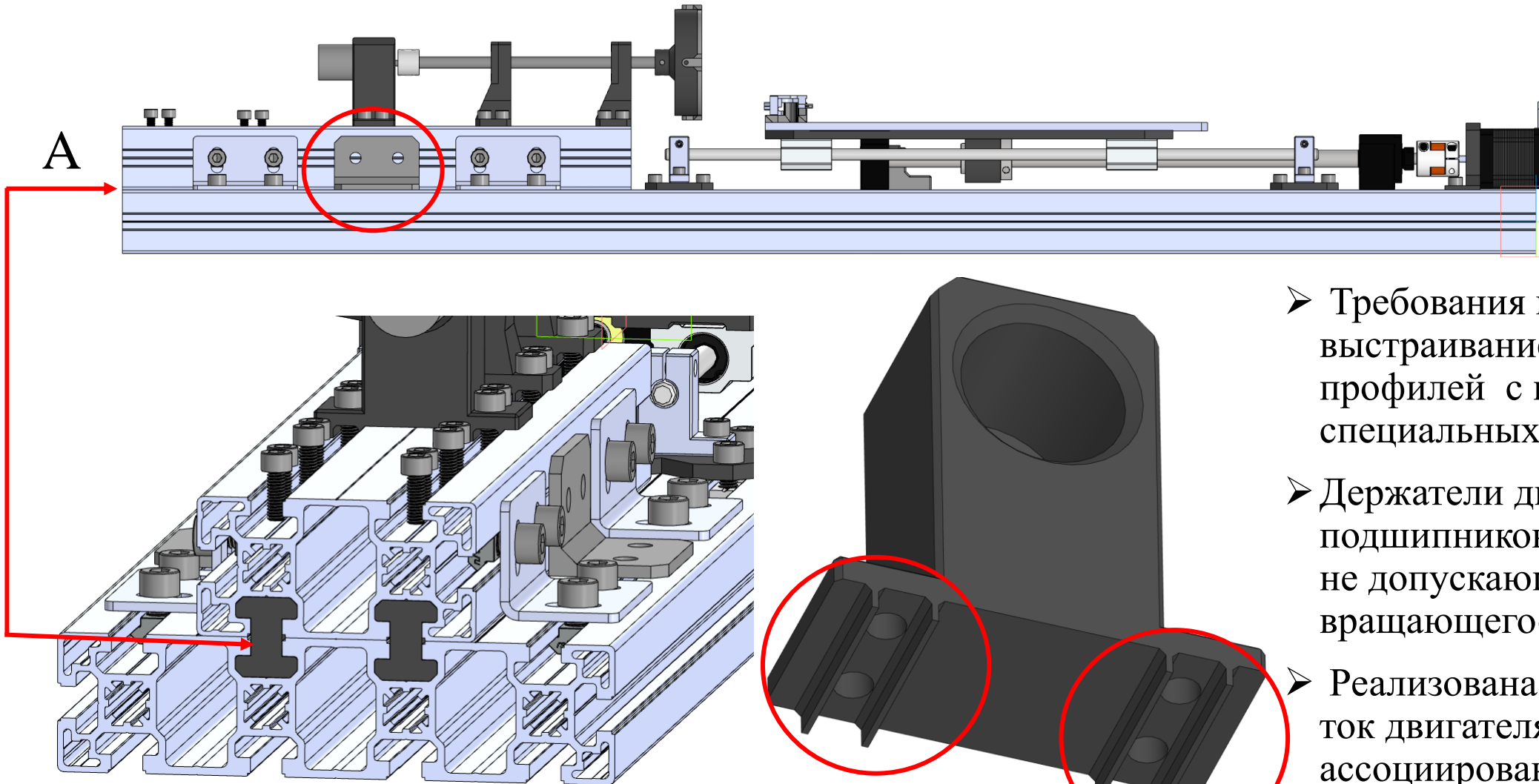


Мотивация:

- Отражение и рассеяние фотонов волокна на торцах
- У шлифовки должна быть повторяемость
- Для будущего стыка с чистым волокном, оба торца коннекторов должны быть параллельными, что практически невозможно гарантировать шлифовкой руками
- Шлифовка отнимает большое количество времени

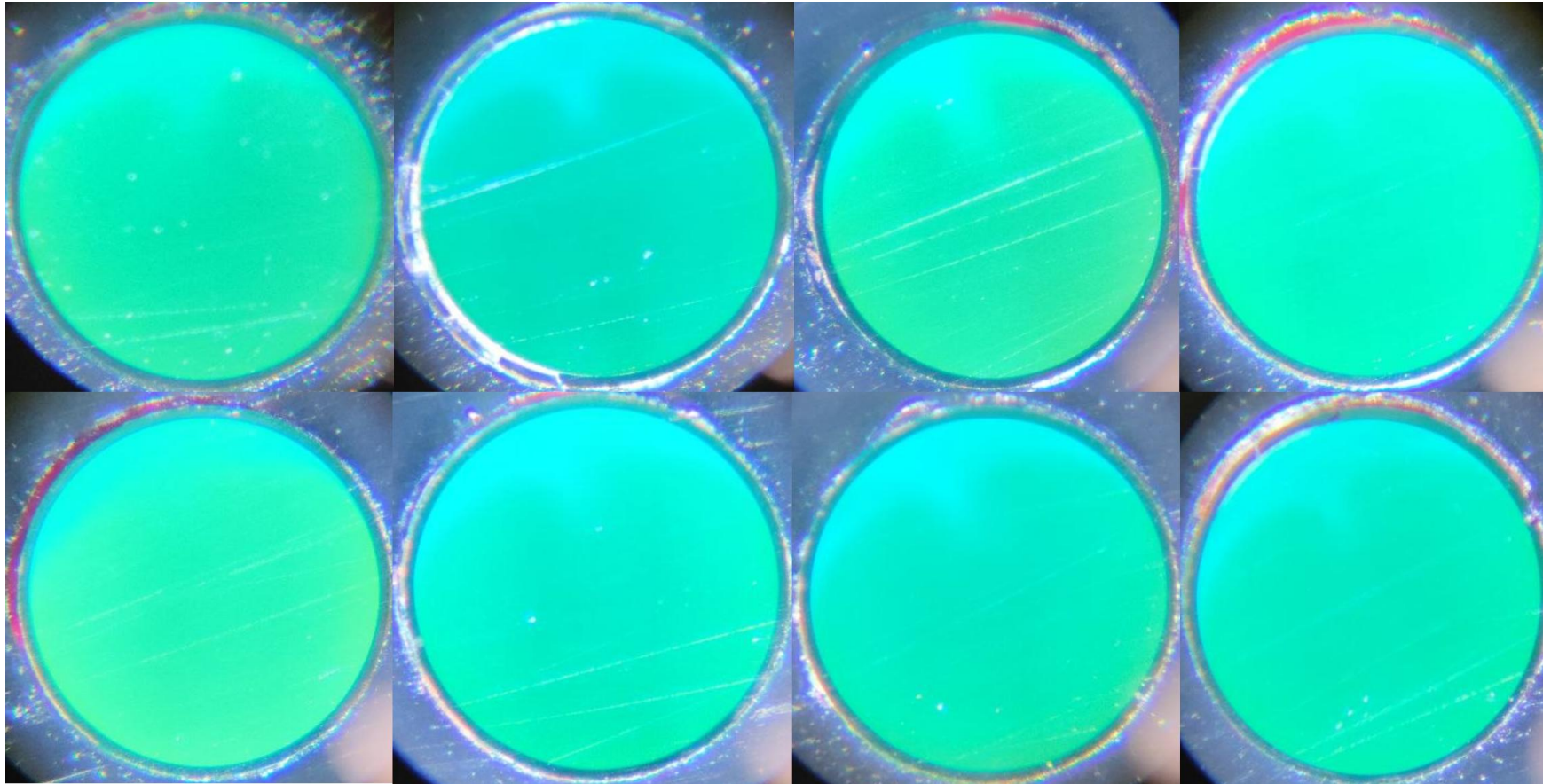
Созданы модель и сам станок;
Электрическая составляющая включает в себя блоки питания двигателей, Arduino Uno, драйверов L293D и A4988.

Разработка шлифовального ЧПУ станка



- Требования по углу решаются выстраиванием параллельности профилей с помощью специальных проставок;
- Держатели двигателя и подшипников имеют «салазки», не допускающие размещения вращающегося диска под углом
- Реализована обратная связь: ток двигателя, ассоциированного с полирующим диском, косвенно указывает на степень давления коннектора на диск

Разработка шлифовального ЧПУ станка



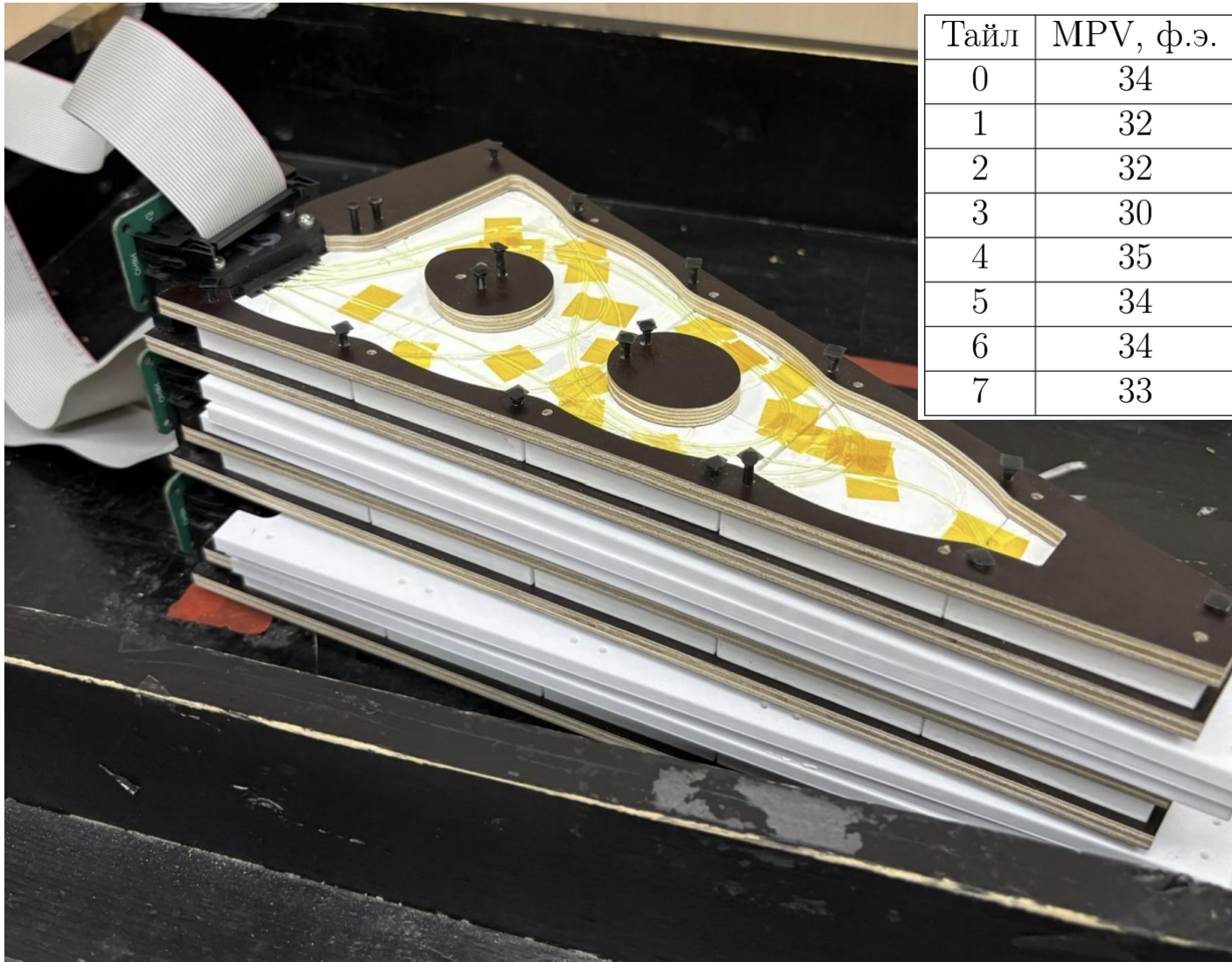
Требования к шлифовке:

- Минимизация полос, шероховатостей и царапин на внутренней части (ядре)
- Не разрушенная оболочка (кладдинг)

Приведен пример неидеальной полировки, но одной из лучших, что получается на текущий момент.

Методика продолжает разрабатываться, с целью полноценно автоматизировать станок с максимальной повторяемостью и минимальным затрачиваемым временем

Первые результаты с секторами и КИ



- Из трех полированных секторов был образован телескоп – тройное совпадение;
- Расстояние между секторами составляло ~ 3 см;
- Регистрация фотонов осуществлялась с помощью SiPM Hamamatsu S14160-1315PS, расположенных на печатной плате.
- Выходные сигналы SiPM регистрировались с помощью DT5202.
- Для каждого используемого SiPM было определено напряжение пробоя. Набор данных осуществлялся при перенапряжении 8 В и коэффициенте усиления 50 по каналу высокого усиления.
- Получен наиболее вероятный отклик тайлов с сектора – удовлетворительный.

Заключение

- Разработана и апробирована методика контроля однородности сцинтилляционных тайлов ВВС с использованием рентгеновского сканирования.
- Полные карты отклика позволяют выявлять механические и производственные дефекты, а сеточное сканирование может использоваться как более быстрый метод входного контроля.
- Разработанное ПО учитывает геометрию тайла, выделяет области анализа и позволяет количественно сравнивать отклик разных образцов.
- Проведены исследования стабильности измерений, влияния температуры трубки и кросстока; выбран рабочий подход для дальнейшего сканирования секторов.
- Изготовлен прототип ВВС, разработан шлифовальный ЧПУ-станок для обработки оптоволоконных коннекторов и получены первые удовлетворительные результаты с секторной сборкой.

*Принята заявка на участие в AYSS-2026 с темой «Influence of optical fiber polishing quality on light collection in the SPD Beam-Beam Counter prototype»; Оформляется и дополняется обзорная статья для ВВС (Q1-2)

Статьи

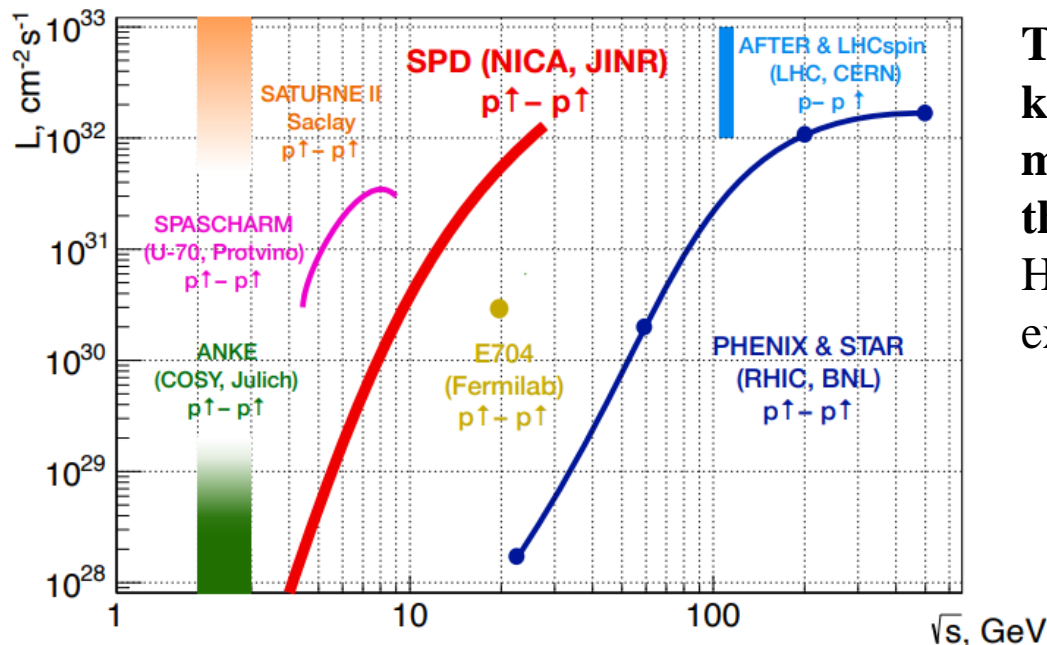
1. Material Selection of the SPD Beam-Beam Counter Scintillation Detector Prototype, Zakharov A.M. et al., Physics of Particles and Nuclei (ISSN 1063-7796), eLIBRARY: <http://elibrary.ru/item.asp?id=68611652> (Q3 Публикация до начала аспирантуры)
2. Tile Detector Configurations Testing for the SPD Beam-Beam Counter Prototype, Zakharov A.M. et al., Physics of Particles and Nuclei Letters (ISSN 1547-4771), eLIBRARY: <http://elibrary.ru/item.asp?id=68583755> (Q3 Публикация до начала аспирантуры)
3. The SPD Beam-Beam Counter Scintillation Detector Prototype Tests with FERS-5200 Front-End Readout System, Zakharov A.M. (соавт.), Physics of Particles and Nuclei Letters (ISSN 1547-4771), eLIBRARY: <http://elibrary.ru/item.asp?id=68583752> (Q3 Публикация до начала аспирантуры)
4. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. Natural Sci. Rev. 1(1) (2024). Published: 16.12.2024. DOI: 10.54546/NaturalSciRev.100101.
5. Development of the SPD Beam–Beam Counter Scintillation Detector Prototype with FERS-5200 Front-End Readout System. Vol. 87, pp. 451–458 (2024). Published: 02 September 2024. DOI: 10.1134/S1063778824700510. Q4 (Scopus).
6. Study of Wave Length Shifters for SPD BBC Scintillation Tiles Readout. Vol. 88, pp. 312–316 (2025). Published: 11 July 2025. DOI: 10.1134/S1063778825700383. Q4 (Scopus).
7. Prototype of Scintillation Detector for Extended Version of BBC Subsystem in SPD Detector. Vol. 22, pp. 1184–1186 (2025). Published: 03 October 2025. DOI: 10.1134/S1547477125701420. Q3 (Scopus).
8. Tishevsky, A.V., Volkov, I.S., Dubinin, F.A. *et al.* The Method for Estimating the Performance of the Optical and Electronic Path of the BBC Subsystem in the SPD Detector. *Phys. Part. Nuclei* **57**, 234–237 (2026). <https://doi.org/10.1134/S1063779625701199>
9. (Рукопись в процессе рецензирования) LIGHT COLLECTION INHOMOGENEITY AND QUALITY CONTROL IN PLASTIC SCINTILLATORS USING X–RAY SCANNING FOR SPD BEAM–BEAM COUNTER PROTOTYPE, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics

Спасибо за внимание!

BACK UP

Physics behind the research

- According to astrophysical and cosmological data, about 5% of the mass of the Universe consists of **visible baryonic matter**, the properties of which are determined by strong and electromagnetic interactions. With respect to the two other components, dark matter and dark energy, baryonic matter **seems to be a well-studied subject**. In fact, despite the great advances in quantum chromodynamics made in describing the interaction of quarks and gluons, **the question of why nucleons are exactly like we see them, remains open**.
- **This spin is responsible for such fundamental properties of Nature** as the nucleon magnetic moment, different phases of matter at low temperatures, the properties of neutron stars, and the stability of the known Universe.
- **Since the famous "spin crisis"** that began in 1987, **the problem of the nucleon spin structure remains** one of the most intriguing puzzles in contemporary high-energy physics.



The SPD experiment at NICA will cover the kinematic gap between the low-energy measurements at ANKE-COSY and SATURNE and the high-energy measurements at the Relativistic Heavy Ion Collider, as well as the planned fixed-target experiments at the LHC

Fig. 5. NICA SPD and the other past, present, and future experiments with polarized protons

Methods and equipment

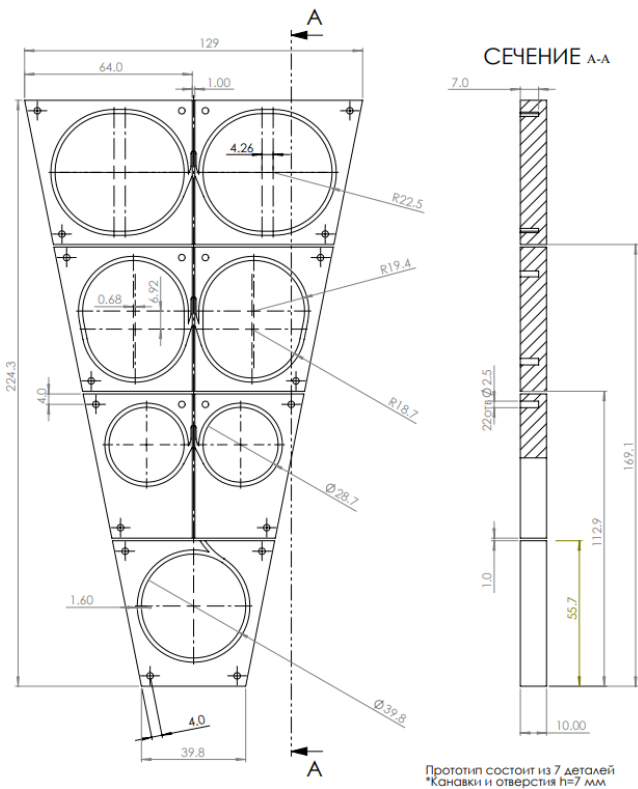


Fig. 10. Geometry of tiles, used in this work (3 rows & central tile). Similar to STAR EPD, but higher polar angle granularity

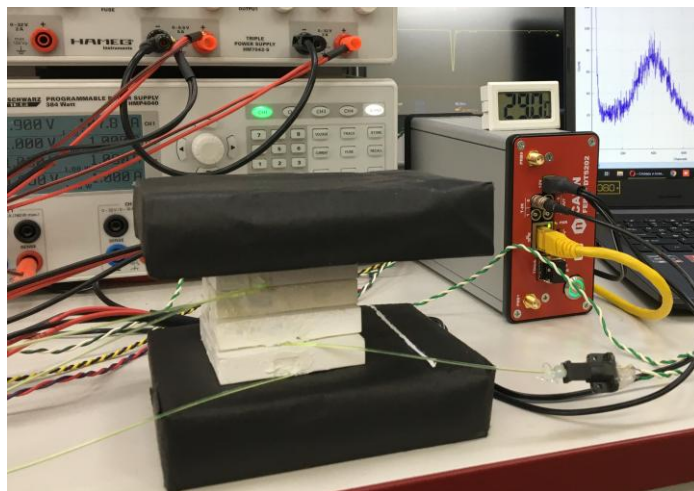


Fig. 11. Tile system with external trigger – two scintillators with PMTs readout, covered in black paper

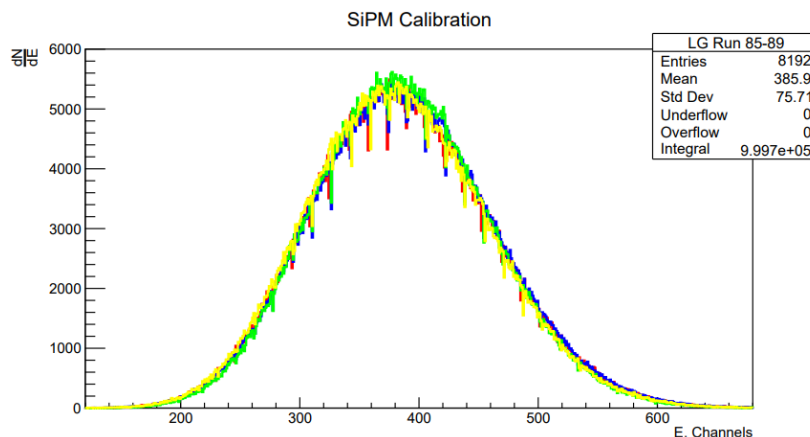


Fig. 14. 4 SiPM calibration

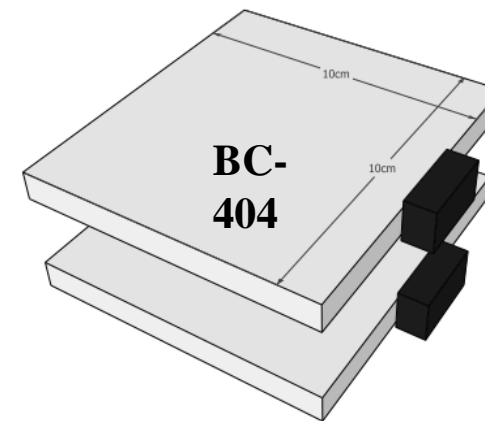


Fig. 12. Trigger time resolution ~650 ps

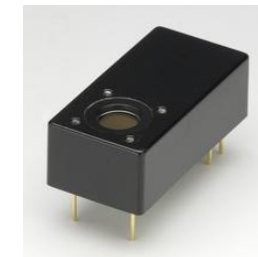


Fig. 13. PMT Hamamatsu H10720-110

Although CAEN FERS-5200 has an internal coincidence circuit, an external trigger proved to be more efficient for measurements on cosmic rays. Internal CC is used for radioactive source measurements.

Convolution of Gaussian and Landau functions (langaus) used as fit function for resulting energy values

Material selection results

Scintillator cover - **Matted** VS Tyvek:

- Matted collects more light (approximately);
- Matted is more convenient for mass production;
- Chemically matted tiles are more resistant to outer interactions and could be easily repaired;
- Tiles are matted by the scintillator manufacturer (Uniplast Vladimir), which is also cheap.

Optical cement – **CKTN B, E, OK-72**:

- Viscosity of CKTN MED type B is reduced by 50 times in comparison with type E and relatively similar to the OK-72 – mass production convenience;
- CKTN B collects about the same number of photons as the E type, but significantly more than OK-72;
- According to data, CKTN series has a higher throughput to high-energy particles.

WLS fibers – SGC VS **Kuraray**:

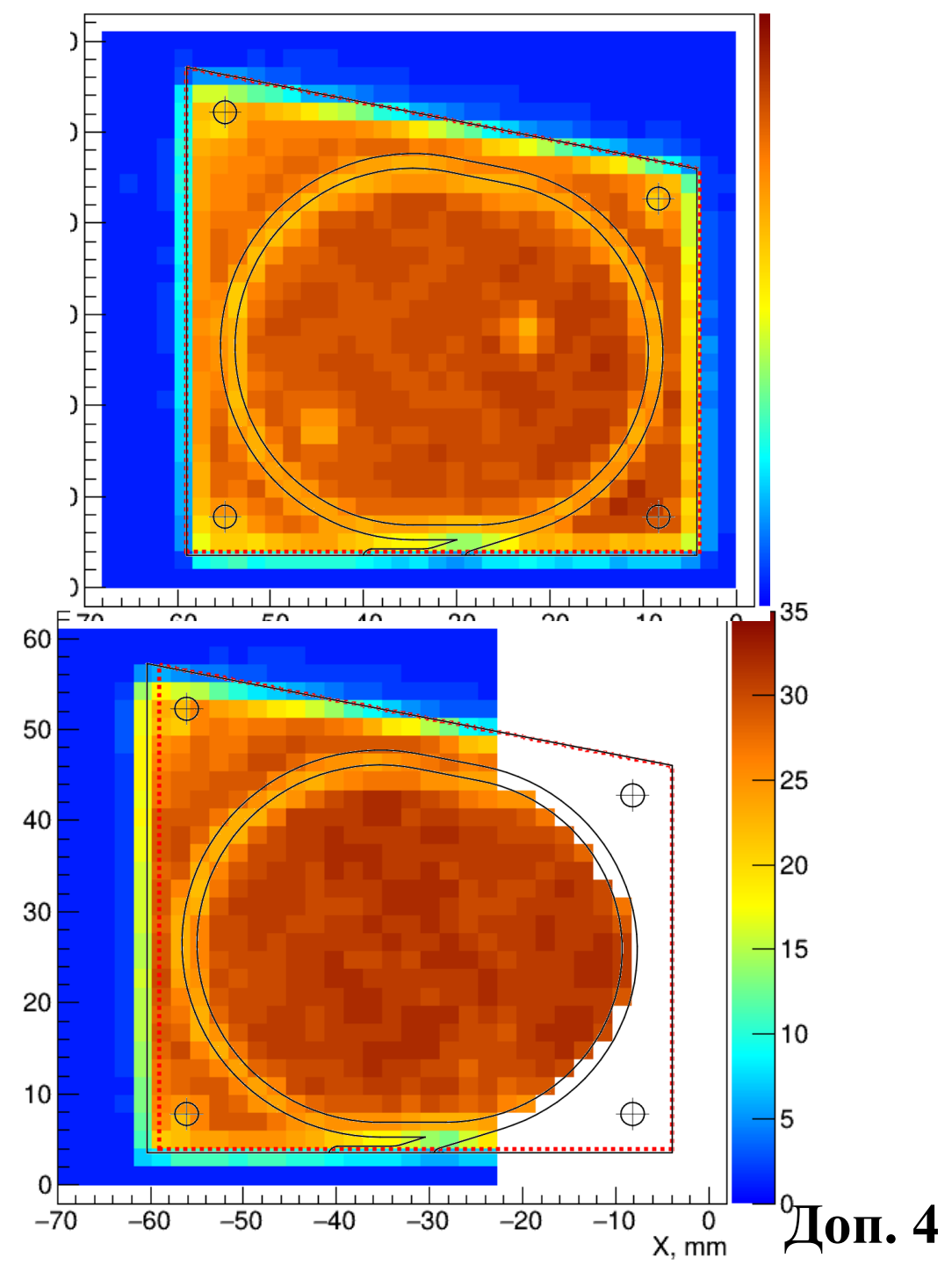
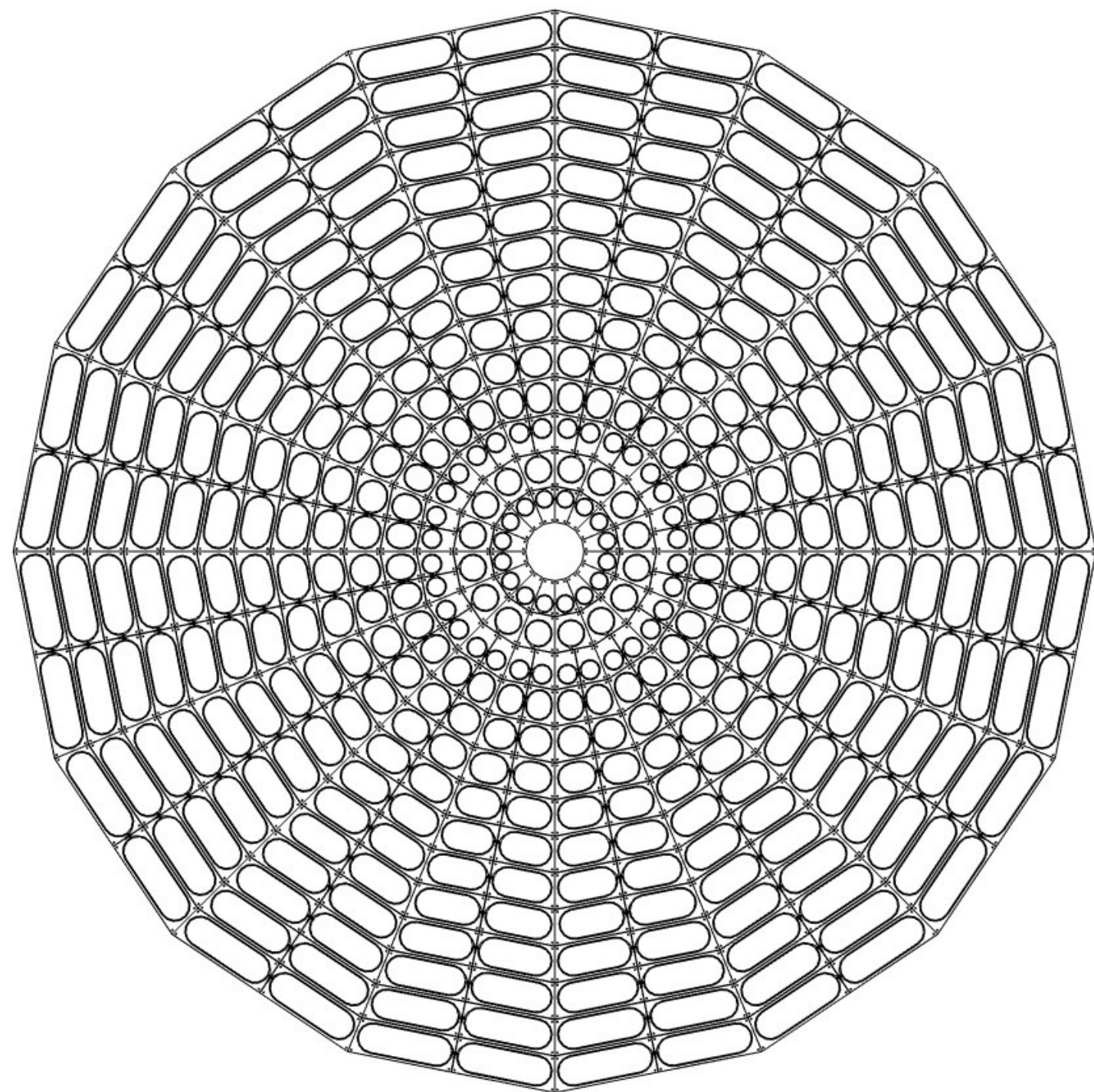
- According to experimental data, Kuraray Y-11 collects more photons than Saint-Gobain Crystal BCF92;
- Experiment was performed with the same conditions – same run, positioning, cosmic rays as the source, e.t.c

Fit Param-s	Row 1 Matted	Row 1 Tyvek	Row 3 Matted	Row 3 Tyvek
Mean, Channels	372.9	346.7	406.9	348.3
Width, Channels	28.5	30.0	30.3	27.5

Fit Params	CKTN MED E	CKTN MED B	OK-72
Mean, Channels	354.5	387.6	307.2
Width, Channels	262.2	299.9	249.5

Fit Params	BCF92	Y-11
Mean, Channels	387.6	599.2
Width, Channels	299.9	370.2

Tables 1, 2, 3, correspondingly: fit parameters for covers, optical cements and WLS fibers comparisons



Метод 1: Полная «тепловая карта»

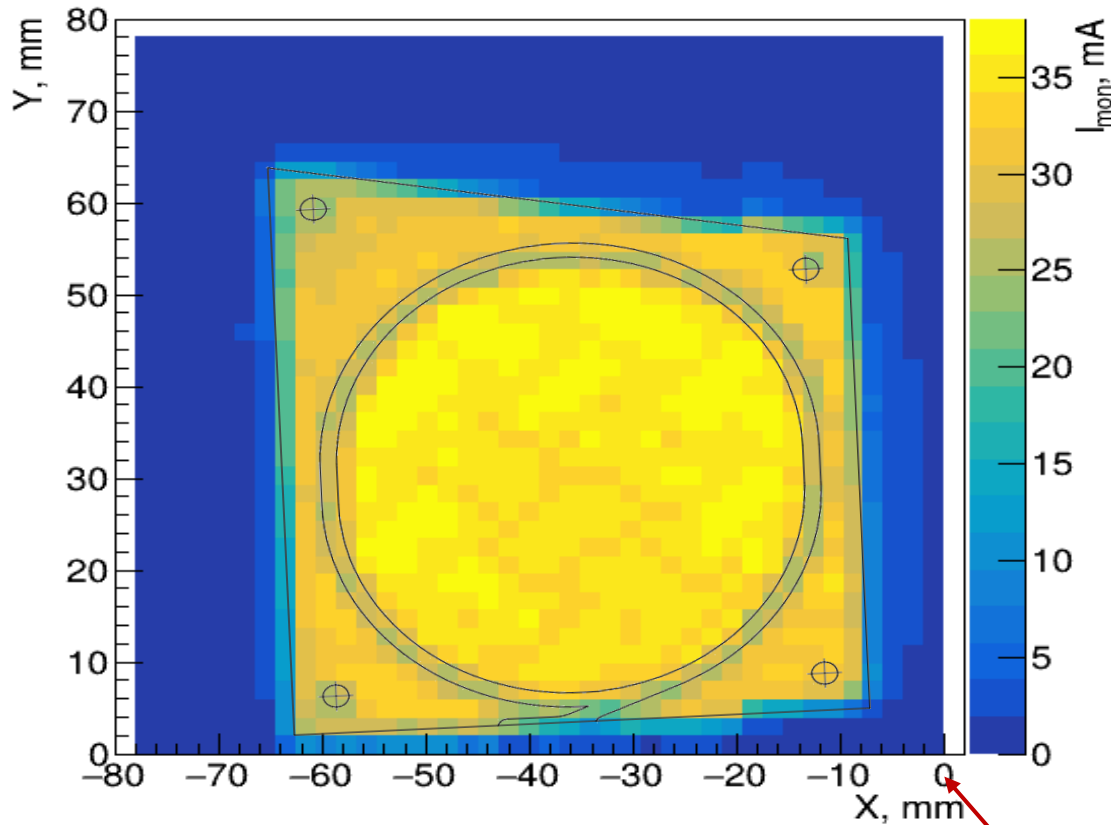
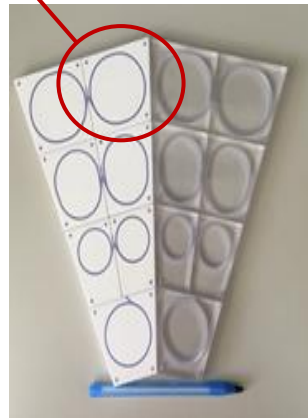


Рис. 8 – Зависимость тока кремниевого фотоумножителя от положения рентгеновской трубки

Ряд
3 (L;R)
2 (L;R)
1 (L;R)
центральный



- Отчетливо видна область пониженного отклика детектора, соответствующая области пролегания оптоволокна (до 50% потерь)
- Область пролегания волокна делит сцинтиллятор на две части: зоны максимального и слегка пониженного отклика
- Внешняя часть сцинтиллятора позволяет собирать до 85% от максимального отклика
- Методика потенциально позволит оценивать факт непригодности сцинтилляторов для прототипа и детектора
- Снятие сигнала со всего объема сцинтиллятора неэффективно с точки зрения время затраты – необходима оптимизация

Метод 1: Механические дефекты

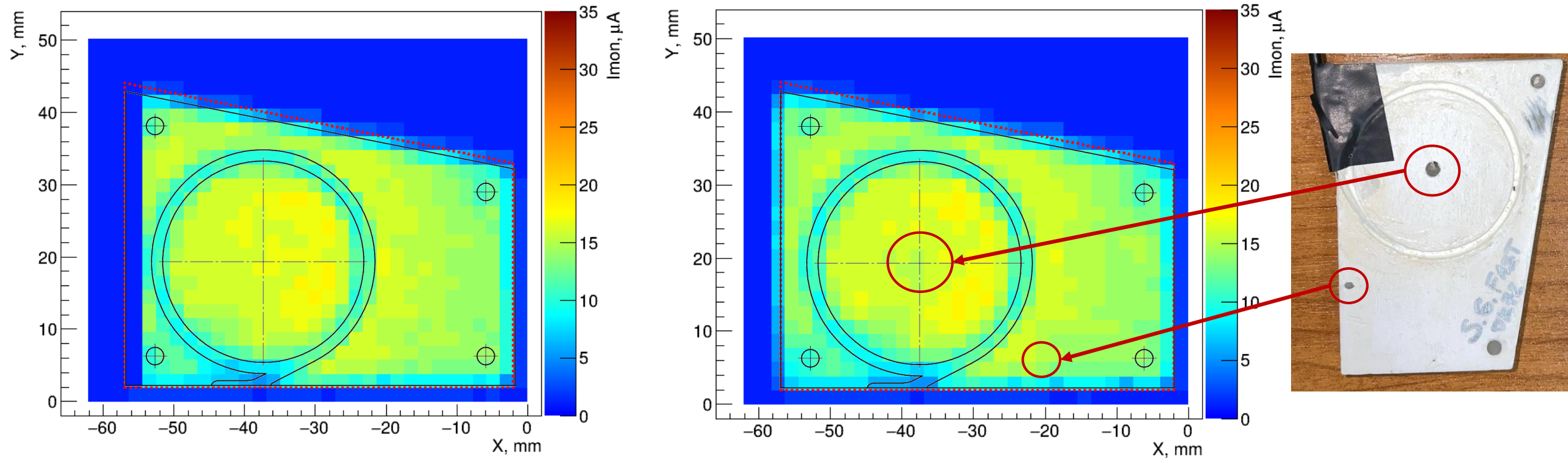


Рис. 9 – Сравнение откликов до и после нанесения механических дефектов (ОК-72)

- Тепловая карта отклика была получена с использованием ранее изготовленных образцов ряда 2, склеенных оптическим клеем ОК-72
- Отклик детектора измерялся до и после нанесения дефектов, которые включали два отверстия диаметром приблизительно 2,5 и 1 мм и примерной глубиной в половину толщины сцинтиллятора (5 мм)
- Едва заметная разница картины указывает на необходимость дальнейшего исследования

Метод 1: Механические дефекты

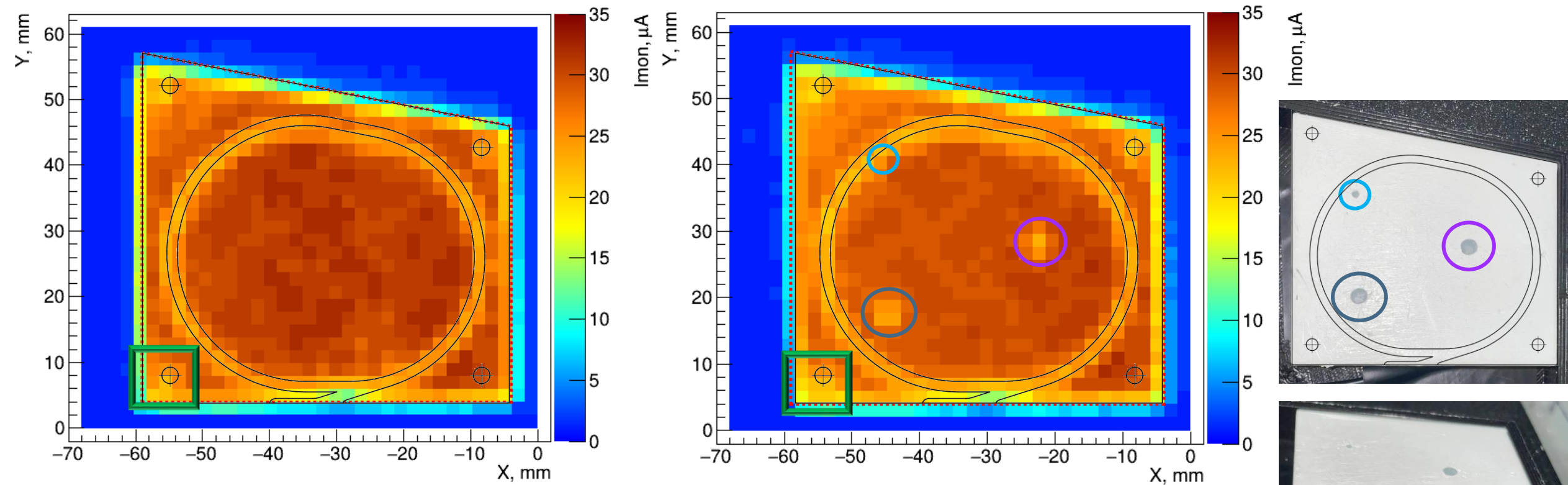


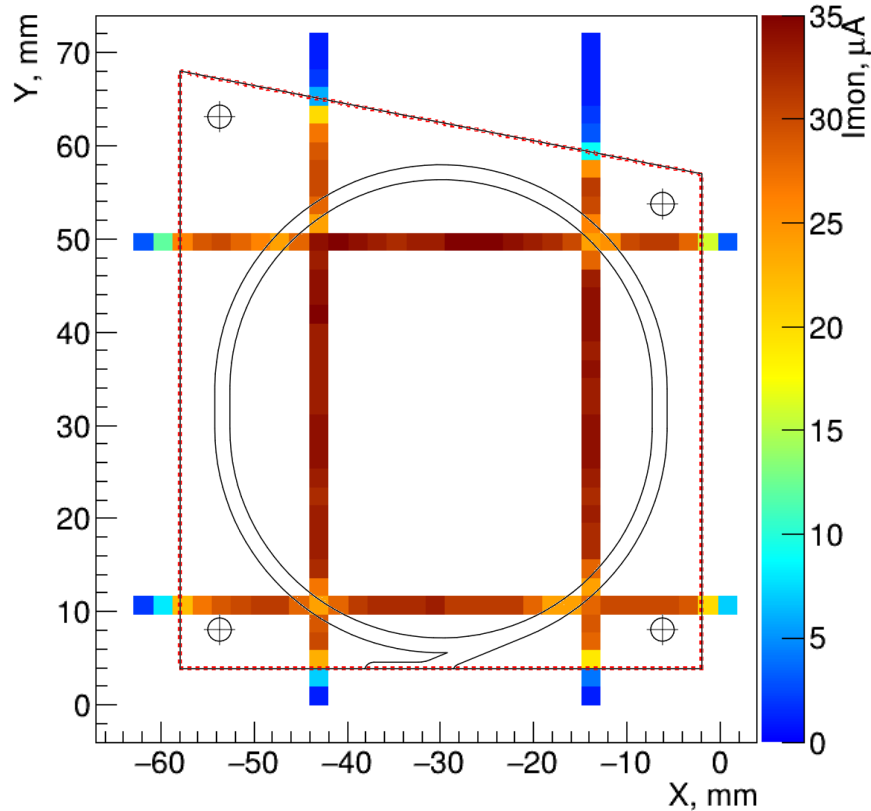
Рис. 10 – Сравнение откликов до и после нанесения механических дефектов (СКТН Е)

- Отклик детектора также измерялся до и после нанесения дефектов (три отверстия диаметром 3 мм и одно отверстие 1 мм при одинаковой глубине 5 мм)
- Средний отклик с центральной части - 30.6 vs 29.6 μA - при разрешении источника питания 1 μA
- Источник питания А7585D позволяет однозначно устанавливать факт наличия или отсутствия только крупных дефектов

Метод 2: Производственные дефекты

СКТН МЕД
Б

Средний
отклик:
32.8 μA



Без клея

Средний
отклик:
21.2 μA

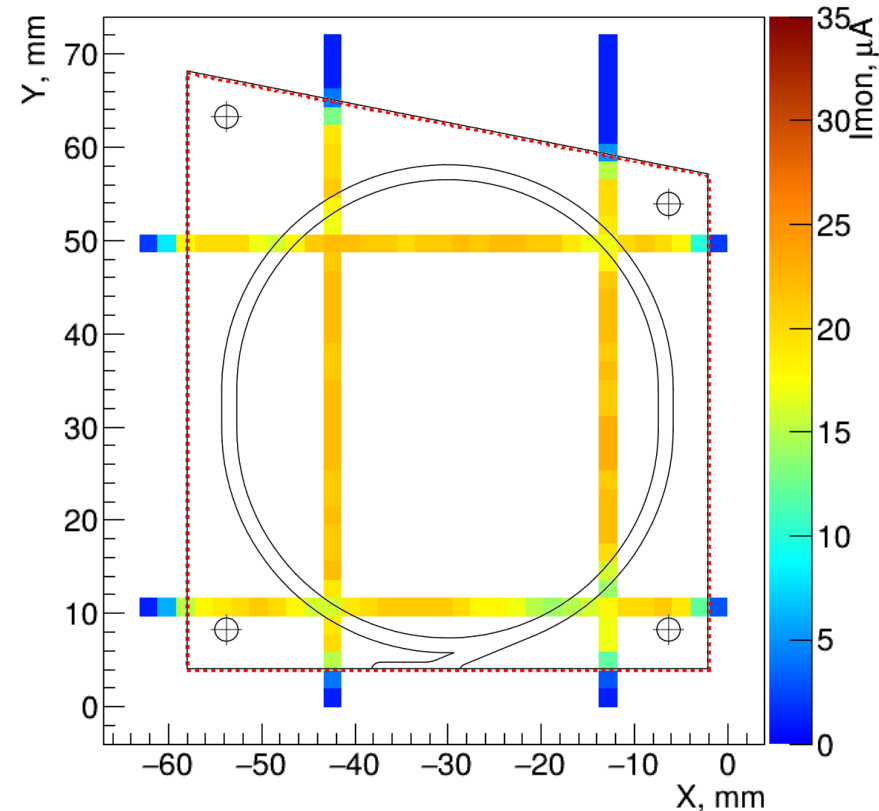


Рис. 11 – Сравнение откликов с тайлов с производственным дефектом (отсутствие клея)

- Тепловые карты отклика были собраны для двух образцов: с оптическим клеем СКТН Б (32.8 μA) и без него (21.2 μA) – средний отклик в центральной области сцинтиллятора отличается на 35%. В случае аномального радиационного повреждения детектора он по прежнему будет выполнять свои функции.
- Первоначальный метод информативен и точен, однако снятие полной карты занимает слишком много времени
- Был предложен более быстрый, но менее подробный метод на основе сетки (на этапе разработки)

Метод 2: Производственные дефекты

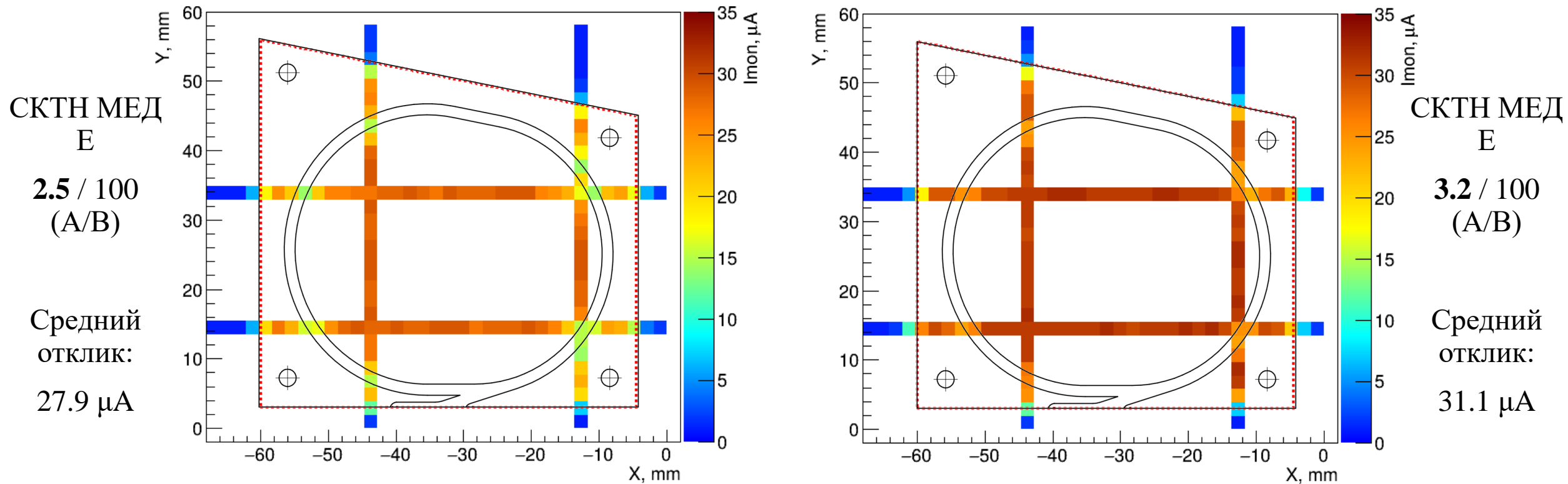


Рис. 12 – Сравнение откликов с тайлов с производственным дефектом (разные концентрации клея)

- Тепловые карты отклика были собраны для двух сцинтилляторов с разными концентрациями двухкомпонентного оптического клея СКТН Е – средний отклик различается на $11 \pm 7\%$ (с учетом погрешности)
- Согласно ранее проведенным измерениям на космическом излучении, разность положений среднего распределений составляет около 18%
- Методика может устанавливать факт критического нарушения концентрации клея в изготовленных образцах

Метод 2: Производственные дефекты

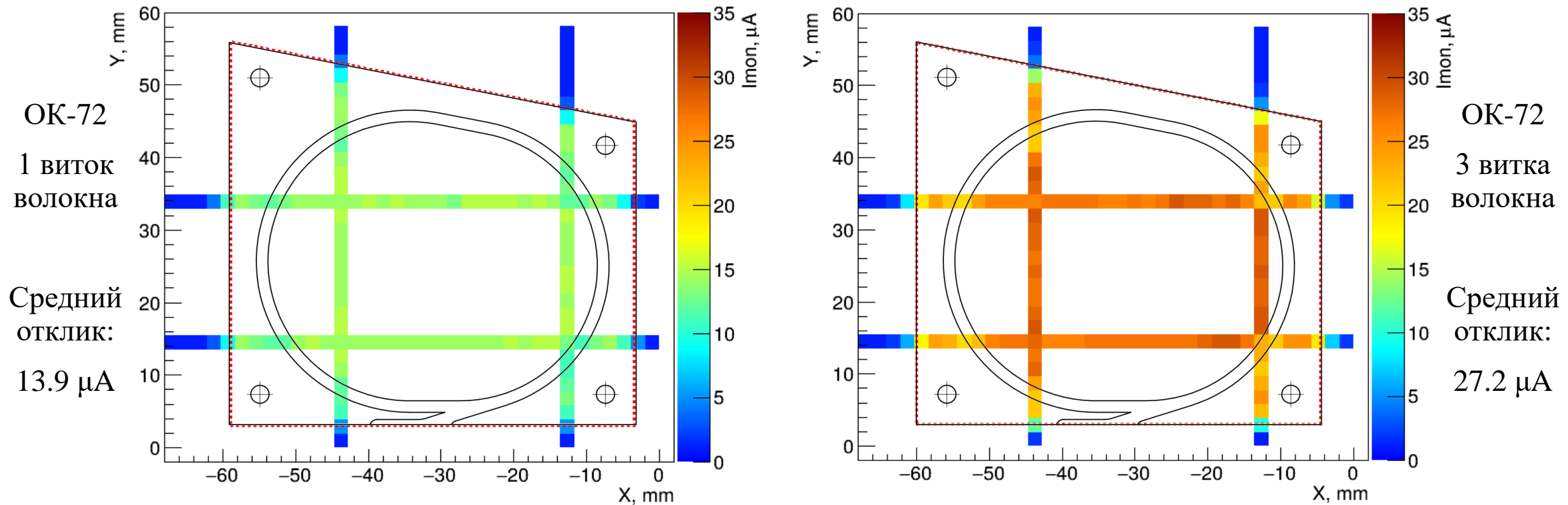


Рис. 12 – Сравнение откликов с тайлов с производственным дефектом (разное число витков волокна)

- Зависимость отклика от положения трубки также была построена для двух сцинтилляторов с разным числом витков оптоволокна – средний отклик детектора с 1 витком на 50% ниже, чем в случае 3 витков.
- Согласно ранее проведенным измерениям на космическом излучении, разность положений среднего распределений составляла от 40% до 70%
- Методика может устанавливать факт неверного числа витков волокна в изготовленных образцах

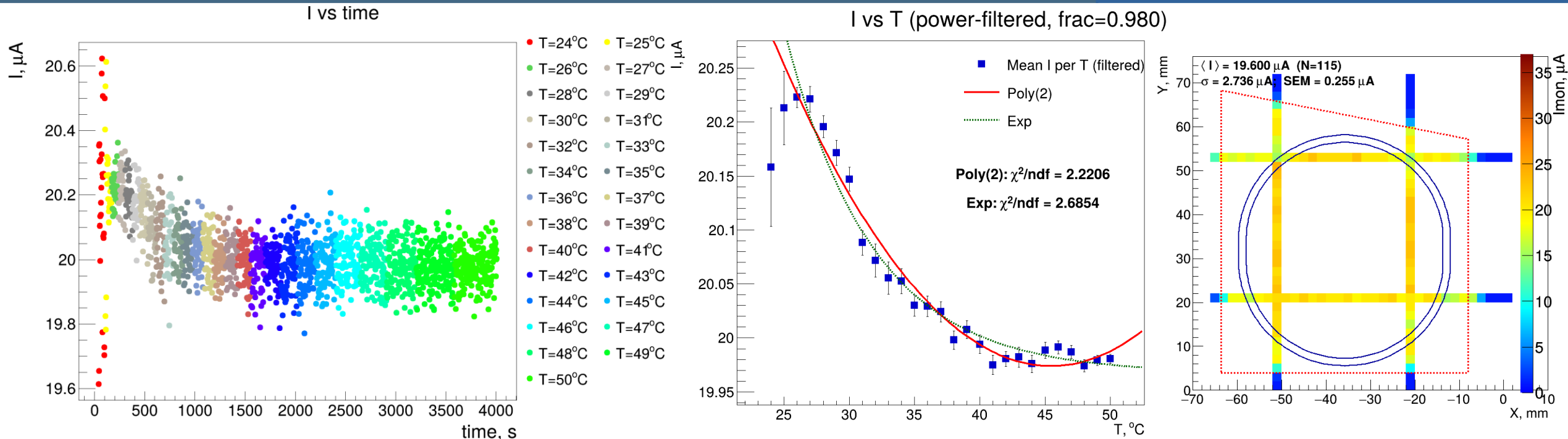


Fig. 9 – Silicon photomultiplier current dependence on tube operating time and temperature (20 kV / 187 μA)

- One point of the scintillator was irradiated with an X-ray tube for an hour; Data on detector response, power and tube temperature were collected (20 kV / 187 μA)
- Current fluctuations are about 1 μA , but the expected influence of the Compton effect is still significant.

Важно отметить:
GEANT4 моделирование показало, что 80% потока гамма квантов 20KeV проходят насквозь сцинтиллятор, или перерассеиваются.
Потому, мы рассмотрели разные режимы работы трубки.

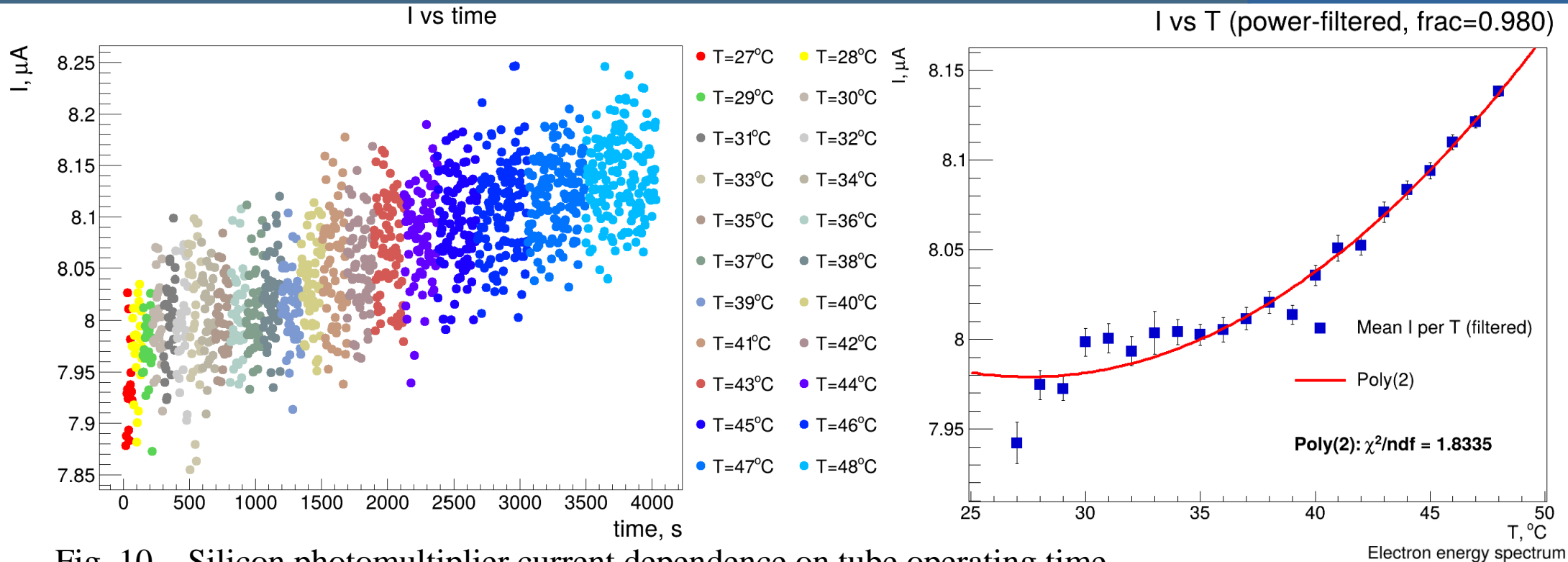


Fig. 10 – Silicon photomultiplier current dependence on tube operating time and temperature (15 kV / 200 μ A)

- One point of the scintillator was irradiated with an X-ray tube for an hour; Data on detector response, power and tube temperature were collected (15 kV / 200 μ A)
- Current fluctuations are under 0.5 μ A, but the greatest detector response is $\sim 9 \mu$ A (and about 1.5 μ A for 10 KeV).

