

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕКОВЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ DSSD-СЕНСОРОВ НА УСКОРИТЕЛЕ СЦ-1000 ДЛЯ ПРОЕКТА ВМ@N

*Д. В. Дементьев<sup>а,1</sup>, А. Д. Шереметьев<sup>а</sup>, М. О. Шитенков<sup>а</sup>,  
В. В. Леонтьев<sup>а,б</sup>, И. А. Руфанов<sup>а</sup>, Ю. А. Мурин<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Приводятся результаты исследования характеристик модулей на основе двусторонних микроstriповых кремниевых сенсоров, предназначенных для создания широкоапертурной кремниевой трековой системы для установки ВМ@N. Особенности модуля является использование быстрой считывающей электроники на основе микросхемы STS-XYTER и сверхлегких (0,23%  $X_0$ ) алюминиевых микрокабелей для передачи аналоговых сигналов со стрипов сенсора на входные каналы считывающей электроники. Также представлены результаты испытаний различных конфигураций трековых модулей на выведенном пучке протонов на ускорительном комплексе СЦ-1000 в ПИЯФ. Продемонстрирована стабильная работа считывающей электроники при загрузках, близких к пороговым значениям —  $360 \text{ кГц} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Соотношение сигнал/шум составило не менее 23. Измеренное координатное разрешение модулей в рамках пучкового телескопа —  $(17,0 \pm 0,4) \text{ мкм}$ , эффективность регистрации детектора для протонов с энергией 1 ГэВ — не менее 99%.

The paper presents the results of the study of the characteristics of modules based on double-sided microstrip silicon sensors designed to create a wide-aperture Silicon Tracking System for the ВМ@N experiment. The main features of this module are the fast readout electronics based on STS-XYTER chip and the usage of ultralight (0.23%  $X_0$ ) aluminum microcables to transfer analog signals from the sensor strips to the input channels of the readout electronics. The paper presents the results of tests of different configurations of the tracking modules at the proton beam at the SC-1000 accelerator in PNPI. Stable operation of the readout electronics at occupancies close to the maximum values —  $360 \text{ kHz} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  — was demonstrated. The Signal-to-Noise ratio for the module is more than 23. The measured coordinate resolution of the modules within the beam telescope is  $(17.0 \pm 0.4) \text{ }\mu\text{m}$ , and the detector registration efficiency for protons with an energy of 1 GeV is more than 99%.

PACS: 07.77.Ka

---

<sup>1</sup>E-mail: dementiev@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Установка BM@N является первым физическим экспериментом на ускорительном комплексе NICA, строительство которого в настоящее время ведется в Объединенном институте ядерных исследований. Основная задача эксперимента — изучение свойств сверхплотной барионной материи в соударениях ядер золота с энергией до 3,8 ГэВ/нуклон [1]. Для точного измерения импульсов продуктов распада мультитранных гиперонов и гиперядер планируется модернизация гибридной трековой системы. Модернизация установки предполагает интеграцию дополнительных четырех плоскостей кремниевой трековой системы (KTC) на основе двусторонних микростриповых кремниевых сенсоров (англ. DSSD — Double-Sided Silicon Strip Detectors) с быстрой считывающей электроникой [2]. Интенсивность пучков ионов золота на установке будет составлять до  $10^6 \text{ с}^{-1}$  [3]. Высокие интенсивности пучков, а также множественность вторичных частиц, рождающихся в тяжелоионных взаимодействиях, накладывают дополнительные требования к скорости обработки данных, поступающих с детекторов, и быстродействию считывающей электроники.

Одним из возможных путей решения этой задачи является отказ от традиционной архитектуры системы сбора данных эксперимента, основанной на использовании аппаратного триггерного сигнала, и переход к методу потоковой передачи данных с последующей покадровой обработкой событий. Поточковая архитектура использует принцип параллельной обработки сигналов и формирования независимого триггера в каждом отдельном канале. Информация со считывающей электроники детектора передается непрерывным потоком. Для дальнейшей обработки данные сортируются на основе временной отметки и формируют временные кадры (англ. timeslice) заданного размера. Затем они передаются в вычислительный центр, где происходит покадровая параллельная обработка, онлайн-реконструкция и отбор событий на основе алгоритмов 4D-трекинга [4].

Первые трековые модули на основе DSSD-сенсоров со считывающей электроникой, имеющей потоковую архитектуру передачи данных, были разработаны для проекта CBM STS [5] и предназначались для работы на пучке тяжелых ионов с интенсивностью до 10 МГц в условиях высокой множественности вторичных частиц (до 700 частиц). Конструкция этого модуля и считывающей электроники была оптимизирована для использования в проекте KTC BM@N [6]. В данной работе приводятся результаты исследования ряда необходимых для эксперимента характеристик трековых модулей BM@N.

## КОНСТРУКЦИЯ DSSD-МОДУЛЯ BM@N

Кремниевая трековая система BM@N должна состоять из четырех слоев на основе 292 DSSD-модулей. Проект KTC подробно описан в работах [7, 8]. Трековый модуль, показанный на рис. 1, является ключевым элементом конструкции и состоит из двустороннего микрострипового кремниевого сенсора, двух плат со считывающей электроникой для чтения и обработки сигналов, а также набора сверхлегких алюминиевых микрокабелей, соединяющих стрипы сенсора с входными каналами считывающей электроники.

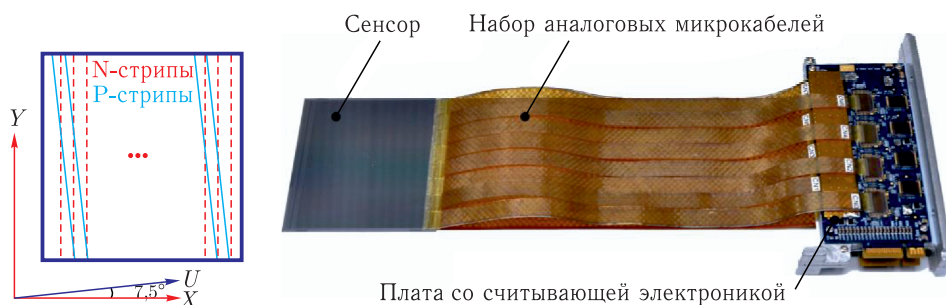


Рис. 1. DSSD-модуль KTC VM@N. Слева: схема расположения стрипов на сенсоре. Стрелками показаны направления осей, используемые в тексте. Справа: собранный модуль

Толщина сенсоров составляет  $(320 \pm 15)$  мкм. На каждой стороне сенсора находится по 1024 стрипа с шагом 58 мкм. Стрипы на N- и P-сторонах сенсора расположены под углом  $7,5^\circ$ , образуя тем самым пространственную сетку с ячейкой размером  $\Delta x = 58$  мкм и  $\Delta y = 58 \text{ мкм} / \text{tg}(7,5^\circ) = 440,6$  мкм. Схема расположения стрипов приведена на рис. 1. Для соединения каждой стороны сенсора со считывающей электроникой используется набор из 16 микрокабелей по 64 канала каждый. Сигнальная линия микрокабеля представляет собой дорожку из алюминия толщиной 10 мкм и шириной 116 мкм, паразитная емкость дорожки составляет 0,5 пФ/см. Общая толщина микрокабеля составляет 0,23 %  $X_0$ . Использование таких аналоговых шлейфов позволяет локализовать считывающую электронику детектора в периферийной области станции, минимизируя при этом количество вещества в чувствительной области трековой системы и радиационный фон в области расположения электроники [7].

В зависимости от расположения в трековой плоскости модуль может комплектоваться различным набором компонентов. Размер сенсора может быть  $62 \times 62$  мм или  $42 \times 42$  мм, длина микрокабелей может меняться в диапазоне от 110 до 280 мм. Модули, расположенные близко к оси пучка, имеют меньший размер сенсора (площадь стрипа) для того, чтобы минимизировать загрузки детектора. В то же время в центральных модулях используется комплект микрокабелей большей длины, так как считывающая электроника располагается в крайних областях трековых станций. Конструкция модуля и технологический процесс сборки подробно описаны в работах [2, 9].

Считывающая электроника модуля реализована на сверхбыстрых специализированных интегральных микросхемах (СИМС) STS-XYTER [10] и описана в работе [11]. Данная СИМС основана на архитектуре потоковой обработки данных, позволяющей работать без потери данных при средней загрузке в канале до 250 тыс. событий  $\cdot \text{с}^{-1}$  при максимальной частоте тактирования 160 МГц и использовании пяти синхронных линий передачи данных на микросхему. Такая высокая скорость работы обеспечивается использованием бестриггерной логики передачи данных, временем формирования аналогового сигнала до 80 нс и использованием отдельных 5-бит АЦП в каждом из 128 каналов микросхемы.

Платой за высокую пропускную способность считывающей электроники детектора является ограничение на расстояние передачи высокочастотного цифрового сигнала, а также большой объем кабелей при использовании нескольких параллельных

линий передачи для каждой микросхемы. В системе сбора данных КТС режим работы считывающей электроники детектора подобран исходя из результатов компьютерного моделирования загрузок трековой системы, которые будут составлять не более 150 Гц/канал [8]. В трековых модулях КТС пропускная способность микросхемы STS-XUTER составляет 12,5 тыс. событий  $\cdot$  канал $^{-1} \cdot$  с $^{-1}$ . Ограничение пропускной способности обусловлено использованием более низкой частоты тактирования 40 МГц для передачи данных по длинному кабелю (до 10 м) и одной линии передачи данных для микросхемы [12]. Архитектура системы сбора данных КТС ВМ@N подробно описана в работе [13].

Параметры модуля КТС должны удовлетворять следующим требованиям [8]:

- чтение и обработка сигналов с детектора в условиях загрузок до 5 кГц/см $^2$  или 150 Гц/канал;
- соотношение сигнал/шум не менее 10;
- пространственное разрешение не хуже 30 мкм;
- не более 3 % неработающих каналов;
- стабильная работа при эквивалентном флюенсе нейтронов 10 $^{11}$  см $^{-2}$ .

В рамках предсерийной сборки на сборочном участке в ЛФВЭ ОИЯИ были собраны 8 модулей, часть из которых была протестирована на выведенном пучке протонов на ускорителе СЦ-1000 в марте 2023 г.

## ТЕСТОВЫЙ СТЕНД

Стенд для тестирования модулей на выведенном пучке ускорителя СЦ-1000 представлял собой пучковый телескоп на основе четырех трековых модулей. Для формирования триггерного сигнала дополнительно использовались два сцинтилляционных счетчика, установленных спереди и сзади телескопа. Триггерный сигнал применялся для выборочной записи событий, отобранных из общего потока данных, передаваемого считывающей электроникой детектора. Измерения проводились на пучке протонов с энергией 1 ГэВ и интенсивностью от 10 $^4$  до 3 $\cdot$ 10 $^5$  см $^{-2} \cdot$  с $^{-1}$ . Схема стенда приведена на рис. 2.

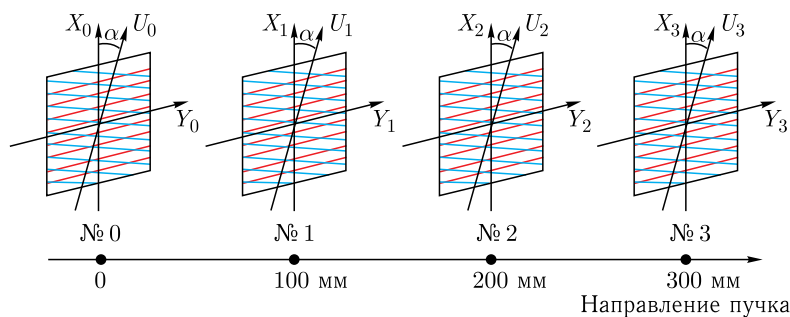


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Телескоп на основе DSSD-модулей для проекта ВМ@N. Сверху показана схема расположения сенсоров вдоль оси пучка. Красным цветом обозначено направление стрипов на N-стороне, синим — стрипы на P-стороне. Приведены направления осей координат, используемые в тексте

Все четыре модуля имеют сенсоры размером  $62 \times 62$  мм (размер чувствительной области  $60 \times 60$  мм). Длина микрокабелей для модулей №0, 1, 2 составляет 117 мм, для модуля №3 — 155 мм. Сенсоры установлены с шагом 100 мм по оси пучка. В данной работе исследованы следующие параметры модулей: соотношение сигнал/шум, стабильность работы считывающей электроники в условиях максимальных загрузок детектора, пространственное разрешение и эффективность регистрации частиц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

**Пропускная способность считывающей электроники детектора.** Принцип работы и схема формирования сигнала в канале микросхемы STS-XYTER приведены в работе [10]. В STS-XYTER реализован принцип параллельной обработки данных, при котором триггер формируется независимо каждым каналом при превышении амплитуды входного сигнала заданного порога компаратора. Передаваемая на выход микросхемы информация о событии содержит 14-бит отметки времени и 5-бит амплитуды сигнала. На входе канала находится зарядо-чувствительный усилитель (ЗЧУ), выходной сигнал которого передается на два усилителя-формирователя. Быстрый усилитель-формирователь совместно с дискриминатором используется для формирования временной отметки. Медленный усилитель-формирователь и АЦП применяются для измерения амплитуды сигнала. В случае, если сигнал приходит на вход канала в момент обработки предыдущего события — до его записи в буфер FIFO или если буфер в этот момент переполнен, то новое событие теряется, а флагу EventMissed присваивается значение 1.

Пропускная способность микросхемы STS-XYTER при работе на тактовой частоте 40 МГц составляет  $F_{ASIC} = 1,6$  млн событий  $\cdot$  с $^{-1}$  (12,5 тыс. событий  $\cdot$  канал $^{-1} \cdot$  с $^{-1}$ ). Одна микросхема обрабатывает данные с площади сенсора  $7,4 \times 60$  мм =  $4,4$  см $^2$ . Таким образом, максимально допустимая загрузка детектора составляет  $F_{ASIC}/4,4$  см $^2$  =  $360$  тыс. событий/см $^2$ . В процессе работы на ускорителе была протестирована работа считывающей электроники в условиях различных загрузок вплоть до  $3 \cdot 10^5$  см $^{-2} \times$  с $^{-1}$ , диаметр пучка составлял  $\sim 2$  см. Для измерения интенсивности пучка использовались как показания с ионизационной камеры, установленной перед пучковым телескопом, так и анализ данных с трековых модулей.

Для интеграции считывающей электроники КТС в глобальную систему сбора данных VM@N была реализована возможность отбора событий по приходу внешнего триггерного сигнала. Отбор событий имплементирован в электронных модулях на базе ПЛИС, принимающих и обрабатывающих информацию со считывающей электроники детектора. Данный фильтр позволяет «вырезать» из непрерывного потока данных временное окно заданного размера  $W$  (рис. 3). Загрузки микросхемы ( $F$ ) при таком режиме работы можно оценить как

$$F = \frac{f}{N_{tg}W}, \quad (1)$$

где  $f$  — количество хитов, переданных микросхемой за 1 с;  $N_{tg}$  — количество триггерных сигналов, полученных микросхемой за 1 с. Размер временного окна во всех тестах составлял  $W = 0,5$  мкс. Триггерная система была сконфигурирована таким

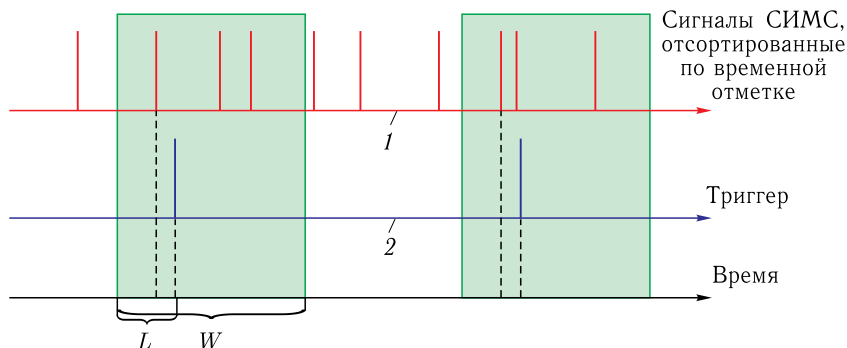


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Схема формирования временного окна на основе триггерного сигнала. Красной линией (1) показаны сигналы, поступающие с СИМС, отсортированные по временной отметке. Временное окно (показано в виде прямоугольников зеленого цвета) формируется на основе триггерного сигнала (показан синей линией, 2). Параметры задержки триггера ( $L$ ) и ширина временного окна ( $W$ ) задаются пользователем

образом, чтобы временной промежуток между соседними триггерными сигналами составлял не менее 20 мкс. Полученные результаты представлены на рис. 4. Максимальная частота событий, обрабатываемых одной микросхемой в эксперименте, составила  $1,3 \text{ млн с}^{-1}$ , что соответствует нагрузке детектора  $295,5 \text{ тыс. событий/см}^2$ . При таких параметрах пучка объем потерь данных (количество событий с  $\text{EventMissed} = 1$ ) составил 11%. Частичные потери в этом случае обусловлены неоднородностью интен-

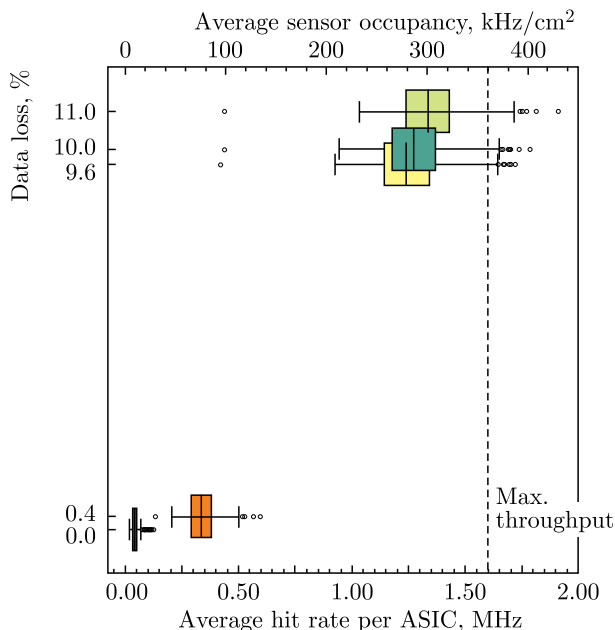


Рис. 4. Зависимость количества потерянных данных от загрузки микросхемы STS-XYTER. Вертикальной линией обозначен предел пропускной способности

сивности пучка: стандартное отклонение распределения загрузки микросхемы в течение одного набора данных составляет 155 тыс.  $\text{с}^{-1}$ . Незначительные потери данных (менее 1%) наблюдаются и при более низких нагрузках — около  $400 \text{ кГц} \cdot \text{с}^{-1}$  ( $91 \text{ кГц} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ ). По всей видимости, эти потери обусловлены короткими пиками интенсивности во время работы ускорителя.

Пропускная способность считывающей электроники трекового модуля значительно превышает требования эксперимента  $\text{VM@N}$ , которые составляют 19,2 тыс. событий  $\cdot \text{с}^{-1}$  для одной микросхемы. Пропускная способность считывающей электроники модуля КТС может быть увеличена еще в 4 раза без модификации конструкции с помощью повышения несущей частоты линии передачи данных до 160 МГц. Это делает возможным применение трековых модулей  $\text{VM@N}$  как в условиях более интенсивных пучков на ускорительном комплексе NICA, так и в других экспериментах на высокоинтенсивных пучках тяжелых ионов, таких как CBM.

**Соотношение сигнал/шум.** Соотношение сигнал/шум ( $S/N$ ) для трековых модулей КТС определяется следующим образом. Шумом ( $N$ ) является среднее значение эквивалентного шумового заряда в каналах СИМС. Наибольшее влияние на амплитуду шума оказывает емкость на входе ЗЧУ СИМС [14]. Сигналом ( $S$ ) является наиболее вероятное значение амплитуды зарядового сигнала с детектора от минимально ионизирующей частицы (англ. — MIP). Для протонов минимальная ионизирующая способность соответствует энергии  $\sim 2,45 \text{ ГэВ}$  [15]. В данной работе измерения выполнялись на пучке протонов с энергией 1 ГэВ. Расчет сигнала от MIP производился следующим образом [15]:

$$S = 0,92MP, \quad (2)$$

где  $MP$  — измеренное наиболее вероятное значение амплитуды сигнала с детектора от протонов с энергией 1 ГэВ. На рис. 5 приводятся распределения измеренных сигналов для обеих сторон модуля № 1, а также показаны корреляции между амплитудами сигналов на обеих сторонах сенсора.

Результаты оценки среднего эквивалентного шумового заряда ( $N$ ) и наиболее вероятного значения амплитуды сигнала ( $S$ ) приводятся в табл. 1. Погрешность оценки

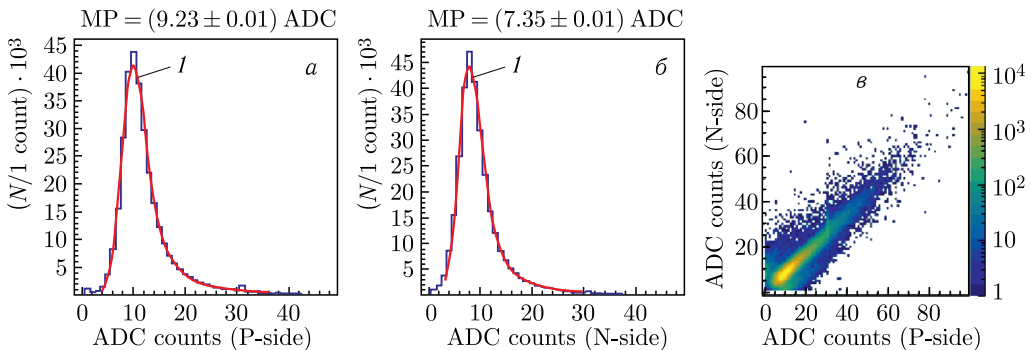


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Распределение амплитуд сигналов для модуля № 1 в единицах отчетов АЦП. а, б) Распределения для Р- и N-сторон, красными линиями (1) показан результат аппроксимации данных сверткой функций Гаусса и Ландау. в) Корреляции между амплитудами сигналов от одной частицы на обеих сторонах модуля

амплитуд сигналов обусловлена, в первую очередь, точностью калибровки аналоговых трактов микросхемы, которая составляет 3%. Диапазон значений соотношений сигнал/шум для Р-сторон сенсоров составил 26,7–32,1, для N-сторон 23,4–25,3.

Таблица 1. Соотношение сигнал/шум для тестируемых модулей.  $N_P$ ,  $N_N$  — средние значения эквивалентного шумового заряда («шума») на соответствующих сторонах сенсора;  $S_P$ ,  $S_N$  — средние амплитуды сигнала. Соотношение  $S/N$  указано в пересчете на сигнал MIP

ID	$S_P, 10^3 e^-$	$N_P, 10^3 e^-$	$S_N, 10^3 e^-$	$N_N, 10^3 e^-$	$S_P/N_P$	$S_N/N_N$
0	$26,3 \pm 0,9$	$0,82 \pm 0,07$	$22,3 \pm 0,8$	$0,88 \pm 0,07$	$32,1 \pm 1$	$25,3 \pm 0,8$
1	$25,7 \pm 0,9$	$0,83 \pm 0,07$	$22,2 \pm 0,8$	$0,86 \pm 0,07$	$31,0 \pm 1$	$25,8 \pm 0,8$
2	$25,7 \pm 0,9$	$0,79 \pm 0,07$	$22,8 \pm 0,8$	$0,85 \pm 0,07$	$32,5 \pm 1$	$26,8 \pm 0,9$
3	$25,4 \pm 0,9$	$0,95 \pm 0,08$	$21,8 \pm 0,8$	$0,93 \pm 0,08$	$26,7 \pm 0,9$	$23,4 \pm 0,8$

**Пространственное разрешение.** Все модули телескопа, показанного на рис. 2, имеют одинаковую структуру с горизонтальными стрипами, измеряющими  $X$ -координату на N-стороне и наклоненными на стереоугол  $7,5^\circ$   $U$ -стрипами на Р-стороне.  $X$ -стрипы разных модулей расположены параллельно (как  $U$ -стрипы). Комбинации пересекающихся  $X$ - и  $U$ -кластеров в модуле определяют  $Y$ -координаты точки попадания частиц.

Оценка параметров модулей КТС требует прецизионной геометрической реконструкции треков в пучковом телескопе. Перед ее проведением проверяется и при необходимости корректируется карта соответствия положений стрипов модуля и номеров соответствующих им электронных каналов считывающей электроники. В первую очередь рассматриваются корреляции номеров сработавших стрипов на каждой из сторон модуля. Поскольку около 2% кластеров состоят из пары стрипов, одновременные срабатывания соседних каналов отчетливо выделяются на фоне случайных совпадений. Для окончательной проверки карты достаточно сравнить номер сработавшего стрипа с предсказанием трека, проведенного через пару других модулей в проекциях  $ZX$  или  $ZU$ . Пример такого сравнения показан на рис. 6. Отсутствие выбросов и ступенек на этом распределении подтверждает, что карта каналов верна.

Для проведения прецизионной геометрической реконструкции представим телескоп (см. рис. 2) как систему из двух модулей — № 0 и 2, использующихся для построения прямых треков, и модулей № 1 или 3, в которых оценивается разброс промахов трека  $\sigma_{\text{res}}$  относительно измеренных в нем точек. Выбрана система координат, в которой модули № 0 и 2 расположены в соответствии с геодезическими измерениями, а положения модулей № 1 и 3 подстраиваются математически. В идеально геометрически выставленной системе разброс промахов трека  $\sigma_{\text{res}}$  зависит от разрешения детектора  $\sigma_d$ , точности проведения прямого трека  $\sigma_t$  и отклонения трека из-за многократного кулоновского рассеяния  $\sigma_{\text{mcs}}$  как

$$\sigma_{\text{res}} = \sigma_d \oplus \sigma_t \oplus \sigma_{\text{mcs}}. \quad (3)$$

Точность реконструкции трека при этом зависит как от расположения плоскости, на которую проецируется трек, так и от пространственного разрешения модулей, по хитам в которых проводится линия трека.



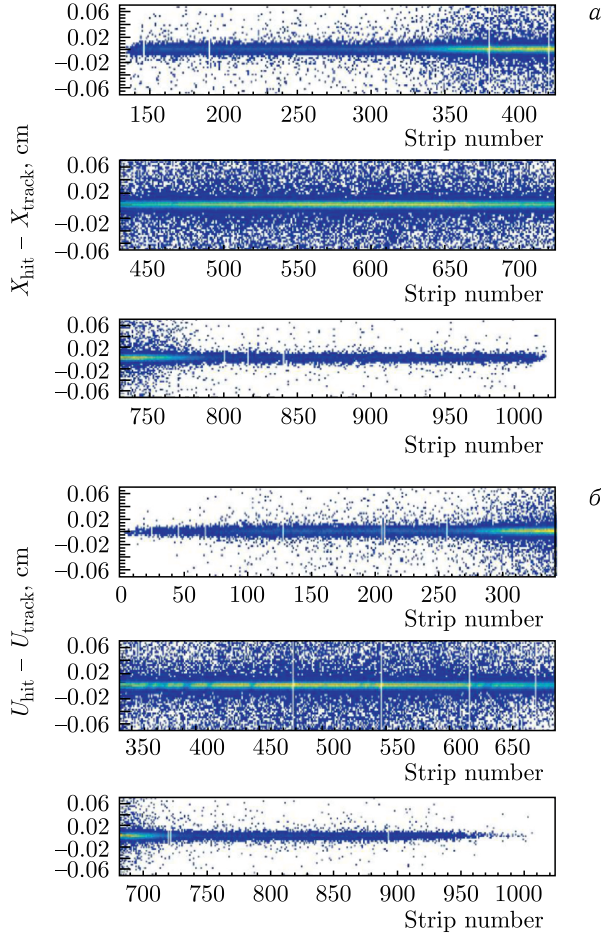


Рис. 6. Распределение невязок треков по каналам для модуля №1 на N-стороне (а) и P-стороне (б)

Пусть две плоскости с координатами вдоль пучка  $z'$  и  $z''$  используются для построения трека, а третья, тестовая плоскость, — для определения невязки  $\sigma_{\text{res}}$ . Точность проведения трека в точку  $z$  при условии, что пространственное разрешение всех модулей одинаково и равно  $\sigma_d$ , составляет

$$\sigma_t^2(z) = \frac{\sigma_d^2}{2} \left( 1 + 4 \left( \frac{z - (z'' + z')/2}{z'' - z'} \right)^2 \right) = K(z)\sigma_d^2, \quad (4)$$

где коэффициент  $K$  зависит от взаимного расположения модулей. В данном анализе для проведения треков использовались плоскости №0 ( $z' = 0$  мм) и №2 ( $z'' = 200$  мм), невязки рассчитывались для плоскостей №1 ( $z = 100$  мм) и №3 ( $z = 300$  мм), для которых коэффициент  $K$  составляет 0,5 и 2,5 соответственно.

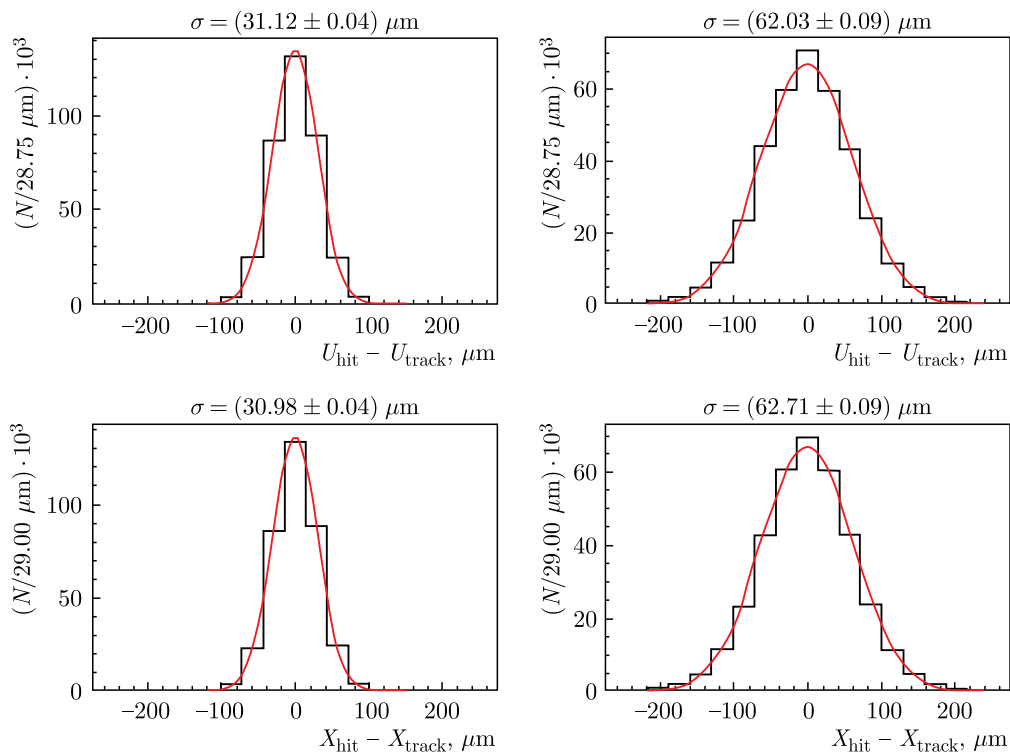


Рис. 7. Распределение невязок треков  $\Delta X$  и  $\Delta U$  для модулей № 1 (слева), № 3 (справа)

Из (3) и (4) следует, что пространственное разрешение модулей можно вычислить следующим образом:

$$\sigma_d = \frac{\sqrt{(\sigma_{\text{res}}^2 - \sigma_{\text{mcs}}^2)}}{\sqrt{K(z) + 1}}. \quad (5)$$

Распределение невязок треков для модулей № 1 и 3 приведено на рис. 7.

Влияние многократного кулоновского рассеяния на невязку трека можно определить, используя формулу среднего угла рассеяния [16]:

$$\sigma_\theta = \frac{13,6}{\beta_{\text{ср}}[\text{МэВ}]} \sqrt{\frac{X}{X_0}} \left( 1 + 0,038 \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) \right). \quad (6)$$

Толщина каждого модуля составляет  $X/X_0 = (0,38 \pm 0,01) \%$ . Для плоскостей № 1 и 3  $\sigma_{\text{mcs}} \sim \sigma_\theta L$ , где  $L = 100$  мм — расстояние между плоскостями. Для оценки  $\sigma_{\text{mcs}}$  было выполнено моделирование методом Монте-Карло в программной среде GEANT4, результаты которого приведены на рис. 8.

Вычисленные значения пространственного разрешения модулей в координатной системе  $XU$  представлены в табл. 2. Значения, полученные при анализе невязок треков в первой и третьей плоскостях, совпадают между собой и соответствуют теоретической оценке координатного разрешения сенсора с шагом стрипов  $p = 58$  мкм,

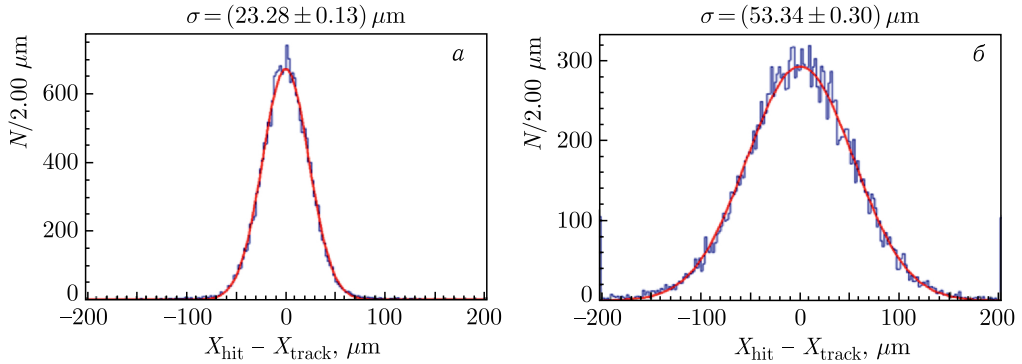


Рис. 8. Результаты моделирования методом Монте-Карло невязки трека  $\sigma_{mcs}$  для плоскостей № 1 (а) и № 3 (б), вызванной многократным кулоновским рассеянием

Таблица 2. Пространственное разрешение модулей  $\sigma_d$ , полученное путем анализа невязок треков для плоскостей № 1 и 3 пучкового телескопа

Координата	$\sigma_{res}$ , МКМ	$\sigma_{mcs}$ , МКМ	$\sigma_d$ , МКМ
$X_1$	$30,98 \pm 0,04$	$23,3 \pm 0,4$	$16,7 \pm 0,4$
$U_1$	$31,12 \pm 0,04$	$23,3 \pm 0,4$	$16,9 \pm 0,4$
$X_3$	$62,03 \pm 0,09$	$53,3 \pm 0,9$	$16,9 \pm 0,8$
$U_3$	$62,71 \pm 0,09$	$53,3 \pm 0,9$	$17,6 \pm 0,8$

которая составляет  $p/\sqrt{12} = 16,7$  мкм. Основной вклад в погрешность вычисления  $\sigma_{mcs}$  определяется точностью измерения расстояния между плоскостями и разбросом толщин сенсоров.

**Эффективность регистрации.** Для оценки эффективности регистрации сенсором протонов с энергией 1 ГэВ было построено распределение относительных невязок треков в координатной плоскости XY для модуля № 1, которые определялись по

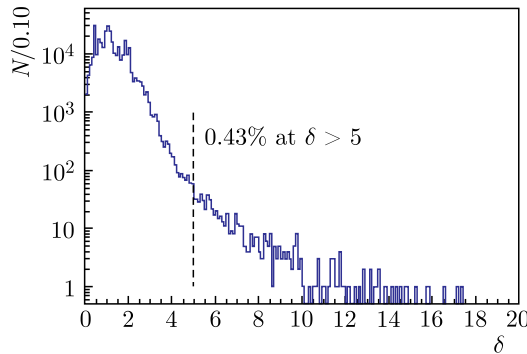


Рис. 9. Распределение относительной невязки трека для модуля № 1

следующей формуле:

$$\delta^2 = \frac{dx^2}{\sigma_{x_1}^2} + \frac{dy^2}{\sigma_{y_1}^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{x_1} = 31$  мкм,  $\sigma_{y_1} = 194$  мкм — невязки треков для первой станции в координатах  $XU$ . Полученное распределение показано на рис. 9. В случае отсутствия в исследуемом сенсоре хита, соответствующего данному треку, событие писалось в последний бин гистограммы. Важно отметить, что из данного анализа были исключены зоны с неработающими и соседними с ними каналами на сенсорах. Диапазону  $\delta > 5$  принадлежат менее 0,5% событий. Таким образом, эффективность регистрации сенсоров протонов с энергией 1 ГэВ в описываемом эксперименте составила значение не менее 99% для тех областей, где рабочими являются все каналы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования характеристик DSSD-модулей для кремниевой трековой системы BM@N на выведенном пучке протонов с энергией 1 ГэВ. В процессе натурных измерений были получены следующие результаты. Соотношение сигнал/шум для модулей различной конфигурации (длина микрокабеля 110 и 155 мм) составило от 23 до 32, координатное разрешение сенсоров —  $(17,0 \pm 0,4)$  мкм. Эффективность регистрации частиц единичным детектором составила 99% для тех областей, где рабочими являются все каналы. Считывающая электроника модулей продемонстрировала стабильную работу в условиях загрузки детектора вплоть до  $295 \text{ кГц} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Полученные значения с запасом удовлетворяют необходимым требованиям для кремниевой трековой системы BM@N. Высокая пропускная способность считывающей электроники дает возможность использования данных трековых модулей в будущих экспериментах в условиях значительно более высоких загрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V.D.* NICA Project at JINR: Status and Prospects // *J. Instrum.* 2017. V. 12, No. 06. P. C06012; <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/C06012>.
2. *Senger P., Dementev D., Heuser J., Kapishin M., Laurik E., Murin Yu., Maksymchuk A., Schmidt H.R., Schmidt C., Senger A., Zinchenko A.* Upgrading the Baryonic Matter at the Nuclotron Experiment at NICA for Studies of Dense Nuclear Matter // *Particles.* 2019. V. 2. P. 481–490; <https://doi.org/10.3390/particles2040029>.
3. *Kapishin M. for BM@N Collab.* Studies of Baryonic Matter at the BM@N Experiment (JINR) // *Nucl. Phys. A.* 2019. V. 982. P. 967–970; <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2018.07.014>.
4. *Akishina V., Kisel I.* Parallel 4-Dimensional Cellular Automaton Track Finder for the CBM Experiment // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 762. P. 012047; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/762/1/012047>.
5. *Rodríguez Rodríguez A., Rodríguez O. Maragoto, Lehnert J., Toia A., Teklishyn M., Lymanets A., Rodríguez Garcés D., Heuser J.M., Schmidt C.J.* Functional Characterization of Modules for the Silicon Tracking System of the CBM Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2024. V. 1058. P. 168813; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168813>.

6. Шереметьев А. Д., Дементьев Д. В., Леонтьев В. В., Шитенков М. О., Мурин Ю. А. Технологический процесс изготовления и тестирования трековых модулей на основе кремниевых двусторонних микрополосковых детекторов // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, №3(254). С. 569–591.
7. Dementev D., Baranov A., Elsha V. et al. The Silicon Tracking System as a Part of Hybrid Tracker of BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. 2022. V. 53. P. 197–202; <https://doi.org/10.1134/S1063779622020265>.
8. Dementev D., Baranov A., Elsha V. et al. Technical Design Report. The Silicon Tracking System as a Part of Hybrid Tracker of BM@N Experiment. Dubna, 2020. 101 p.
9. Sheremetev A. et al. The Quality Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 20, No. 4. P. 613–618; <http://dx.doi.org/10.1134/S1547477123040593>.
10. Kasinski K., Rodríguez-Rodríguez A., Lehnert J., Zubrzycka W., Szczygiel R., Otfinowski P., Kleczek R., Schmidt C. J. Characterization of the STS/MUCH-XYTER2, a 128-Channel Time and Amplitude Measurement IC for Gas and Silicon Microstrip Sensors // Nucl. Instr. Meth. 2018. V. 908. P. 225–235; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.076>.
11. Shitenkov M., Dementev D., Voronin A. et al. Front-End Electronics for BM@N STS // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 826–829; <https://doi.org/10.1134/S1063779621040559>.
12. Dementev D., Shitenkov M. Performance of STS-HCTSP with Long Transmission Lines // CBM Progress Report 2019. Darmstadt, 2019. P. 31; <https://doi:10.15120/GSI-2020-00904>.
13. Dementev D., Guminski M., Shitenkov M. Fast Data-Driven Readout System for the Wide Aperture Silicon Tracking System of the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 830–834.
14. 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 // ПТЭ. 2023. Т. 1. С. 21–23; <https://doi.org/10.31857/S0032816223010111>.
15. Berger M.J., Coursey J.S., Zucker M.A., Chang J. Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions. NIST Standard Reference Database 124. <https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P>.
16. Zyla P. A. et al. (Particle Data Group) // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. 083C01.

Получено 8 декабря 2023 г.