Диссертационный совет ОИЯИ.02.01.2024.П по физике частиц при Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина



Шитенков Михаил Олегович

Потоковая система сбора данных для кремниевой трековой системы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Специальность: 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Оппоненты: д. т.н. Эннс Виктор Иванович
к. ф.-м.н. Король Александр Аркадьевич

Руководитель: к. ф.-м. н. Мурин Юрий Андреевич

Список условных обозначений и сокращений

- **ASIC** – специализированная интегральная схема;
- **FPGA (ПЛИС)** – программируемая логическая интегральная схема;
- **STS-Xyter** – ASIC для чтения кремниевых микростриповых детекторов на 128 каналов;
- **FEB** – плата входной электроники детектора;
- **GBT-link** – высокоскоростная помехозащищенная последовательная линия передачи данных (ЦЕРН);
- **GBTxEmulator** – концентратор данных на базе ПЛИС с поддержкой GBT;
- **DPB** – устройство обработки данных на базе платы AFCK;
- **DAQ (ССД)** – система сбора данных.

Содержание

Введение

ГЛАВА 1. Модернизация кремниевой трековой системы эксперимента BM@N

ГЛАВА 2. Характеризация входной электроники считывания данных с кремниевых микростриповых детекторов

ГЛАВА 3. Создание программно-аппаратного комплекса на базе ПЛИС, предназначенного для эмуляции функционала радиационно стойких ИС линейки GBT

ГЛАВА 4. Устройство приема и обработки данных

ГЛАВА 5. Интеграция системы сбора данных КТС в центральную систему считывания и обработки данных установки BM@N

ГЛАВА 6. Испытания системы сбора данных кремниевой трековой системы с модулями CBM/BMN

Заключение

Актуальность работы

- Современные эксперименты физики высоких энергий нацелены на поиск редких событий. Данные исследования требуют огромной статистики, а полезные данные очень редки среди фоновых событий.
- Переход от классического триггерного считывания к потоковому сбору данных, осуществляемый во многих современных экспериментах, позволяет увеличить скорость набора данных и повысить эффективность отбора полезных событий.
- В ходе диссертации была создана потоковая система сбора данных, реализация которой применена для чтения данных с вершинной кремниевой плоскости эксперимента BM@N.

Цель работы

Цель работы состояла в разработке, создании и испытании системы сбора данных пилотной плоскости кремниевой трековой системы для установки BM@N, основанной на концепции потокового считывания данных.

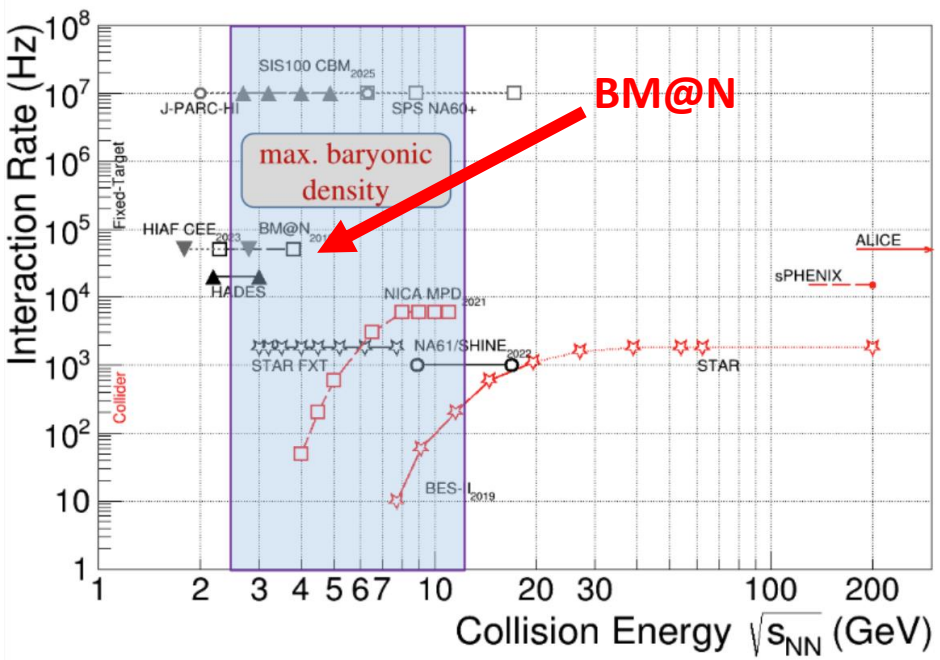
Требования

- Потоковое чтение;
- Поддержка протокола GBT;
- Координатное разрешение: не хуже 20 мкм;
- Количество каналов: > 12 000;
- Ожидаемые загрузки: 20 кГц/см^2 ;
- Максимальная частота триггера: 50 кГц;
- Отношение сигнал/шум: > 10.

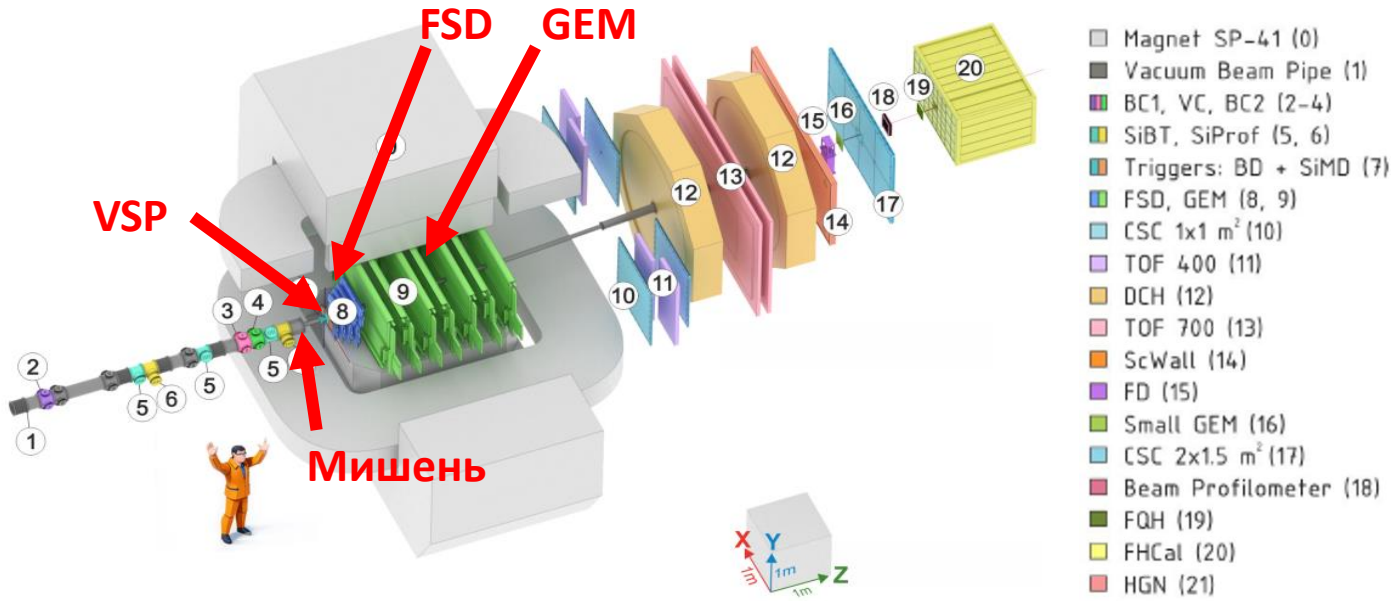
Решённые задачи

1. Создана и испытана входная потоковая электроника детекторов для сбора данных с кремниевых двухсторонних микростриповых сенсоров типа CBM/BMN с 2048 каналами на базе микросхем STS-XYTER.
2. Разработано устройство на базе ПЛИС, предназначенное для управления и концентрации данных с 48 ASIC STS-XYTER, совместимое с высокоскоростным помехозащищенным протоколом GBT.
3. Создан программно-аппаратный комплекс на базе ПЛИС для приема/передачи данных по протоколу GBT со скоростью 3,68 Гбит/с с последующей обработкой потока данных.
4. Разработан метод для интеграции потоковой входной электроники пилотной плоскости и пособытийно-триггерной системы сбора данных установки BM@N при частоте триггера до 78 кГц.

Эксперимент BM@N



Сравнение проектных частот регистрируемых взаимодействий в существующих и планируемых экспериментах

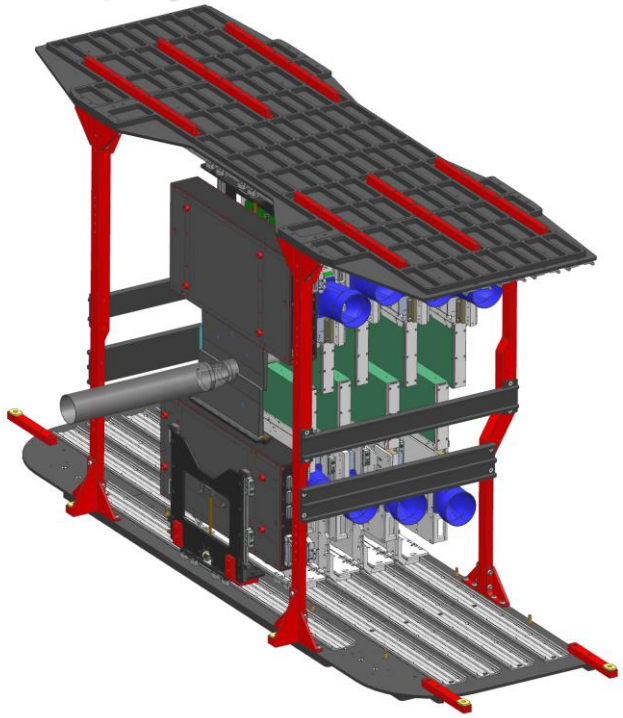


Конфигурация эксперимента BM@N

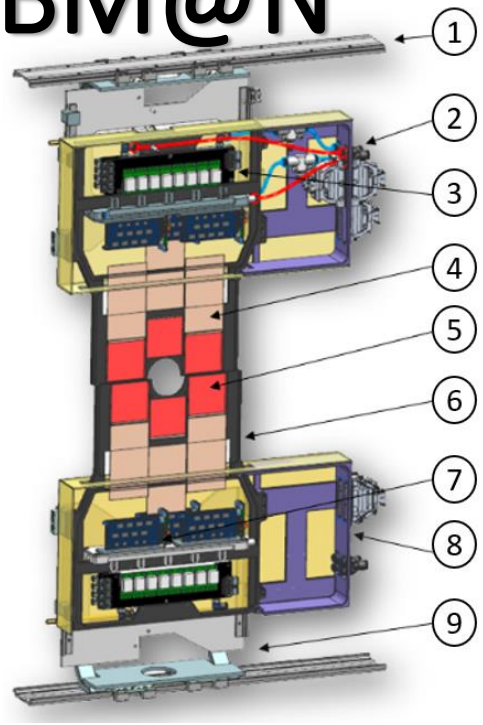
- Основной целью проекта BM@N является поиск эффектов предполагаемого сжатия ядерной материи в файерболе, образующемся при центральных столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий от 1,5 до 5 ГэВ/нуклон.
- Один из ключевых наблюдаемых признаков: подпороговое Λ^0 и Ξ^- рождение гиперонов.

*Zinchenko A., Kapishin M., Kireyeu V., *и др.* A Monte Carlo Study of Hyperon Production with the MPD and BM@N Experiments at NICA // Particles. 2023. Т. 6, № 2. С. 485–496. https://doi.org/10.3390/particles6020027.

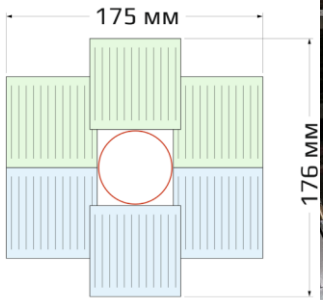
Вершинная кремниевая трековая плоскость (VSP) установки BM@N



Вершинная плоскость + Forward Silicon Detector



Конструкция плоскости



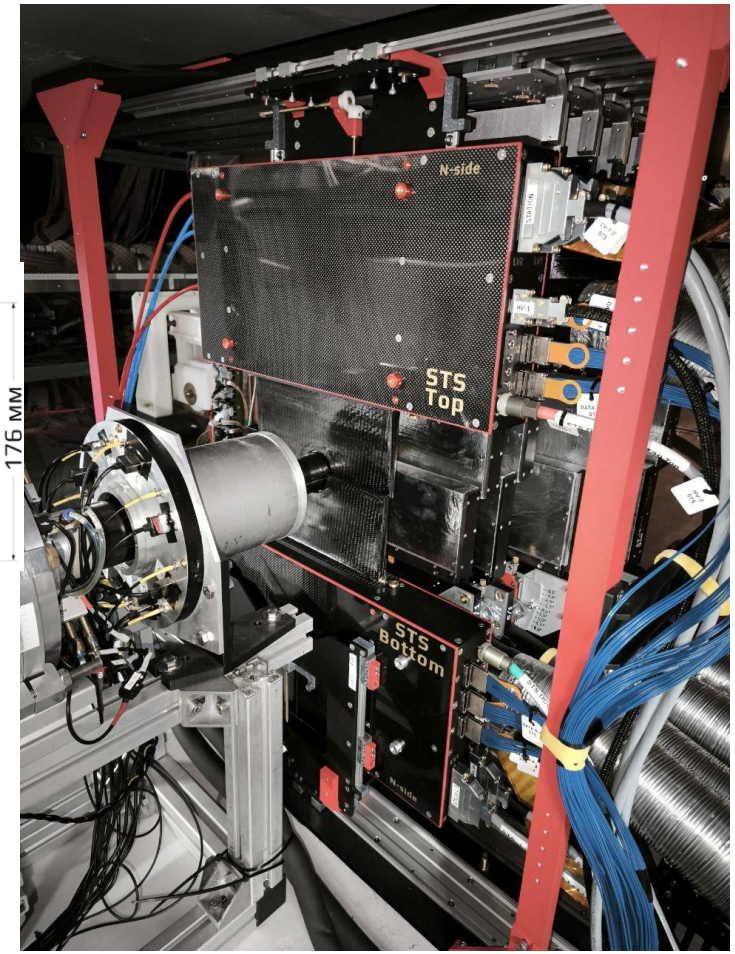


Фото трековой плоскости

1 – направляющая; 2 – водяная система охлаждения; 3 – платы питания РОВ; 4 – сигнальные микрокабели; 5 – микростриповые кремниевые детекторы; 6 – силовой каркас; 7 – платы детекторной электроники; 8 – панель с разъемами; 9 – система линейного перемещения.

Дизайн разработан Д. Андреевым и А. Шереметьевым

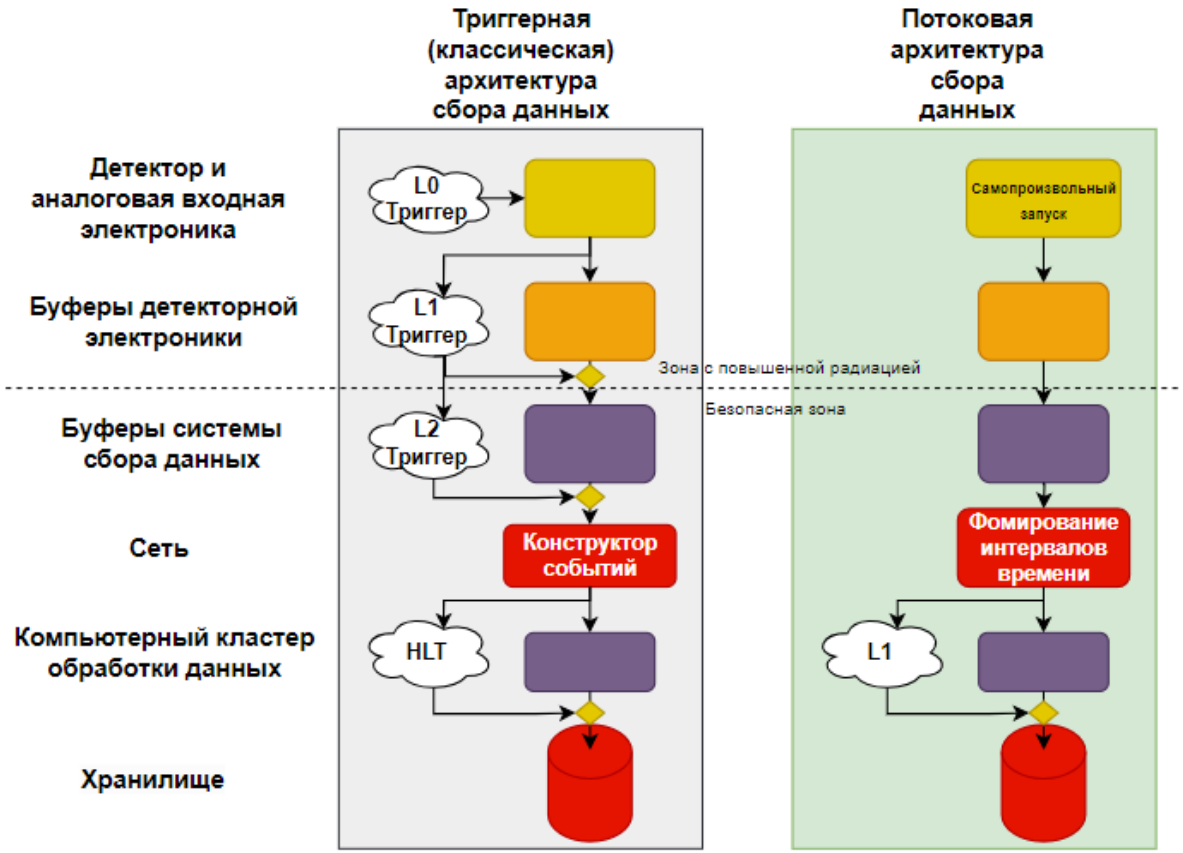
Потоковое считывание

Преимущества потокового считывания:

- Высокая эффективность регистрации при высоких интенсивностях;
- Динамическая настройка параметров эксперимента;
- Отсутствие внешнего триггера;
- Мертвое время отсутствует или минимизировано;
- Упрощение анализа благодаря наличию временной метки попаданий.

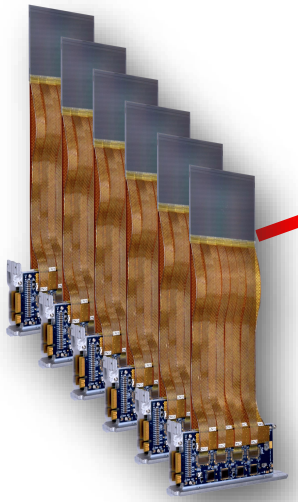
Сложности реализации потокового чтения:

- Требуется глобальная распределенная система синхронизации тактовых сигналов;
- Более высокая чувствительность к шуму по сравнению с триггерным чтением;
- Более высокое энергопотребление по сравнению с триггерным чтением;
- Онлайн-реконструкция событий для фильтрации потока;
- Система регулирования переполнения буферов данных.



Сравнение триггерной (классической) и потоковой архитектуры построение систем сбора данных

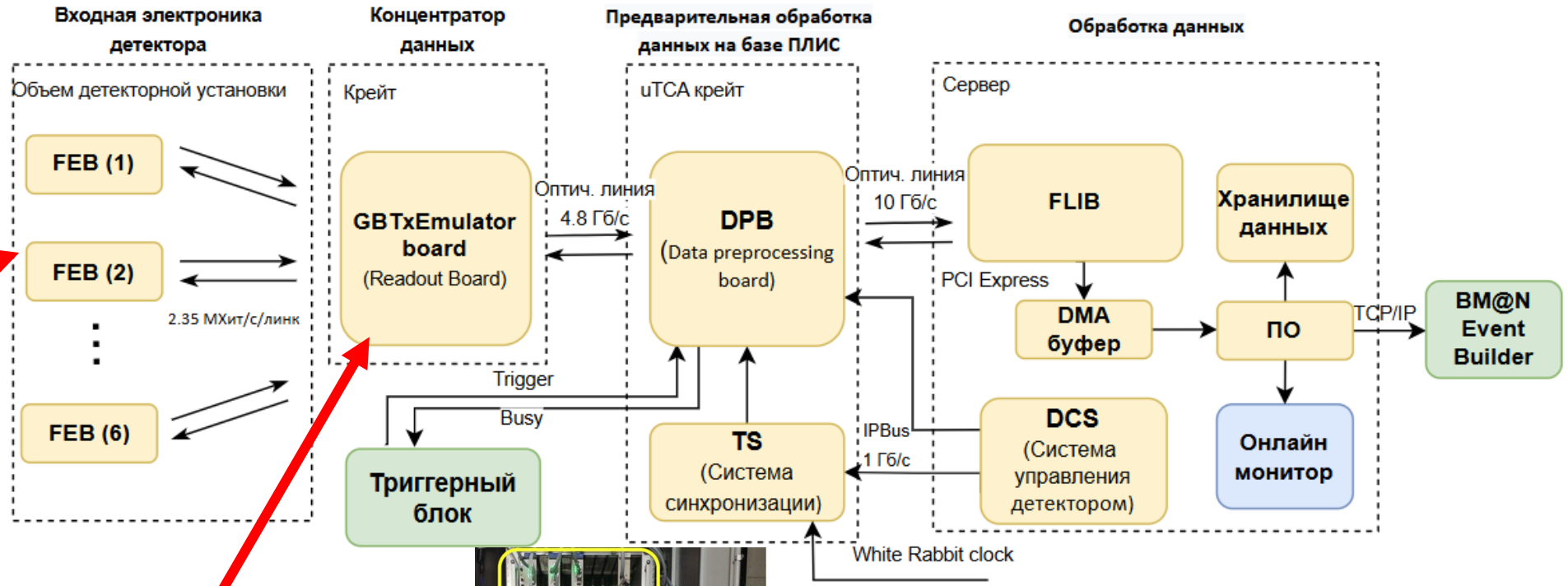
Система сбора данных (DAQ)

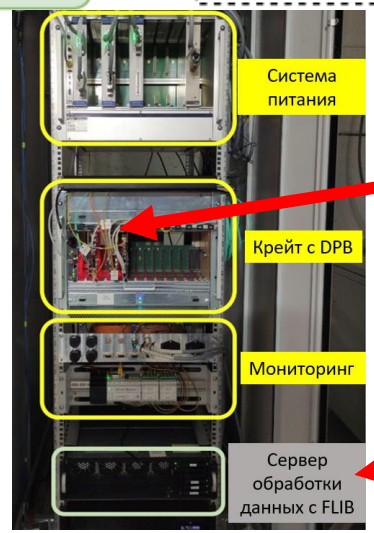


Модуль CBM/BMN



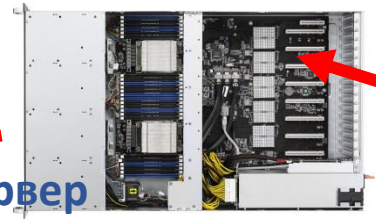
GBTxEmulator







AFCK (Data Processing Board)

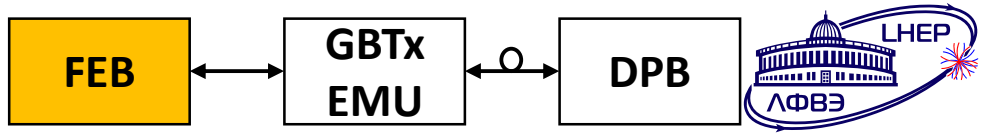


Сервер



FLIB

Модуль типа CBM/BMN



- Пространственное разрешение < 17 мкм;
- 14-bit TDC с разрешением < 12,5 нс;

Платы детекторной электроники 2x FEB-8

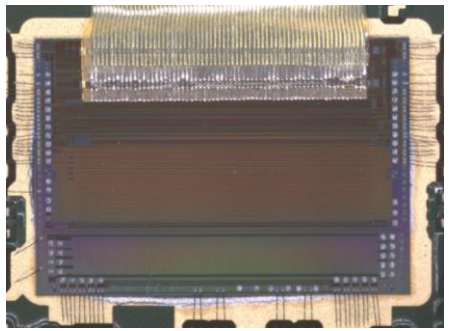
Многослойные микро-кабели

Детектор



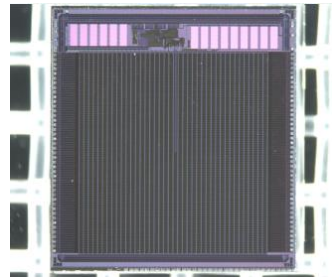
Модуль типа CBM/BM@N

x8



STS-XYTER

x4

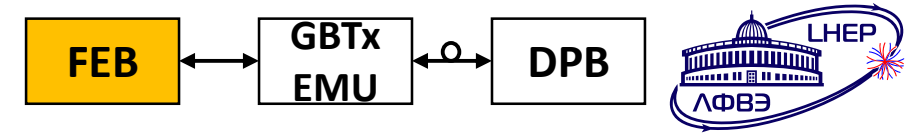


Линейный стабилизатор (ASIC)

- Кремниевые двухсторонние;
- Толщина 300 мкм;
- 1024 каналов с 58 мкм шагом;
- Стерео угол 7.5°;
- Размер: 62×62 мм.

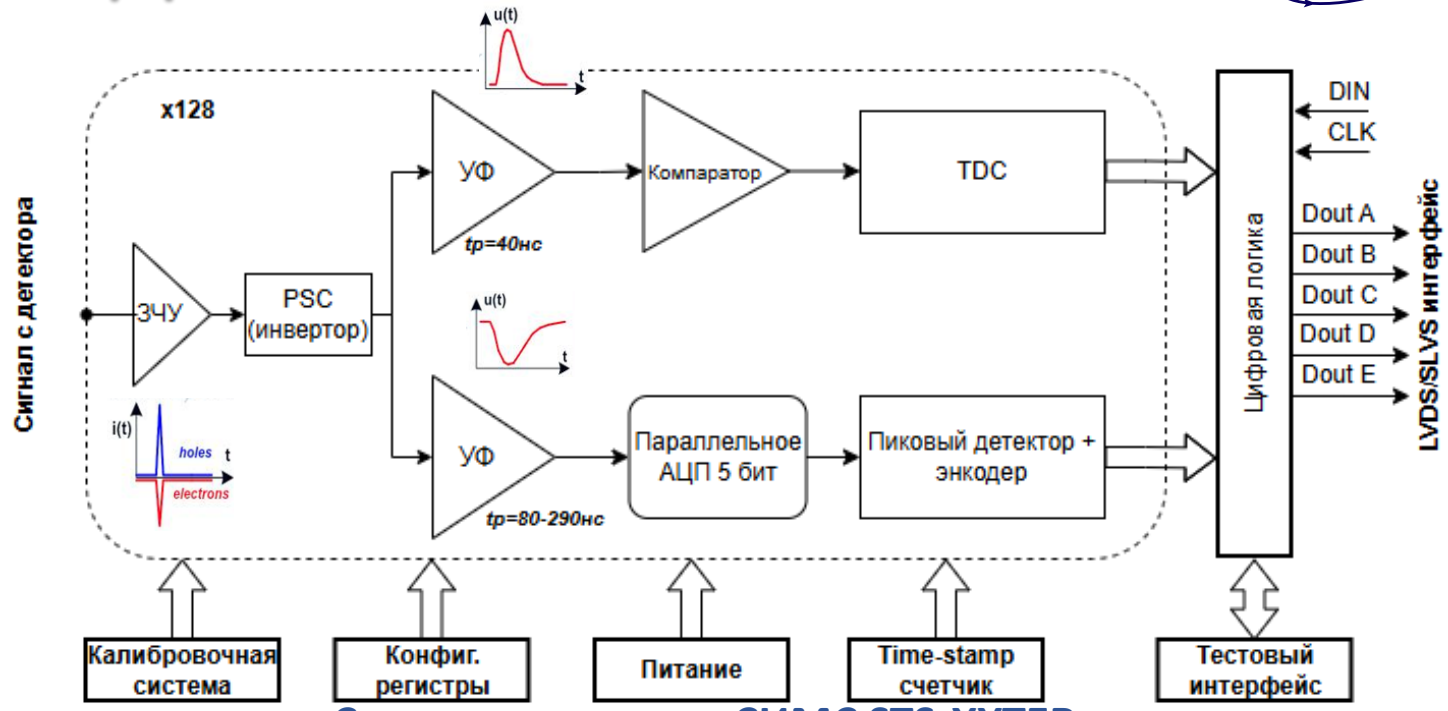
- 8 ASIC STS-XYTER на FEB-8;
- Размер: 87*40*3 мм;
- AC-coupled LVDS каналы (80 Мбит/сек);
- Разварка проволокой кристаллов на плату;
- Ультразвуковая сварка кабелей на ASIC и на сенсор;
- Энерговыделение: 12 Вт на FEB;
- Плавающая земля (HV).

Входная электроника детектора



Особенности ASIC STS-XYTER v.2.2*

- Потоковый режим работы;
- 128 каналов;
- Индивидуально измеряется в каждом канале:
  - Измерение энергии - 5-бит АЦП;
  - Измерение времени сигнала - < 12 нс
- Техпроцесс UMC CMOS 180 нм;
- Бескорпусное исполнение;
- Динамический диапазон – до 15 фКл (тип. сигнал – 3.6 фКл);
- 5 bit ADC, TDC < 10 нс;
- Низкий шум: <1500 ENC в сборке (0,15 фКл);
- HCTSP протокол.

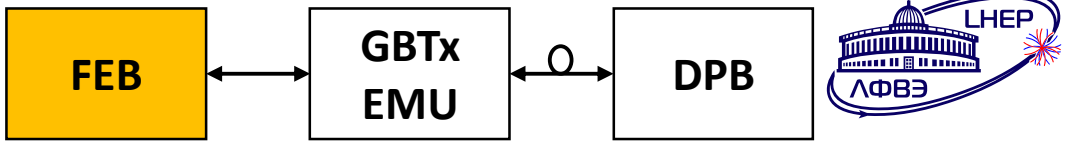


Структурная схема СИМС STS-XYTER



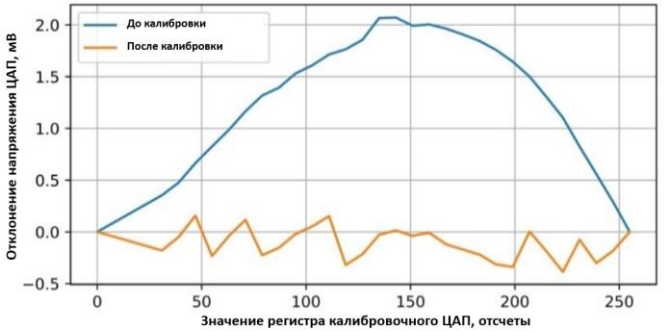
** разработан*
K.Kasinski и др., AGH (Краков)
для коллаборации CBM и BM@N

Характеризация STS-XYTER

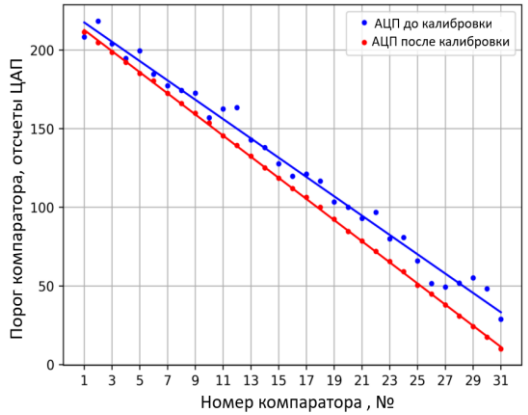


Ключевые результаты:

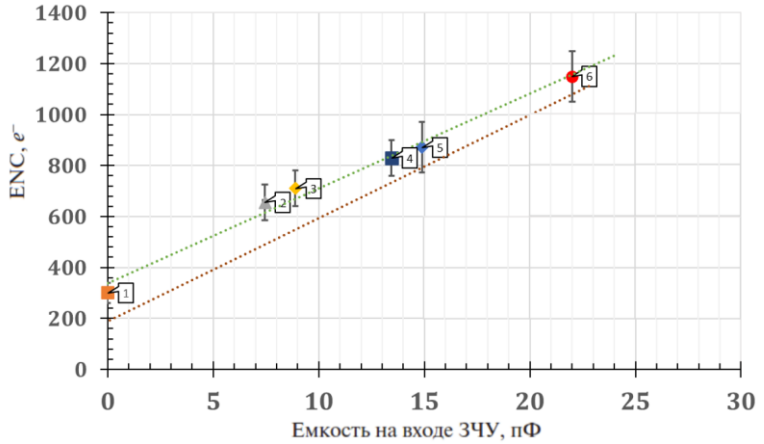
- Исследованы параметры встроенного генератора STS-XYTER;
- Разработка алгоритма калибровки внутриканальных АЦП и быстрого дискриминатора;
- Подобраны оптимальные параметры конфигурации;
- Выявлены неисправности в аналоговой и цифровой части STS-XYTER, исправленные в следующей версии микросхемы;
- Создано ПО для управления и диагностики;
- Исследованы и оптимизированы шумовые характеристики собранных модулей



Компенсация нелинейности встроенного генератора

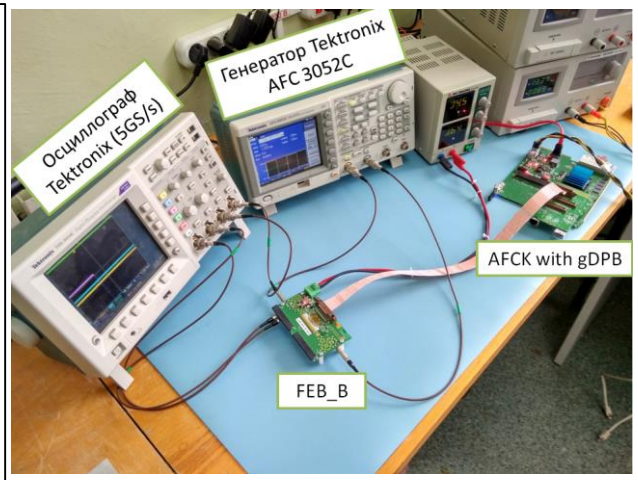


Калибровка АЦП

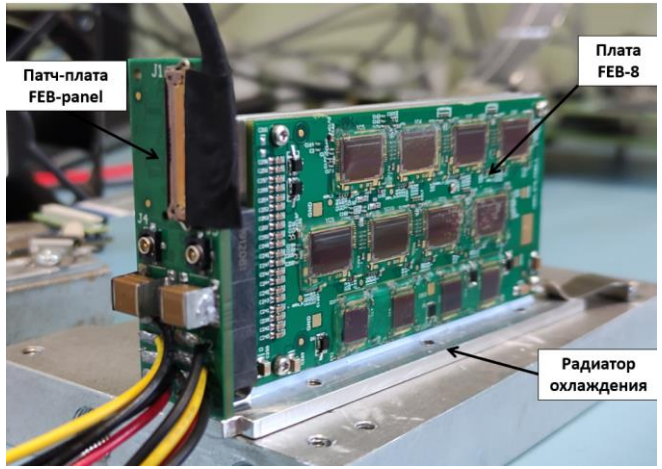


1 – собственный шум STS-XYTER;
2 – длина стрипа 20 мм, длина кабелей 117 мм;
3 – длина стрипа 20 мм, длина кабелей 155 мм;
4 – длина стрипа 60 мм, длина кабелей 117 мм;
5 – длина стрипа 60 мм, длина кабелей 155 мм;
6 – длина стрипа 60 мм, длина кабелей 410 мм;
····· – теоретическая оценка уровня шума

Усредненный уровень шума в каналах модуля для его различных конфигураций

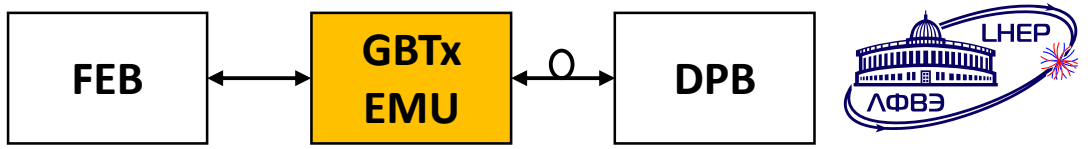


Стенд для тестирования STS-XYTER



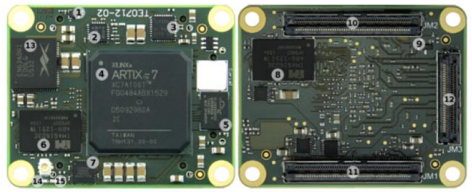
Фотография платы FEB-8 без сенсора с FEB-panel

GBTxEmulator

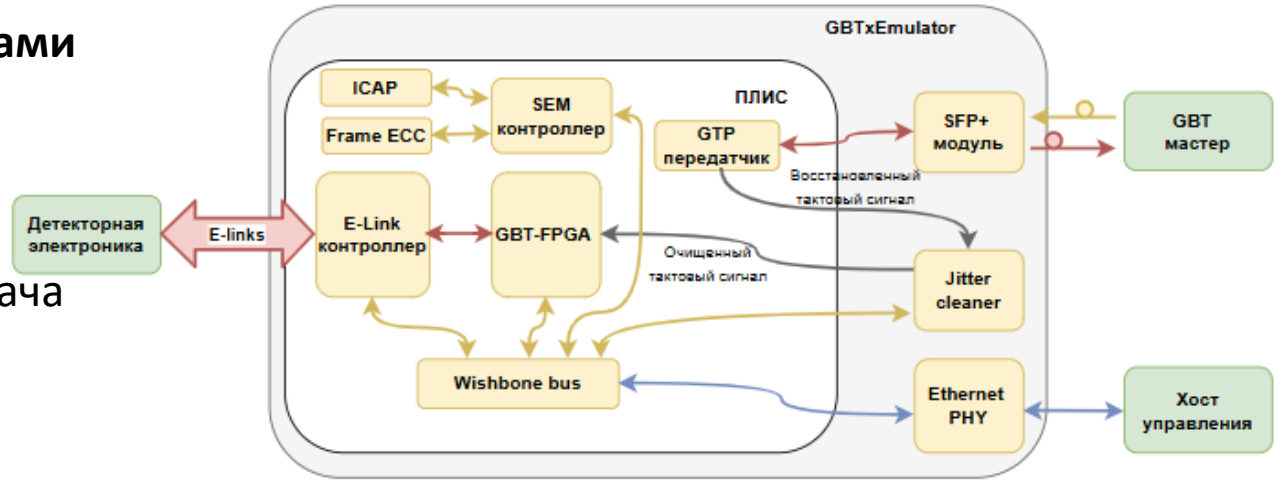


Интерфейс связи между электроникой детектора и платами обработки данных.
Особенности:

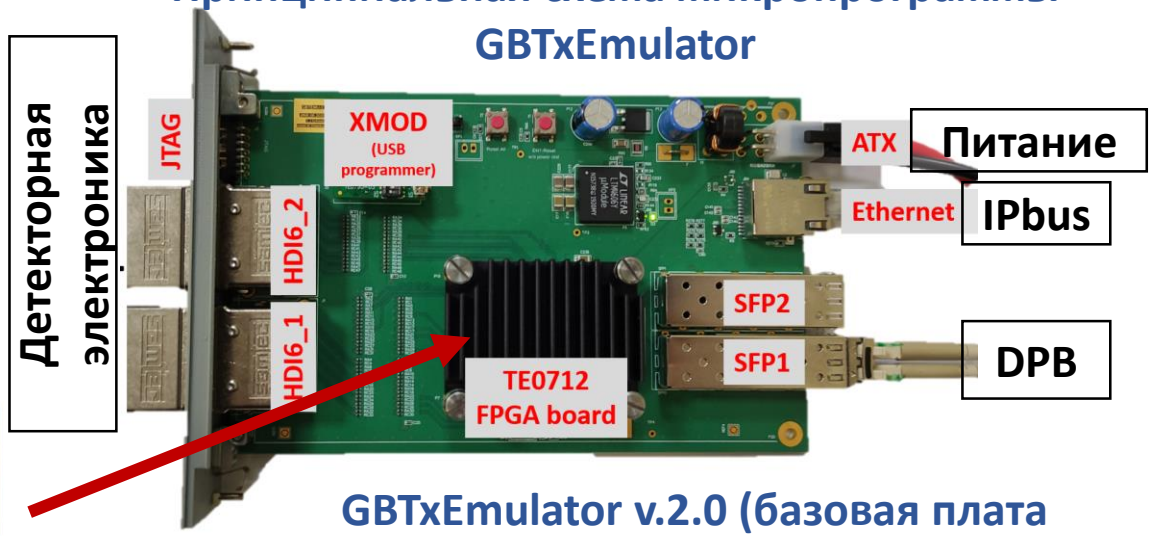
- Обеспечивает функциональность СИС GBTx;
  - Быстрая детерминированная по времени передача команд управления по нисходящей линии;
  - Скоростная передача данных о событиях с детекторной электроники;
- Платформа: Trenz TE0712-02-100-2C от Xilinx;
- 4.8 Гб/с оптическая линия связи с DPB;
- Интерфейс управления: IPbus через 100 Мб/с Ethernet;
- Интерфейс E-Link :
  - 48 E-Links с скоростью передачи 80 Мб/с ;
  - 6 тактовых выходов 40 МГц;
  - 6 нисходящих линий управления.
- Single Event Upset (SEU) исправление и мониторинг.



Trenz TE0712-02-100-2C

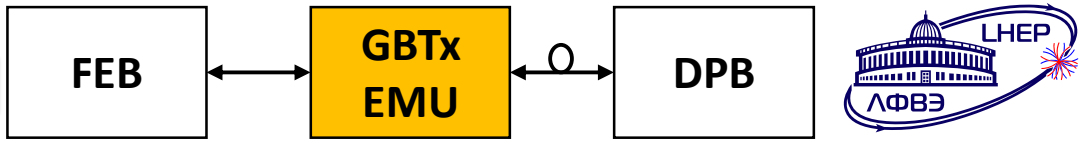


Принципиальная схема микропрограммы GBTxEmulator



GBTxEmulator v.2.0 (базовая плата формата 3U)

Радиационные испытания



- Проведены испытания работы платы **GBTxEmulator** на базе ПЛИС на пучке протонов 1 ГэВ;
- Подтверждена работоспособность платы с существующей логической структурой в среде BM@N;
- Artix-7 XC7A200T вероятность SEU – (3,94 ± 2) E-15 см²/бит (протоны 1 ГэВ).
- Среднее время SEU – 8 ч (мягкое подавление), среднее время MBU – 126 ч (перезагрузка системы);
- SEU (single event upset) – 95% (восстанавливается с помощью реализованной логики);
- MBU (multibit event upset) – 5% (только обнаружение и перезагрузка);
- GBTxEmulator полностью работоспособен ($TID_{collect}$ >> 30 раз >> $TID_{BM@n}$); Безопасная доза (< 5 кРад);

- За время испытаний зарегистрировано: **2666** SEU; **126** MBU;
- Суммарный поток – **$5,7*10^{10}$** протонов;
- TID – **1,18 кРад.**

SEU Cross Section: (3,9 ± 2) E-15 см²/бит
MBU Cross Section: (2,5 ± 1.3) E-16 см²/бит

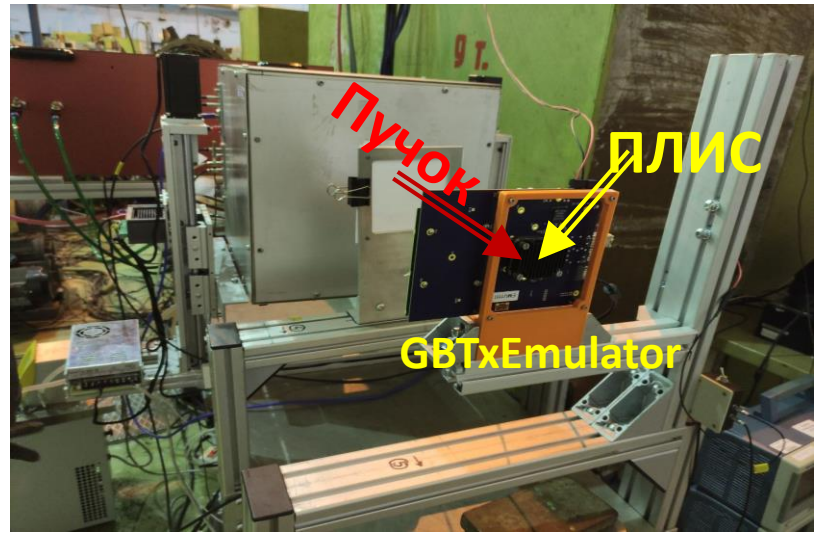
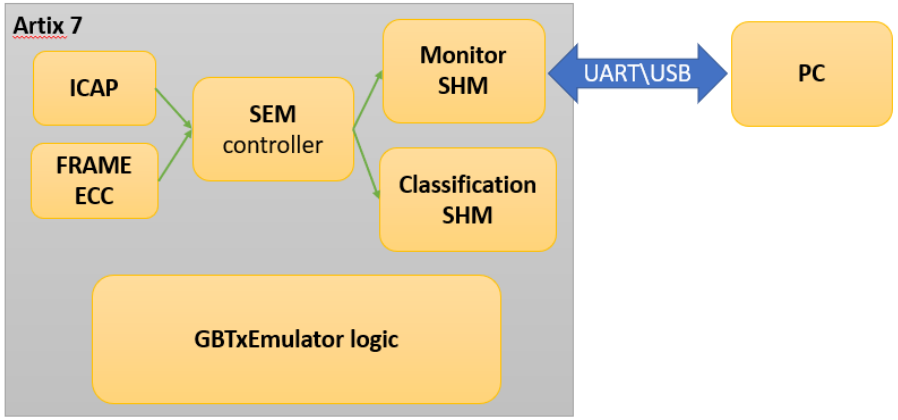
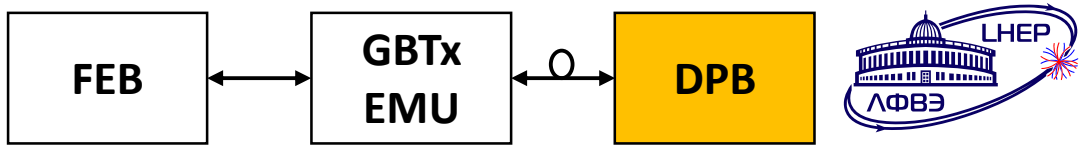


Фото стенда при пучковых испытаниях



Блок схема логического блока для подавления SEU

DPB и FLIB



Data Processing Board (DPB)



Фото устройства DPB на базе AFCK

- Прием данных с GBTxEmulator
- Сортировка данных
- Управление входной электроникой
- Формирование пакетов – «временных срезов»
- Синхронизация входной электроники
- Обработка триггерного сигнала

First-Level Event Selector (FLES) Interface Board (FLIB)

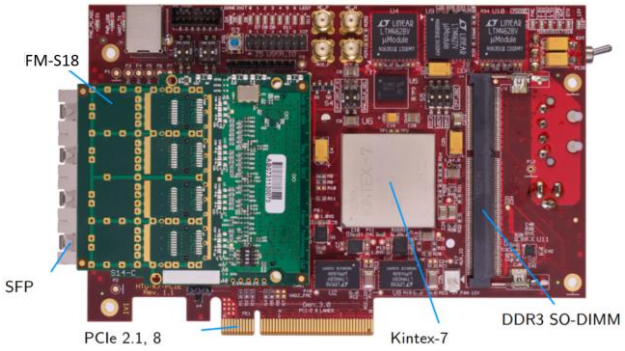
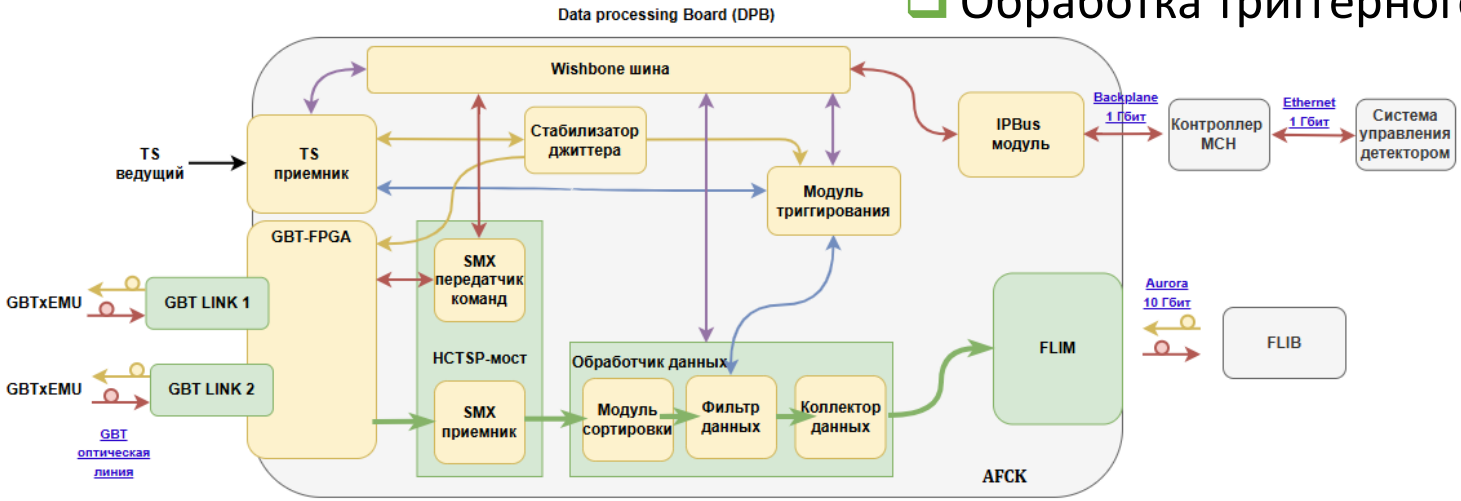
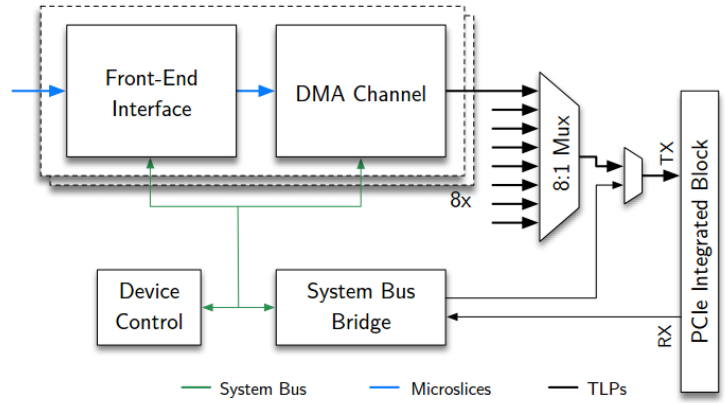


Фото устройства FLIB на базе коммерческой платы HTG-K700



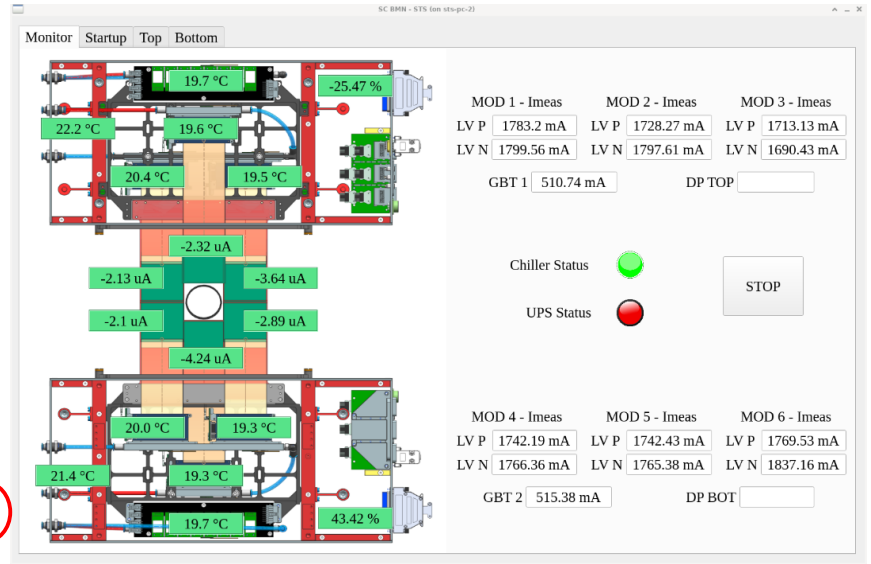
Блок-схема логической структуры устройства приема и обработки данных DPB

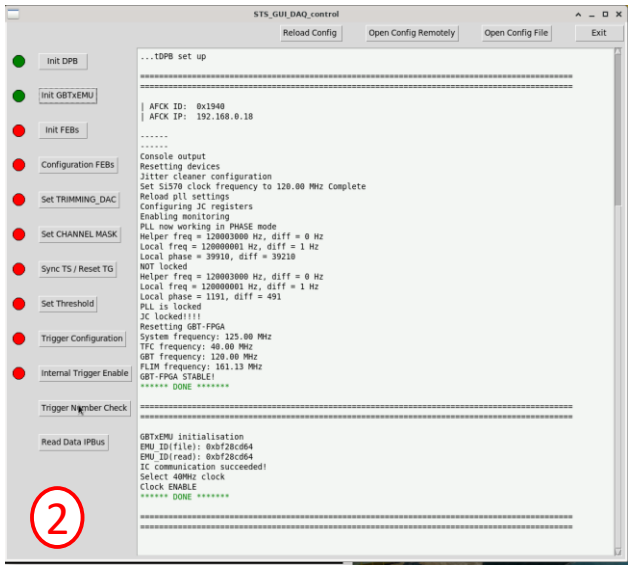


Блок-схема логической структуры FLIB

Интеграция системы сбора данных в DAQ BM@N

- Интеграция данных в глобальную систему сбора данных BM@N
- Синхронизации системы сбора данных с сетью White Rabbit (WR)
- Интеграция входной потоковой считывающей электроники вершинной плоскости с триггерной системой сбора данных BM@N
- Система контроля и управления системой сбора данных

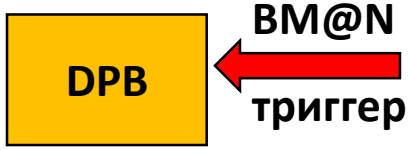




1 **Интерфейс мониторирования параметров системы**

2 **Интерфейс управления ССД**

Реализация триггерного режима



- Входная электроника детекторов работает только в потоков режиме.
- Фильтрация потока данных на основе триггера реализована на устройстве обработки данных DPB.
- Триггерная мода интегрирована на уровне сортировщика данных на DPB.
- Сортировщик накапливает данные (до 96 мкс) и дает возможность реализовать фильтрацию данных.
- Параметры триггера:
  - Задержка триггера <= 7 мкс;
  - Частота триггера <= 78 кГц;
  - Шаг установки окна триггера – 12.5 нс.

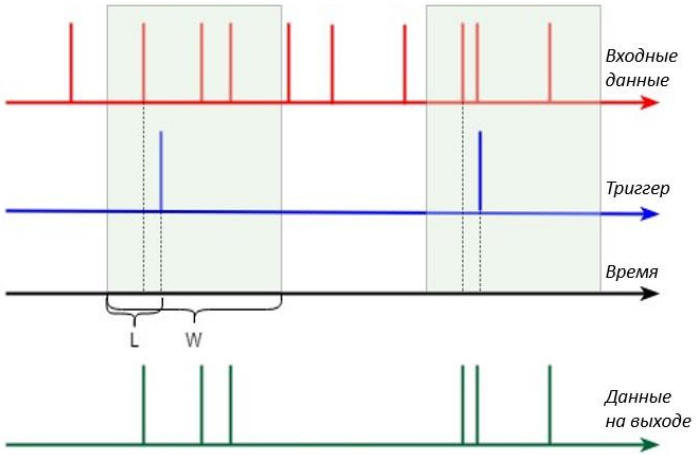
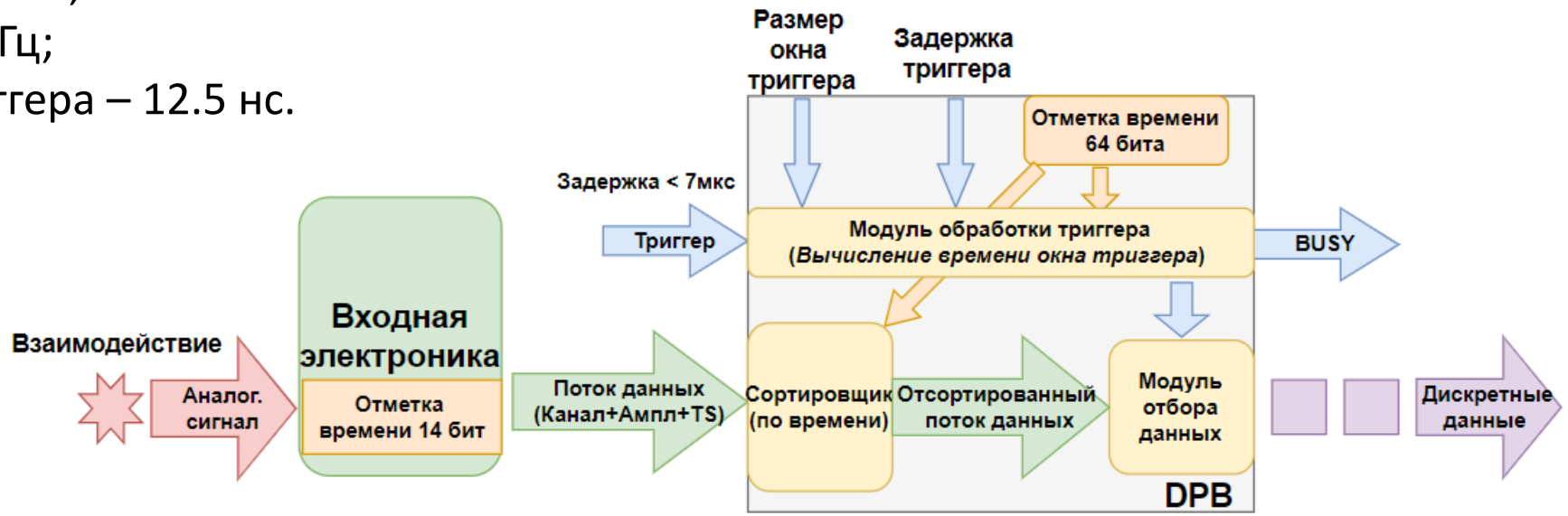


Диаграмма потока данных



Блок схема реализации триггерного режима работы

Испытания системы сбора данных и её компонентов

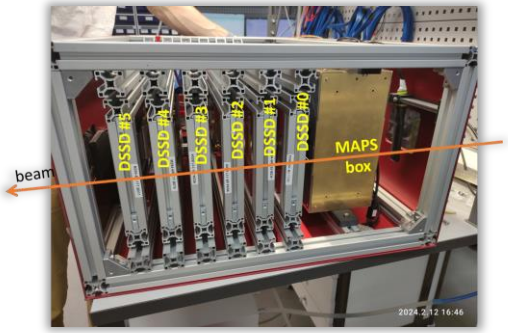
- Лабораторные испытания компонентов входной электроники и собранных модулей на лабораторных стендах с радиоактивными источниками, оптическим лазером и тестовым генератором;
- Процедура сертификации собранных модулей;
- Испытания прототипа системы сбора данных в потоковом режиме на ускорителе электронов ЛИНАК-200;
- Испытание системы сбора данных на синхроциклотроне СЦ-1000 в ПИЯФ;
- Пусконаладочные работы по интеграции пилотной вершинной плоскости кремниевой трековой системы эксперимента BM@N.

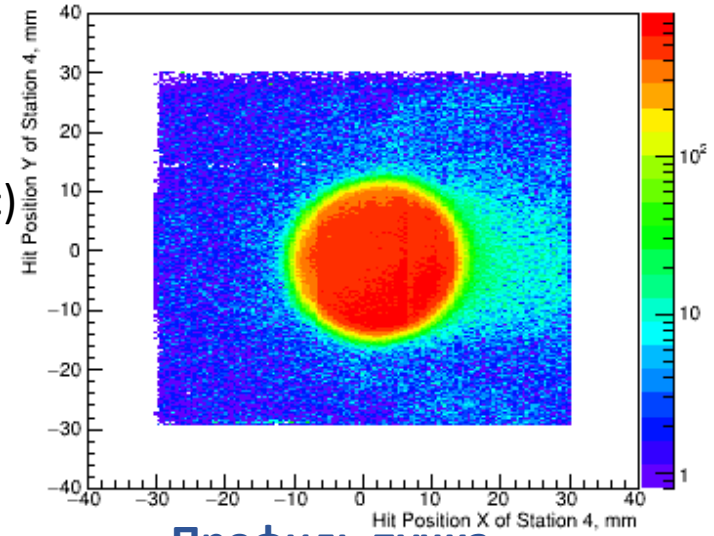
Пучковые испытания системы сбора данных в ПИЯФ (Гатчина)

Пучковый телескоп:

- 3 слоя MAPS;
- 6 модулей типа CBM/BM@N;
- 2 сцинтиллятора (триггер).

- Испытания на пучке протонов 1 ГэВ
- 72 часа набора данных
- Интенсивность пучка: 10^4 – $5 \cdot 10^5$ протонов/(см²·с)





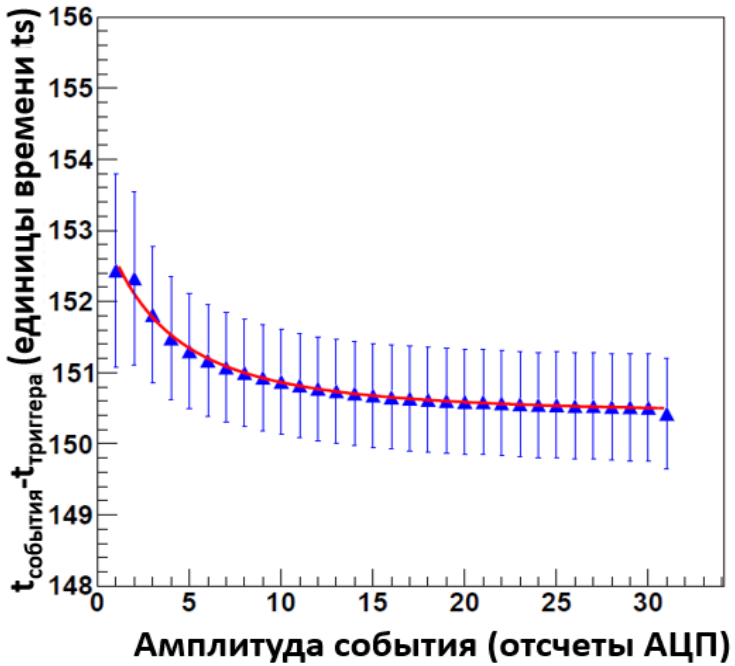
Профиль пучка

Результаты испытаний:

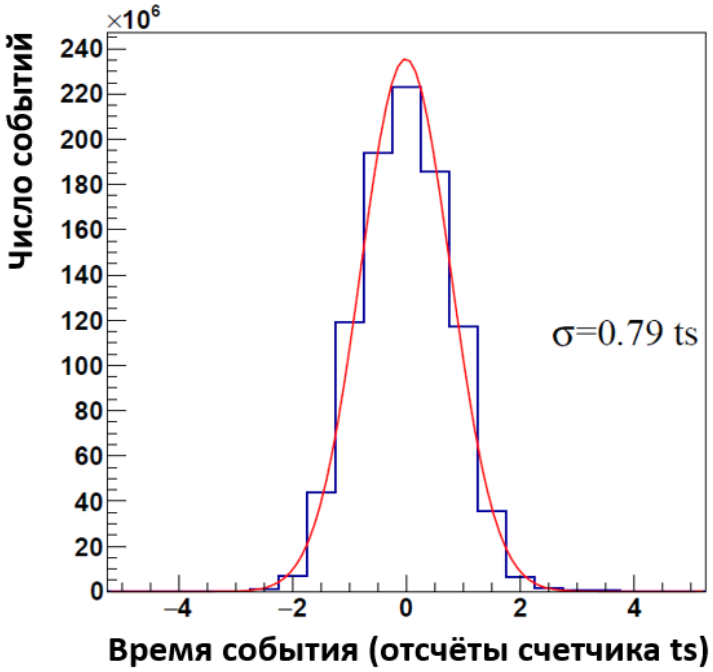
1. Набор данных с двух подсистем(MAPS & DSSD) с построением треков с двух подсистем;
2. Подтверждение возможности работы потоковой системы сбора данных в триггерном режиме;
3. Измерены следующие параметры трековых модулей:
   - Отношение сигнал/шум: >21;
   - Пространственное разрешение: 15.4 мкм ±0.4 мкм;
   - Временное разрешение: σ = 0.79 ts (9.9 нс);
4. Оценка пропускной способности.

Временное разрешение

$$\sigma_{tot} = \sigma_{Jitter} \oplus \sigma_{TDC} \oplus \sigma_{Time\ Walk}$$

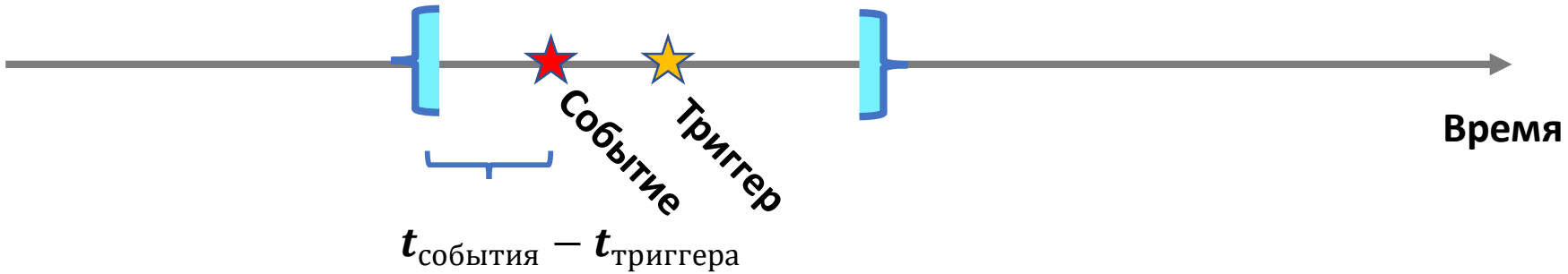


Коррекция зависимости времени формирования сигнала от амплитуды

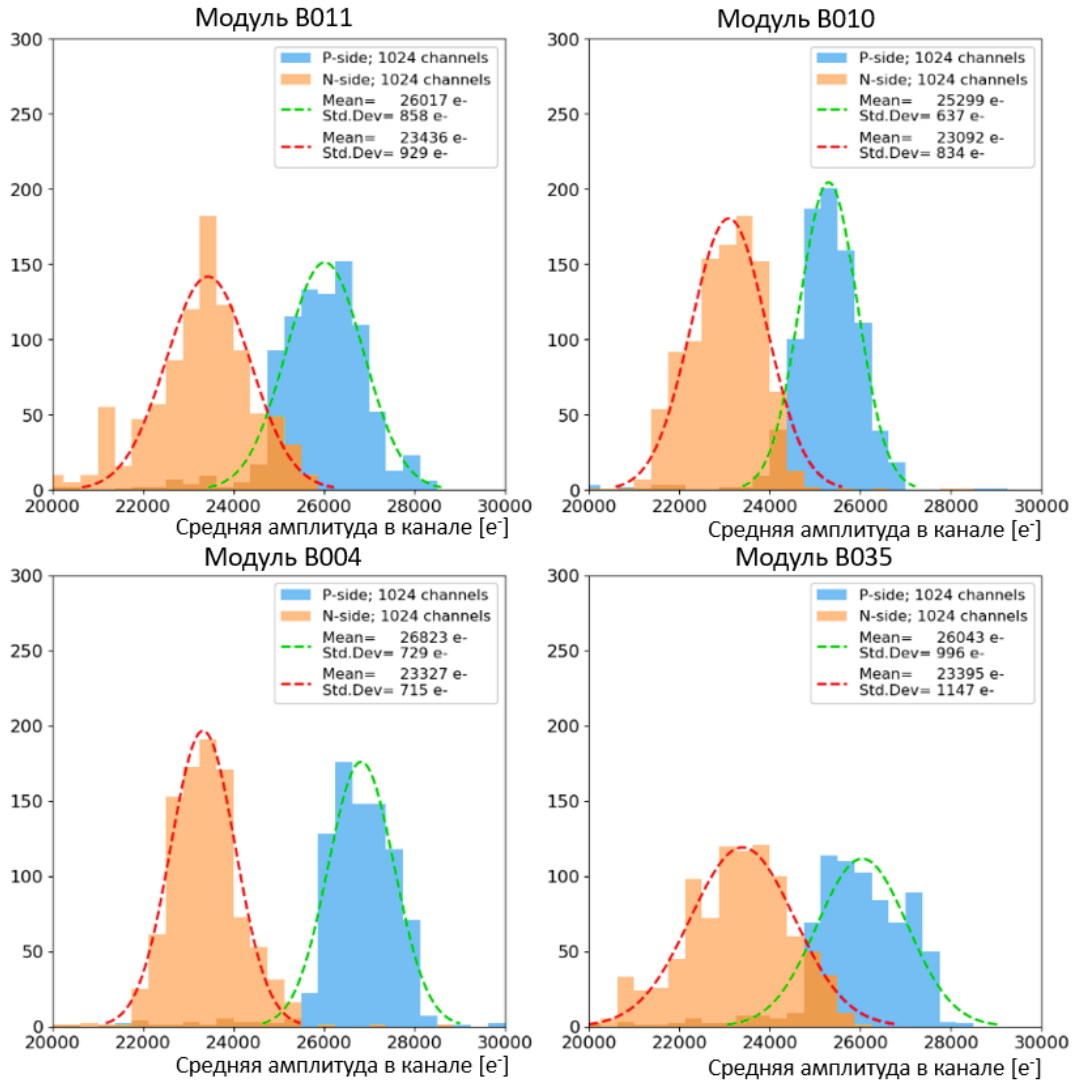


Временное разрешение

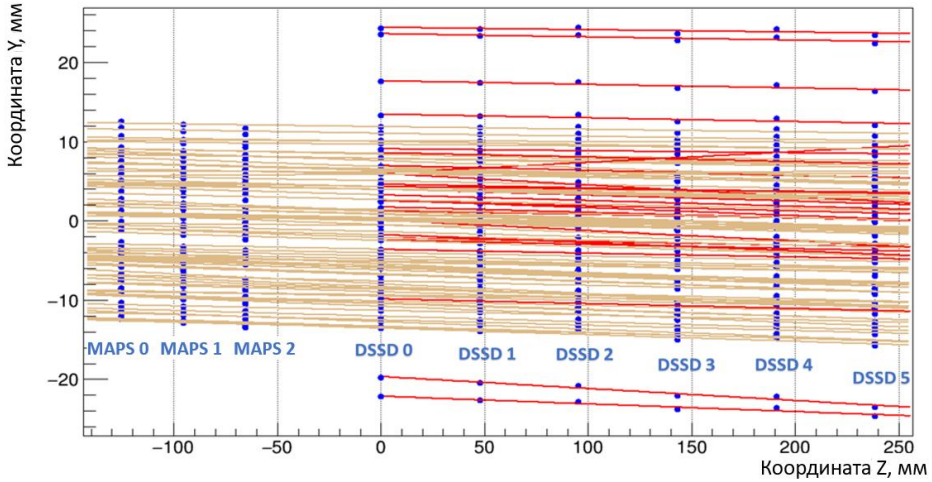
$\sigma_{tot} = 9.9$ нс



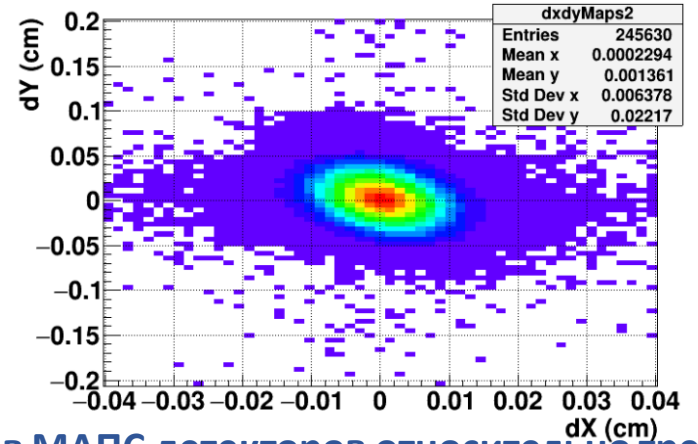
Результаты пучковых испытаний



Распределение амплитуды сигнала от протонов 1 ГэВ



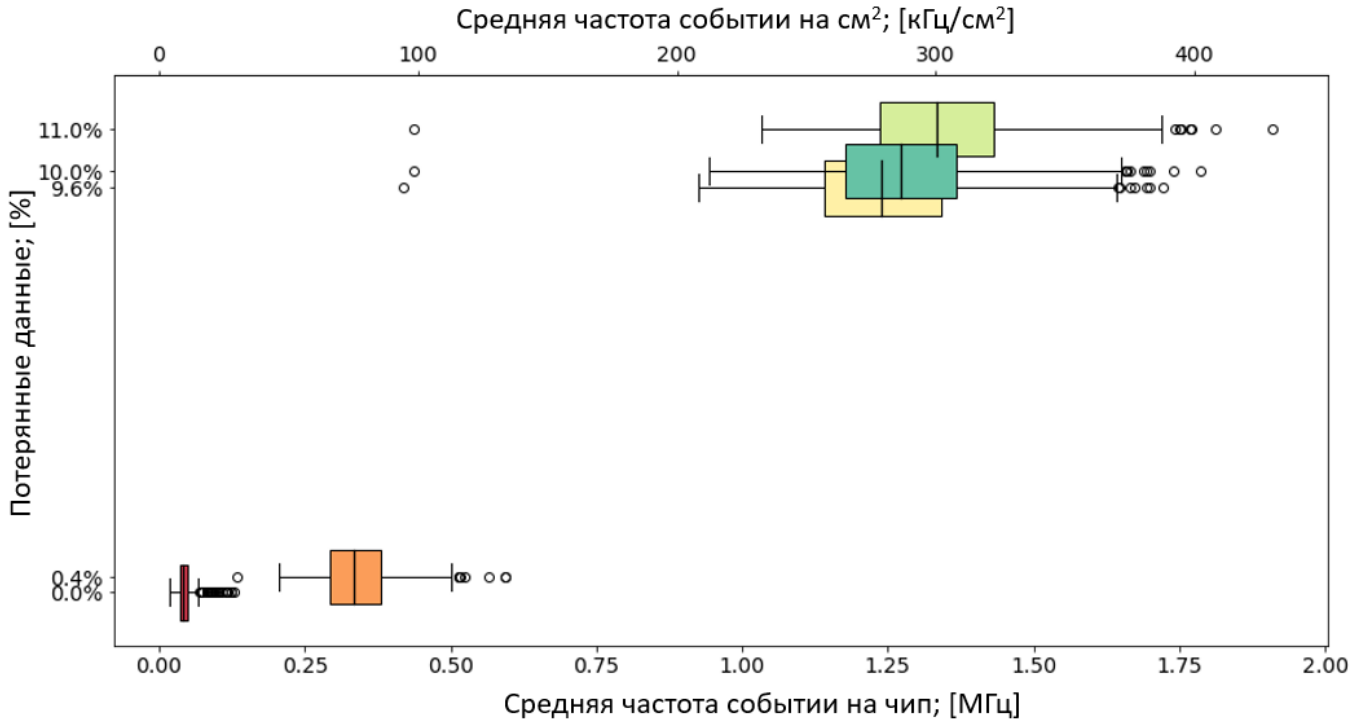
Двумерные восстановленные треки частиц, желтые – проходящие через все плоскость, красные – только через микростриповые детекторы



Невязка треков МАПС детекторов относительно треков с модулей типа CBM/BMN в эксперименте с протонами 1ГэВ

Пропускная способность ССД

- F_{ASIC}= 2.4 МХит × $с^{-1}$ (18.7 кХит × $с^{-1}$ / канал).
- $F_{Detector} = F_{ASIC}/4.4$ = 545 кХит/$см^2$
- F_{GBT}= 3.84 Гб × $с^{-1}$ (115.2 МХит × $с^{-1}$ / линк).
- Мертвое время канала≈ 700 нс (Аналоговая часть)
- Требования BM@N: 19.2 кХит × $с^{-1}$ / ASIC

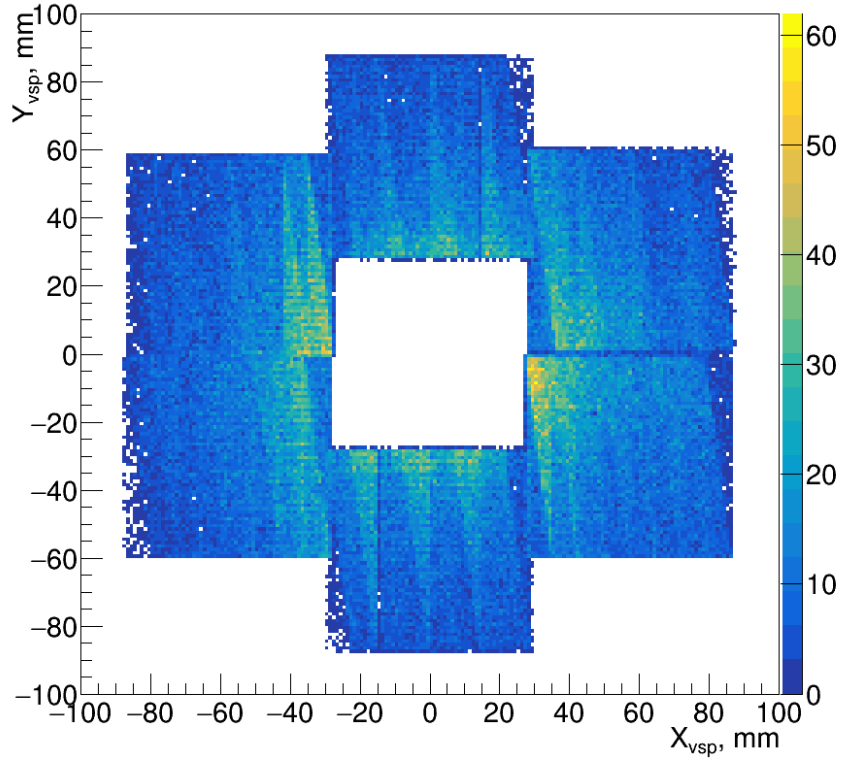


Зависимость доли потерянных данных от загрузки STS-XYTER

*D. Dementev, A. Sheremetev, M. Shitenkov, V. Leontiev, I. Rufanov, Yu. Murin, «**Characterization of Tracking Modules Based on DSSD Sensors at the SC-1000 Accelerator for the BM@N Project**» // Physics of Particles and Nuclei Letters, 4, 21, 919 – 927, 2024. https://doi.org/10.1134/S1547477124701000*

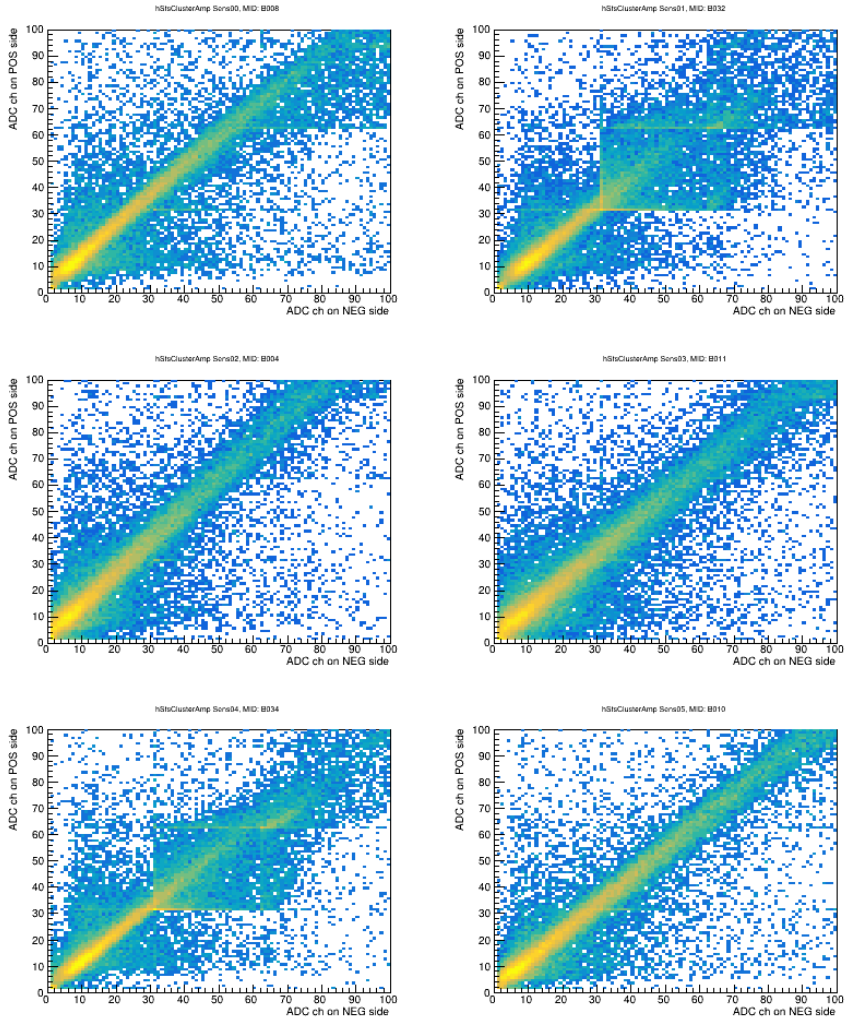
Вершинная плоскость BM@N (Run 9)

- ✓ Успешная интеграция с DAQ BM@N;
- ✓ Набор в триггерном режиме до 25 кГц;
- ✓ Физические данные обрабатываются.



Распределение хитов на вершинной плоскости (VSP) в Run 9 при пучке Xe 2.2 ГэВ

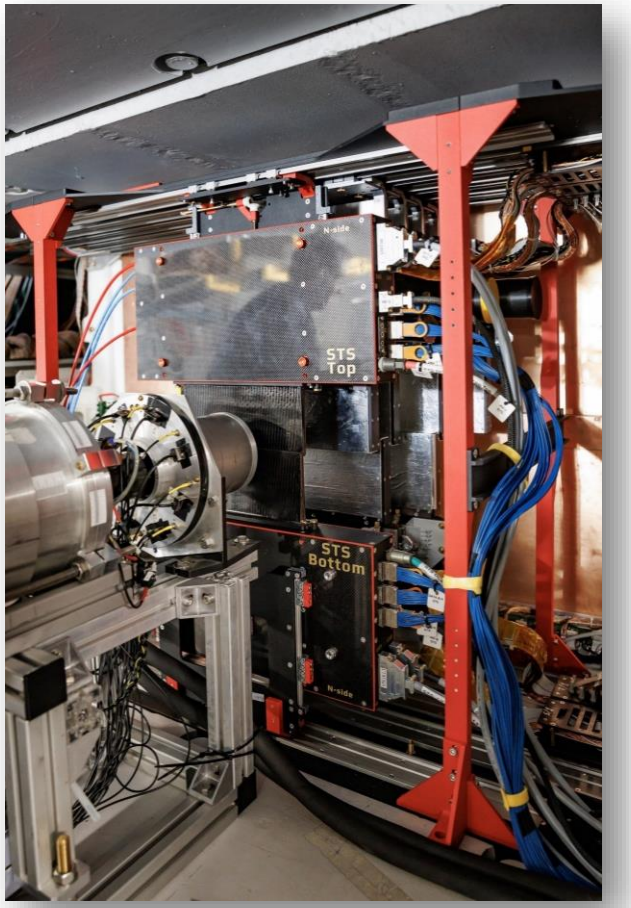
02.2026 – 03.2026



Отношение амплитуды хитов на P и N сторонах детекторов на вершинной плоскости (VSP) в Run 9 при пучке Xe 2.2 ГэВ

Заключение

- Разработан проект системы потокового сбора данных (ССД) для чтения данных с кремниевых микростриповых модулей типа CBM/BMN.
- Разработана потоковая входная электроника для считывания данных **2048** каналов трековых модулей типа CBM/BMN с максимальной загрузкой детектора **545 кГц/см²**, созданная на базе ASIC STS-XYTER.
- Создан программно-аппаратный комплекс, состоящий из о устройств GBTxEmulator, DPB (Data Processing Board) и FLIB и системы управления, с возможностью пособытийного выделения данных из потока по внешнему триггерному сигналу с максимальной частотой в **78 кГц**.
- Получены результаты испытаний ССД на созданных лабораторных стендах и пучках ускоренных частиц, подтверждающие достижение всех заявленных характеристик.



Положения выносимые на защиту

1. Проект потоковой системы сбора данных с модулей CBM/BMN.
2. Результаты тестирования на этапах разработки, методы оптимизации параметров и алгоритмы аппаратной калибровки микросхемы STS-XYTER.
3. Разработанный программно-аппаратный комплекс на базе ПЛИС, совместимый с протоколом GBT. Данный комплекс позволяет:
   - принимать данные с **48** STS-XYTER по дифференциальным линиям со скоростью **80 Мбит/с** и концентрировать их на линию связи GBT со скоростью **3,68 Гбит/с**, сортировать данные с двух таких каналов связи и передавать его на входные узлы вычислительного кластера;
   - осуществлять временную синхронизацию входной электроники в диапазоне **± 10 нс**;
   - обеспечивать контроль и управление входной электроникой;
4. Метод интеграции потоковой системы чтения с пособытийно-триггерной ССД, позволяющий на уровне логической структуры ПЛИС произвести отбор данных на основе временной отметки событий и получаемого триггерного сигнала. Максимальная частота триггера составляет **78 кГц**, а максимальная загрузка детекторов равна **545 кГц/см^2**.

Научная новизна

1. Впервые в ОИЯИ создана и испытана высокоскоростная потоковая электроника для регистрации сигналов с кремниевых двусторонних микростриповых детекторов с достигнутым координатным разрешением в 15 мкм. Получены фактические характеристики данного типа системы считывания в лабораторных и пучковых испытаниях. Система позволяет считывать данные в потоковом режиме с точностью временной отметки событий ±10 нс, и совместно с другими подсистемами работать по внешнему триггеру с частотой до 78 кГц при максимальной загрузке детекторов в 545 кГц/см^2.
2. Впервые в ОИЯИ на базе ПЛИС создан концентратор данных с детекторной электроники, поддерживающий функционал радиационно стойких ИС линейки GBT.
3. На созданной ССД реализован предложенный способ интеграции потоковой и триггерной систем сбора данных. Это решение может быть использовано и в других экспериментах, где требуется согласование потоковой электроники с пособытийно-триггерной системой считывания данных.

Научная и практическая значимость

1. Исследованы параметры и возможности микросхемы STS-XYTER. Определены оптимальные параметры конфигурации микросхемы, протестированы все её ключевые узлы, разработаны алгоритмы калибровки, позволившие увеличить точность измерения амплитуды и времени событий в 5 раз, исследованы шумовые характеристики детекторных модулей типа CBM/BMN и внедрены методы их подавления, позволившие достигнуть отношения сигнал/шум не ниже 20 для регулярных каналов детектора. Продемонстрирована стабильная работа созданной входной электроники модулей в течении нескольких суток в лабораторных и пучковых испытаниях.
2. Разработанное устройство «GBTxEmulator» позволяет произвести импортозамещение радиационно стойких микросхем специального назначения GBTx. GBTxEmulator необходим для работы с детекторной электроникой модулей типа CBM/BMN, а его платформа и разработанные логические блоки ПЛИС могут быть использованы для реализации других проектов, использующих электронику с цифровым интерфейсом связи на базе «е-линков».

Научная и практическая значимость

4. Проведены радиационные испытания и расчеты вероятности сбоев конфигурационной памяти ПЛИС, установленных в GBTxEmulator, на пучке протонов 1 ГэВ, позволяющие оценить отказоустойчивость работы ПЛИС под воздействием ионизирующего излучения частиц высоких энергий.
5. Разработанная потоковая система сбора данных с модулей CBM/BMN применена для создания вершинной пилотной плоскости для установки BM@N с целью повышения минимум в 5 раз в сравнении с существующей КТС гранулярности детекторов, и увеличения пропускной способности считывания данных до 545 кГц/см^2.
6. Созданные устройства могут быть использованы и для других прикладных задач, требующих высокоскоростной передачи большого количества данных из зоны повышенной радиации на удаленные входные узлы серверов.
7. Продемонстрирован метод интеграции потоковых и пособытийно-триггерных ССД, который может быть применен и в других экспериментах, где возникает такая необходимость.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях NUCLEUS-2021, NUCLEUS-2022, NUCLEUS-2025, NEC-2019, RFBR Grants for NICA, постерной сессии ПКК, коллаборационных совещаниях и научных семинарах.

Основные результаты работы опубликованы в **7** печатных изданиях, все из которых изданы в научных журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus.

Работы, вошедшие в диссертацию, поддержаны грантами ЛФВЭ ОИЯИ для молодых ученых и специалистов в 2022 и РФФИ грантом NICA № 18-02-40047.

За цикл работ «Потоковая система сбора данных для модернизированной кремниевой трековой системы эксперимента BM@N» автору присуждена стипендия имени академика Маркова для молодых учёных и специалистов за 2025 год.

Основные публикации

1) **Shitenkov M.,** *Dementev D., Voronin A. и др.* Front-End Electronics for BM@N STS // Phys. Part. Nucl. 2021. Т. 52, № 4. С. 826–829. https://doi.org/10.1134/S1063779621040559.
2) *Dementev D.,* ***Shitenkov M.****, Guminski M. и др.* Fast Data-Driven Readout System for the Wide Aperture Silicon Tracking System of the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. 2021. Т. 52, № 4. С. 830–834 https://doi.org/10.1134/S1063779621040213.
3) *W.M. Zabołotny, D.V. Dementev, M.O Shitenkov и др.* GBTX emulator for development and special versions of GBT-based readout chains // Journal of Instrumentation. 2021. Т. 16, № 12. DOI:10.1088/1748-0221/16/12/C12022.
4) *Дементьев Д. В.,* ***Шитенков М. О.****, Леонтьев В. В., Сухов Н. В., Шереметьев А. Д., Мурин Ю. А.,* Соотношение Сигнал/Шум модуля кремниевой трековой системы эксперимента BM@N // *Приборы и техника эксперимента*, 2023, ISSN:0032-8162, МАИК Наука Интерпериодика, С. 23 – 32, https://doi.org/10.31857/S0032816223010111.
5) *Dementev D.V.,* ***Shitenkov M.O.****, Sheremetev A.D. и др.,* Characterization of Tracking Modules Based on DSSD Sensors at the SC-1000 Accelerator for the BM@N Project // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. Т. 21, № 4. С. 919–927. https://doi.org/10.1134/S1547477124701000.
6) ***Shitenkov M. O.****, Dementev, D. V., Sheremetev, A. D., Leontiev V. V., Murin Yu. A.,* Radiation Tests of the data concentrator board based on FPGA Artix-7 for the Silicon Tracking System of the BM@N experiment // *Instruments and Experimental Techniques*. 2024. ISSN 0020-4412. Т. 67, № 4. С. 691–699.DOI: 10.1134/S0020441224701136.
7) *Dementev D.,* ***Shitenkov M.,*** *Diaz R.A. и др.,* In-beam tests of double-sided silicon strip detector modules for the BM@N experiment // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip. 2025. Т. 1075. С. 170390. https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170390.

Спасибо за внимание

Шитенков Михаил Олегович

Потоковая система сбора данных для кремниевой трековой системы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Специальность: 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Благодарности

Выражаю искреннюю благодарность и глубокую признательность своему научному руководителю – **Мурину Юрию Андреевичу**, кандидату физико-математических наук, начальнику научно-методического отдела кремниевых трековых систем ЛФВЭ ОИЯИ за всестороннюю поддержку, постановку научных задач, содействия в проведении экспериментов и конструктивную критику.

Также выражаю особую благодарность сотрудникам сектора №3 широкоапертурных кремниевых систем НМОКТС, которые непосредственно участвовали в описанной работе и являются соавторами публикаций, отражающих результаты работы. В частности **Леонтьев В.В., Сухов Н.В., Шереметьев А.Д., Коложвари А.А., Arteche Diaz R., Rodriguez Alvarez A. и Сидоренко В.**

Отдельная искренняя благодарность **Дементьеву Дмитрию Владимировичу** за непрерывную помощь в достижении целей данной работы, ценные советы и содействие в обработке результатов.

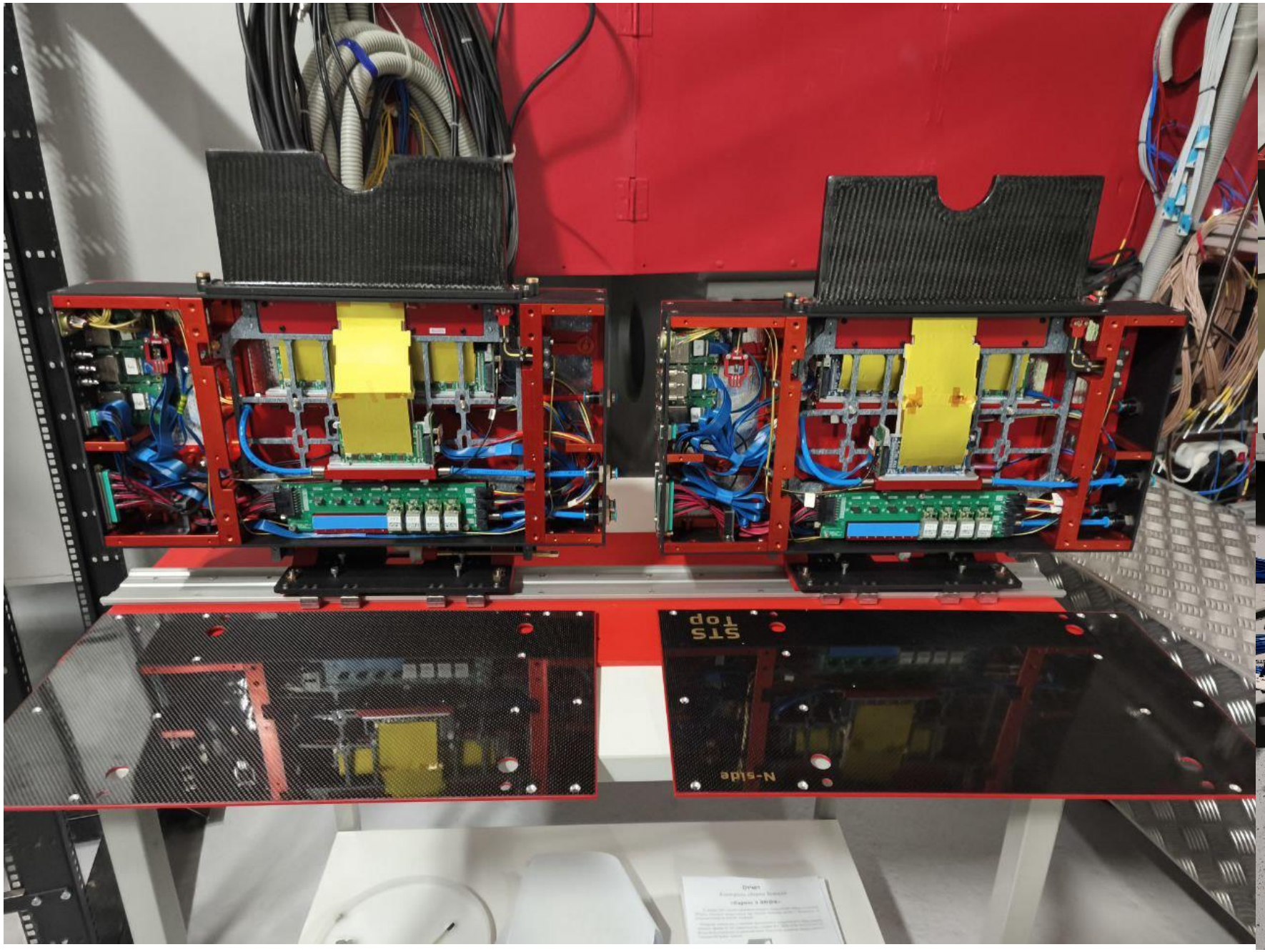
Благодарности

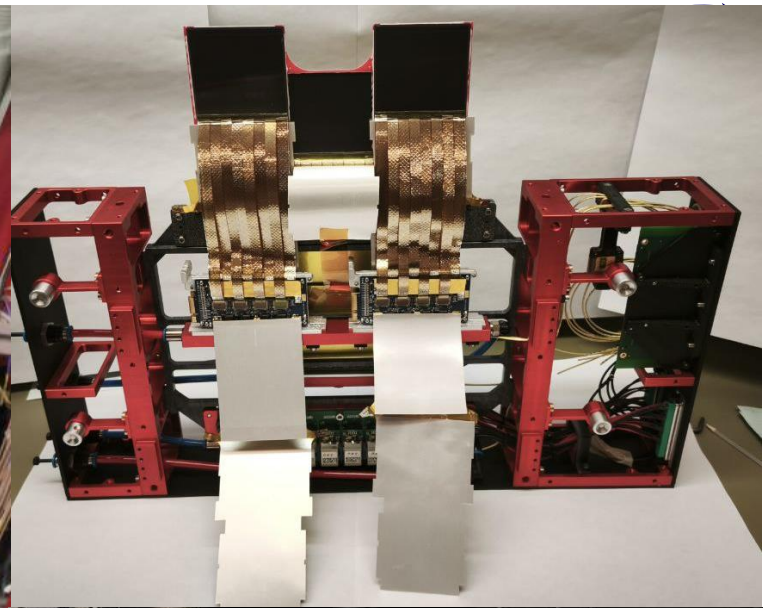
Автор выражает искреннюю признательность и благодарность:
– всем причастных к данной работе сотрудникам ОИЯИ, членам коллаборации BM@N, сотрудникам ускорителя СЦ-1000 в ПИЯФ за помощь, ценную критику, и создание условий для осуществления научной деятельности.
– **Wojciech Zabolotny,** профессору Варшавского университета технологий, за переданный опыт и наставничество в разработке ПЛИС.
– **Базылеву С.Н.** за внимательное прочтение работы и поддержку.
– преподавательскому составу кафедры проектирования электроники для установок «мегайсайенс» **Сахарову Ю.С., Понкину Д.О., Горбуновой В.Н., Трофимову А.Т., Стрекаловскому О.В., Богословскому Д.Н., Макарову А.А. и Сухоруковой В.В** за переданные знания в областях схемотехники, проектирования и технологии печатных плат, обработки сигналов, разработке систем управления с обратной связью, метрологии, программирования микроконтроллеров и ПЛИС, 3D-моделирования.
– **Горбунову Н.В.** за предоставленные возможности, за переданные знания, мотивирование и поддержку.
– **Хабаровой Е.М., Шевцовой В.Ю., Рассадовой А.Ю., Рудниченко И.И.** и всем тем, кто принял участие в подготовке и представлении к публичной защите диссертации;
– официальным оппонентам **Эннсу В.И.** и **Королю А.А.** за объективные и высококвалифицированные отзывы, которые позволили выявить недостатки и глубже понять значение выполненной диссертационной работы и за общую положительную оценку диссертации.

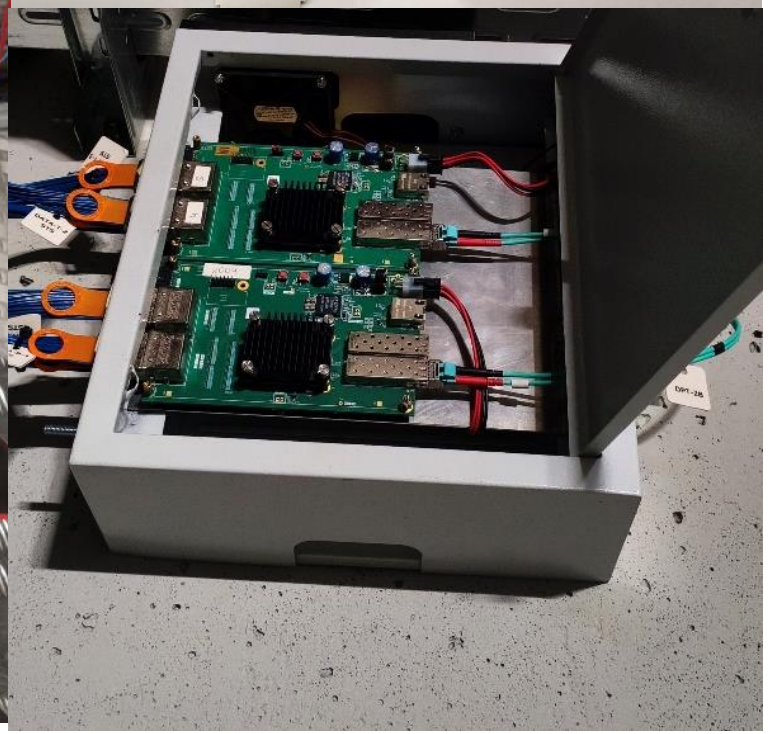
Личный вклад автора

Все результаты, приведенные в работе, получены самим автором или при его непосредственном участии. Автор внёс свой вклад в разработку концепции потоковой системы сбора данных кремниевой трековой системы и её интеграции в глобальную систему сбора данных эксперимента BM@N.

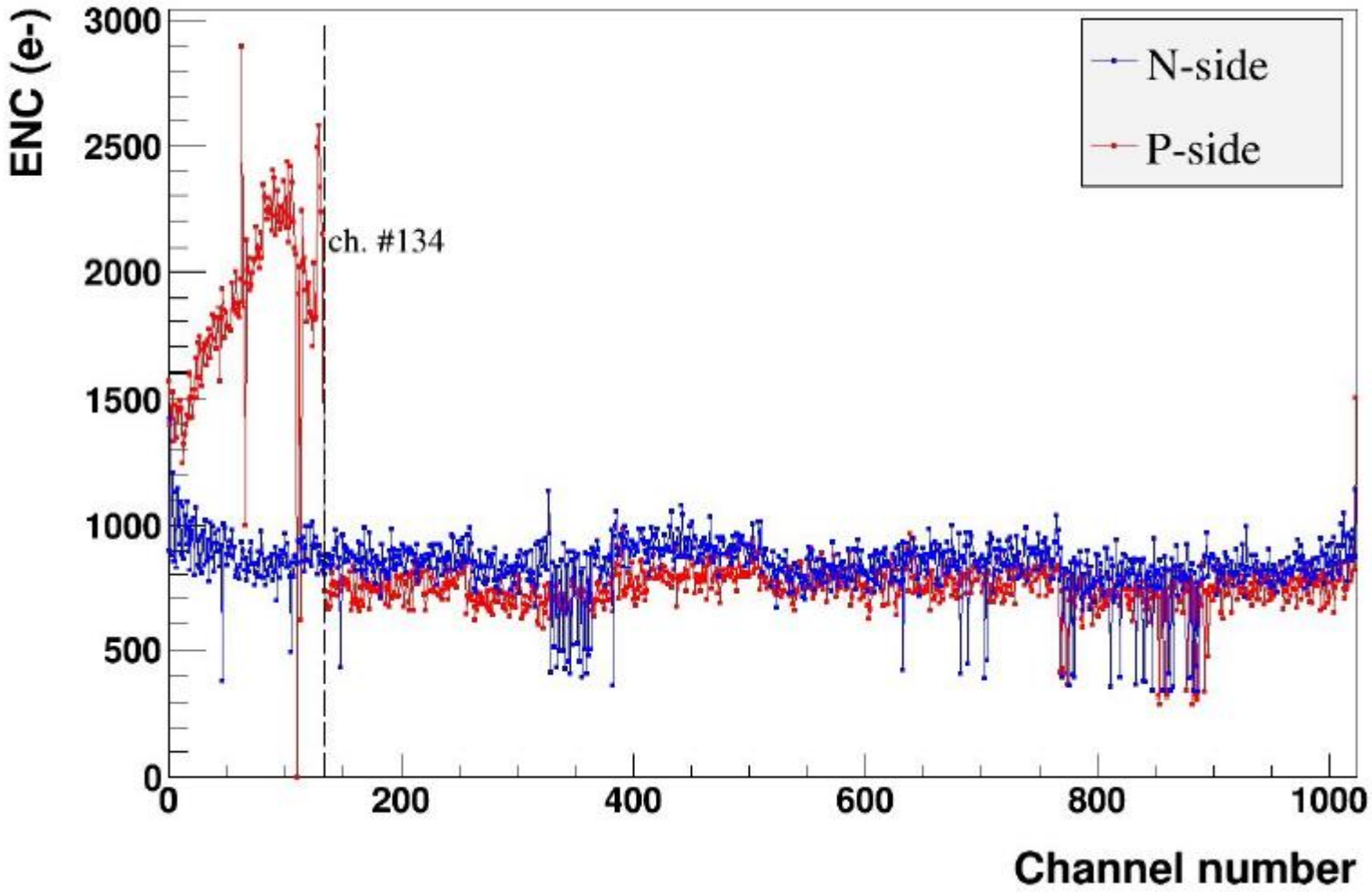
- Разработка: FEB, GBTxEmulator, интерфейс связи FEB-GBT-Emulator, система питания FEB (М. Шитенков)
- Разработка логической структуры ПЛИС для GBTx-Emulator и DPB (М. Шитенков, W. Zabolotny)
- Разработка системы управления для ССД (М. Шитенков)
- Испытания компонентов ССД (М. Шитенков, Д. Дементьев и др.)
- Обработка результатов испытаний (М. Шитенков, Д. Дементьев, В. Леонтьев и др.)
- Интеграция ССД в эксперимент BM@N (М. Шитенков, А. Коложвари, Arteche Diaz R)

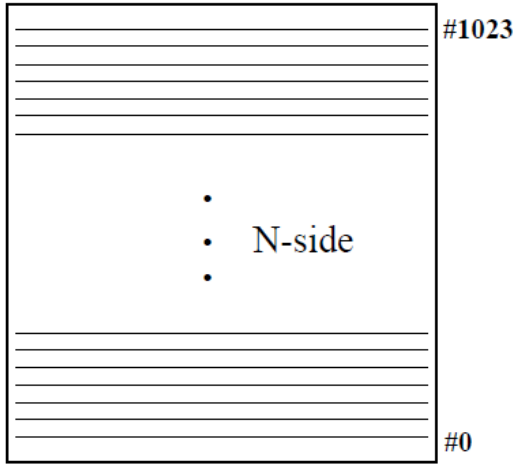

STS
Top
N-side

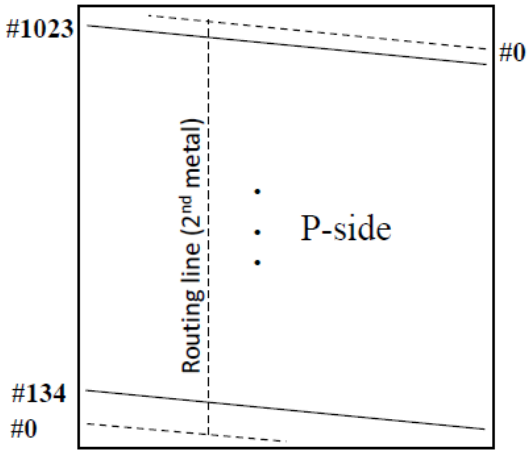




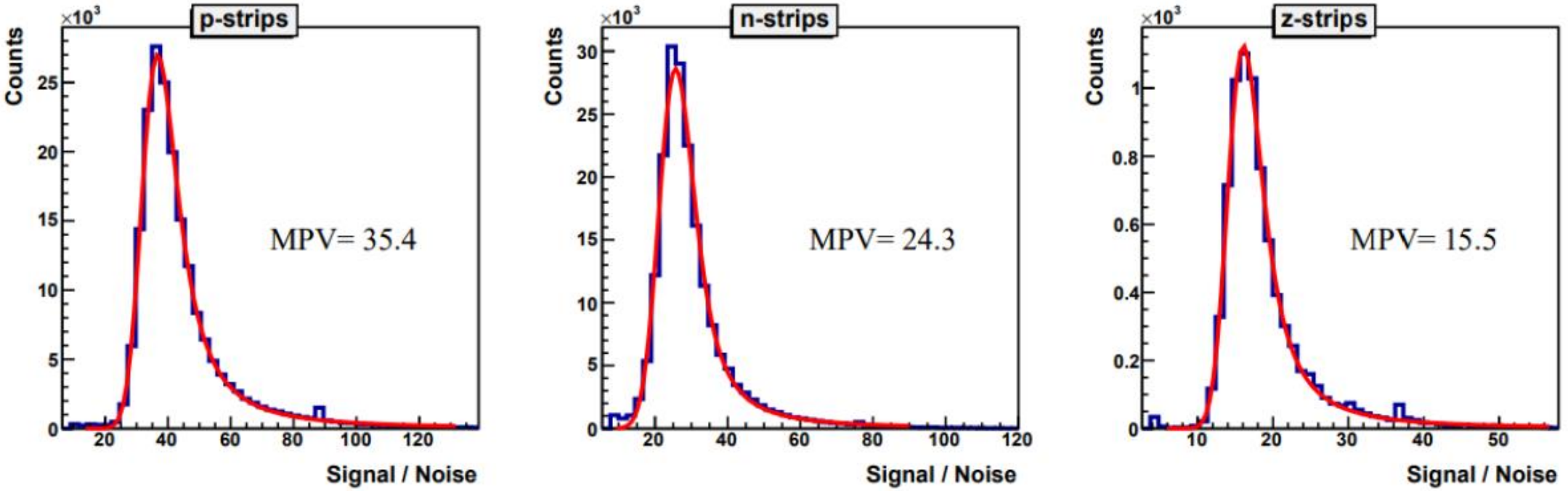
Распределение шума







Отношение сигнал/шум



Отношение сигнал шум p-,n- и z-(с двойной металлизацией) каналах для 1 ГэВ протонов

- ***P*-каналы $SNR_{\text{МИЧ}}$: 28 - 30.5;**
- ***N*- каналы $SNR_{\text{МИЧ}}$: 21 - 24.5;**
- ***z*- каналы $SNR_{\text{МИЧ}}$: 8 – 13;**

Список докладов

1) Front-End Electronics for BM@N STS characterization and quality assurance, Shitenkov Mikhail, Dementyev Dmitry, Murin Yurii, The 27th International Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC`2019), Budva, Becici, Montenegro.

2) Front-end readout electronics for BM@N STS, The Conference "RFBR Grants for NICA", Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, 20.10.2020 - 23.10.2020.

3) Модернизация системы сбора данных кремниевой трековой системы установки BM@N, М. Шитенков, 27 научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов государственного университета «Дубна», 17.04.2020 – 24.04.2020, Университет «Дубна».

4) Статус разработки системы сбора данных кремниевой трековой системы эксперимента BM@N, М. Шитенков, 28 научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов государственного университета «Дубна», 2.12.2020

5) Readout electronics of the silicon tracking system of the BM@N experiment at NICA, Shitenkov Mikhail, Dementyev Dmitry, Murin Yurii, The LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", St. Petersburg State University, National Research Center, St. Petersburg, Russia

6) Readout electronics for the wide aperture silicon tracking system of the BM@N experiment at NICA, Shitenkov M., Dementyev D., Murin Yu., The LXXII International conference "NUCLEUS – 2022. Fundamental problems and applications", Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, Russian Federation

7) Кремниевая трековая станция с системой потокового чтения как часть трековой системы BM@N, Шитенков М.О., Дементьев Д.В., Шереметьев А.Д., Леонтьев В.В., Коложвари А.А., Андреев Д.И. и Мурин Ю.А., The LXXV International conference "NUCLEUS – 2025. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", St. Petersburg State University, National Research Center, St. Petersburg, Russia.

8) Free-streaming data acquisition system for the modernized silicon tracking system of the BM@N experiment, Shitenkov M, 60-я сессия ПКК, ОИЯИ, Дубна, 27.01.2025 (Постер)