

## ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА «НУКЛОН»

*В. Борейко<sup>а</sup>, Н. Горбунов<sup>а,б</sup>, В. Гребенюк<sup>а,б</sup>, А. Калинин<sup>а</sup>,  
Д. Подорожный<sup>а</sup>, С. Пороховой<sup>а</sup>, А. Садовский<sup>а</sup>,  
Л. Ткачев<sup>а,б</sup>, А. Ткаченко<sup>а,1</sup>*

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

<sup>б</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

<sup>б</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

В эксперименте «Нуклон» планируется измерить спектр и элементарный состав космических лучей (КЛ) в интервале энергий  $10^{11}$ – $10^{15}$  эВ. Измерение энергетического спектра, а также заряда и массы частиц КЛ даст дополнительную информацию об источниках КЛ, механизмах их ускорения и распространения в Галактике. Детектор «Нуклон» запущен на околоземную орбиту в декабре 2014 г. в составе спутника «Ресурс-П» № 2. За время набора данных получена статистика до  $5 \cdot 10^{14}$  эВ, которая превосходит существующую статистику баллонных экспериментов ATIC и CREAM. Эксперимент «Нуклон» основан на использовании современных детекторов, применяемых в экспериментах по физике высоких энергий. В работе представлена триггерная система эксперимента «Нуклон», выполненная на базе мультистриповых сцинтилляционных детекторов, в том числе результаты тестов на ускорителе SPS в ЦЕРН.

The NUCLEON experiment is planned to measure the spectrum and the elemental composition of cosmic rays (CR) in the energy range of  $10^{11}$ – $10^{15}$  eV. Measuring the energy spectrum, as well as the charge and mass of CR particles, provides additional information about sources of CR, the mechanisms of their acceleration and propagation in the Galaxy. The SC “Resurs-P” No.2 with the NUCLEON scientific equipment was launched into orbit in December 2014. During the data taking, statistics of up to  $5 \cdot 10^{14}$  eV has been obtained, which exceeds the existing statistics of ATIC and CREAM balloon experiments. The NUCLEON experiment is based on the use of modern detectors used in high-energy physics experiments. Trigger system of the NUCLEON experiment based on plastic scintillator strip detectors is presented including results of tests at the CERN SPS.

PACS: 07.05.Fb; 07.05.Hd; 07.60.Vg; 95.55.-n

### ВВЕДЕНИЕ

Открытое более 60 лет тому назад Г. Б. Христиансенom и Г. В. Куликовым «колeно» в спектре космических лучей (КЛ) [1] при энергиях  $\sim 10^{15}$  эВ остается объектом пристального внимания исследователей, так как не ясно, является этот излом в спектре следствием

---

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

особенностей генерации и ускорения КЛ в источниках или особенностью их распространения в Галактике. Такая неопределенность в большей степени объясняется отсутствием однозначной информации о спектре и составе КЛ в этой области. В основном излом измерен косвенно: по анализу широких атмосферных ливней (ШАЛ), образуемых падающими в атмосферу КЛ. При этом невозможно ни прямое измерение заряда и массы первичной частицы, ни ее энергии. В последнее время выполнены прямые измерения в этой области на баллонах, однако данные по составу и интенсивности компонент КЛ в области  $10^{14}$ – $10^{15}$  эВ носят противоречивый характер, так как не имеют достаточной статистической обеспеченности.

Исследования спектра и состава КЛ в области «колена» объективно трудны: для методики ШАЛ сигнал слишком слабый и его нельзя однозначно интерпретировать, в прямых измерениях на баллонах невозможно получить достаточную статистику, так как интенсивность частиц в области «колена» мала — порядка 1 частицы в год на площади  $1 \text{ м}^2$ . Остается надежда на прямые измерения КЛ с помощью установок на спутниках, таких как детектор «Нуклон», запущенный на околоземную орбиту в декабре 2014 г. в составе спутника «Ресурс-П» № 2 [2], а также недавно запущенные на орбиту детекторы DAMPE [3], COLET [4] и ISS-CREAM [5].

Эксперимент «Нуклон» направлен на измерение спектра и состава КЛ в области, непосредственно примыкающей к «колену». За время набора данных получена статистика вплоть до  $5 \cdot 10^{14}$  эВ, которая превосходит существующую статистику баллонных экспериментов ATIC [6] и CREAM [7]. Измерение энергетического спектра, а также заряда и массы частиц КЛ даст дополнительную информацию об источниках КЛ, механизмах их ускорения и распространения в Галактике.

Эксперимент «Нуклон» основан на использовании современных детекторов, применяемых в исследованиях по физике высоких энергий. Для измерения заряда первичной частицы и треков первичной и вторичных частиц в разных частях детектора используются стриповые и падовые полупроводниковые кремниевые детекторы. Для организации отбора событий в круто падающем спектре КЛ в установку интегрирована сцинтилляционная система быстрого триггера на базе позиционно-чувствительных мультистриповых сцинтилляционных детекторов.

## **1. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА «НУКЛОН». СЦИНТИЛЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА БЫСТРОГО ТРИГГЕРА**

Детектор «Нуклон» представляет собой стопку регистрирующих плоскостей, состоящую из кремниевых и сцинтилляционных детекторов, углеродной мишени, а также калориметра с вольфрамовым конвертором  $\gamma$ -квантов. Первичная космическая частица взаимодействует с веществом мишени, образует вторичные заряженные и нейтральные частицы, которые проходят конвертор и детекторы вторичных частиц. Регистрация и измерение таких событий является конечной целью детектора «Нуклон» в диапазоне энергий  $10^{11}$ – $10^{15}$  эВ.

В состав детектора входят следующие основные системы (рис. 1):

- система измерения заряда (СИЗ) первичной частицы (1) — это четыре слоя падовых кремниевых детекторов толщиной 300 мкм и размером  $12 \times 12$  мм;
- графитовая мишень толщиной 90 мм (2), в которой должна находиться вершина первичного взаимодействия налетающей частицы отобранных событий КЛ;

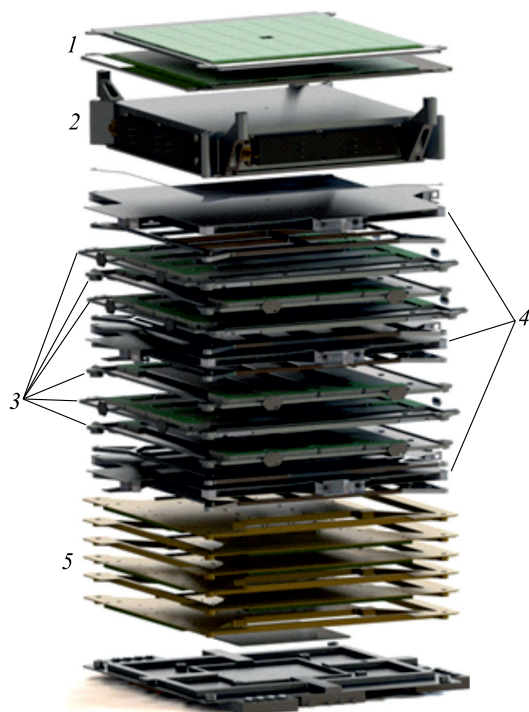


Рис. 1. Схематический вид установки «Нуклон» в сборе (растянута по вертикали)

— система измерения энергии (СИЭ) методикой KLEM и определения оси ливня (3) — трекер, состоящий из шести слоев вольфрамовых гамма-конверторов толщиной  $\sim 2$  мм, над каждым из которых расположен слой микростриповых кремниевых детекторов толщиной 300 мкм с шагом 0,45 мм (измерение энергии методикой KLEM описано в [8]);

— сцинтилляционная система быстрого триггера (ССБТ) (4), предназначенная для выделения полезного и подавления фоновых события и состоящая из шести слоев сцинтилляторов, более подробно описана ниже;

— вольфрамово-кремниевый ионизационный калориметр толщиной  $\sim 12$  радиационных длин (5), предназначенный для полетной калибровки детекторов спектрометра KLEM и измерения энергии электромагнитной компоненты ливня;

— блок служебной электроники, выполняющий функции приема данных, питания, коммутации и обмена информацией со спутником «Ресурс-П» № 2, а также управления подсистемами детектора.

Сцинтилляционная система быстрого триггера (ССБТ) является одной из важнейших систем детектора [9]. Цель триггерной системы — отбирать полезные события с наибольшей энергией в апертуре детектора и подавлять фоновые события с низкой энергией. Полный поток частиц КЛ через установку  $\approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ , причем частицы приходят с произвольного направления, т. е. поток падающего излучения изотропен (с точностью до экранировки Землей). Траектория первичной частицы пересекает часть или все детектирующие слои, образуя ливень вторичных частиц после взаимодействия с веществом

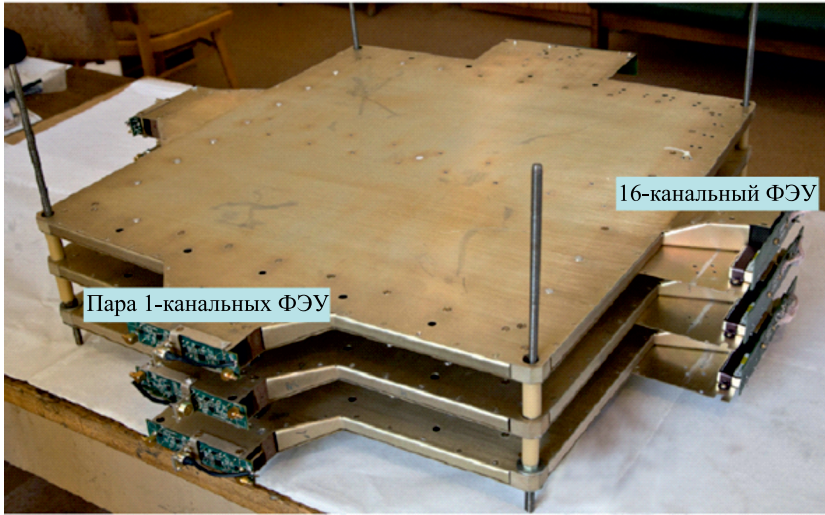


Рис. 2. Три модуля триггерной системы детектора «Нуклон»

мишени или в других частях детектора. Быстрый анализ таких событий является необходимым условием работы ССБТ. Это требование может быть удовлетворено путем использования сцинтилляционных детекторов, временное разрешение которых  $\sim 10$  нс, что подтверждается существующей практикой их использования на ускорителях и космических аппаратах [10, 11]. Задачей ССБТ является способность подавления фоновых событий на уровне  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  и регистрации полезных событий, их быстрый (за время  $\sim 50$  нс) анализ с целью отбора событий, инициированных частицами КЛ с энергией в диапазоне  $10^{11}$ – $5 \cdot 10^{14}$  эВ, и выработка управляющих команд для электроники всех детекторов. ССБТ имеет возможность перестройки триггера за счет изменения порога регистрирующей электроники и напряжения на фотоэлектронных умножителях (ФЭУ). Триггер может регулироваться от самого либерального до максимально жесткого.

ССБТ состоит из трех модулей, показанных на рис. 2, и электронной платы триггерной системы (ПТС) (см. рис. 4 и 5). Между триггерными модулями располагаются вольфрамовые конверторы и микростриповые кремниевые трековые детекторы СИЭ. Модуль состоит из двух плоскостей, каждая из которых имеет 16 сцинтилляционных стрипов размером  $500 \times 31 \times 7,5$  мм. Направления стрипов в соседних плоскостях модуля ориентированы взаимно-перпендикулярно. Свет, возникающий в сцинтилляторах каждой плоскости, собирается и передается на ФЭУ [12, 13] с помощью спектросмещающих WLS-файберов диаметром 1 мм фирмы Kuragay (Япония), вклеенных в канавки вдоль стрипов.

На рис. 3 представлена схема стенда для тестов триггерной плоскости детектора «Нуклон». В каждый стрип вклеено семь файберов, которые делятся на три группы: две группы по два файбера и одну группу из трех файберов. Группа из трех файберов каждого стрипа передает световой импульс к 16-канальному ФЭУ Hamamatsu H8711. Две другие группы файберов передают свет к двум 1-канальным ФЭУ Hamamatsu H5773, которые включены в систему выработки триггера. На 1-канальный ФЭУ свет собирается со всей плоскости, что обеспечивает двукратное резервирование измерения триггерного

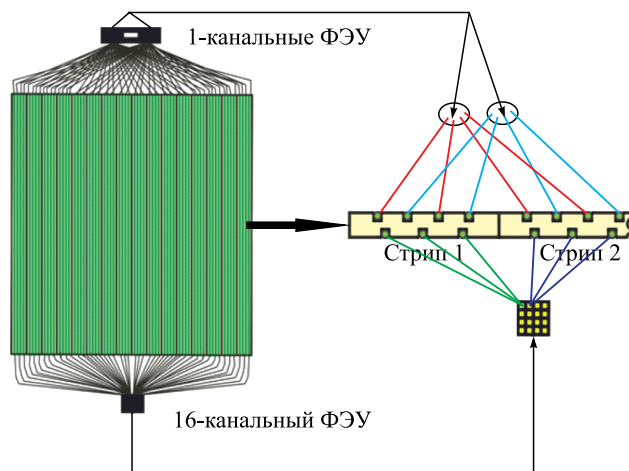


Рис. 3. Схема триггерной плоскости детектора «Нуклон»

сигнала с каждой плоскости ССБТ и позволяет существенно повысить надежность всей работы триггерной системы. С целью предварительной проверки качества собираемых детекторов тесты триггерных плоскостей проводились как с источником света, так и с помощью радиоактивного источника  $^{90}\text{Sr}$ . Окончательные тесты выполнялись на выведенных пучках SPS в ЦЕРН.

Фоновыми событиями в эксперименте «Нуклон» являются частицы КЛ с более низкой энергией, чем установленный энергетический порог. Событие считается полезным, если при этом вершина взаимодействия частицы КЛ находится в углеродной мишени и ось события лежит в апертуре детектора. Для такого события сигнал в первом триггерном модуле определяется вторичными частицами из вершины, а к величине сигнала в двух последующих модулях ССБТ добавляются сигналы от каскада частиц, образовавшихся в веществе конверторов. Фактические пороговые значения для триггерных сигналов и напряжения на ФЭУ на последовательно расположенных триггерных модулях были определены при тестах детектора «Нуклон» на пучках адронов и ядер на ускорителе SPS в ЦЕРН. Принципиальная блок-схема электронной ПТС представлена на рис. 4.

Отбор событий осуществляется следующим образом. С 1-канальных ФЭУ каждой плоскости сигнал поступает на инвертирующие усилители (инверсия позволяет обойтись питанием одной — положительной — полярности на ПТС) с коэффициентом усиления 5, собранные на операционном усилителе AD8055, и передается на ПТС. На ПТС размещены две идентичные группы схем для резервирования, реализующие логику выработки триггера с помощью сигналов от 1-канальных ФЭУ. Каждая группа содержит шесть каналов регистрации и состоит из дискриминатора и цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Дискриминатор реализован на микросхеме компаратора ADCMP601. Помимо этого канал содержит мажоритарную схему совпадений, кратность которых меняется от единицы до шести. Возможны разные варианты установки режимов отбора событий, когда каждый из каналов может быть включен или выключен из схемы совпадений. Мажоритарная схема совпадений реализована на программируемой логической матрице ALTERA EPM240. На выходе этой схемы вырабатывается триггерный сигнал, который поступает на входы регистров микроконтроллеров каждой из групп и через фор-

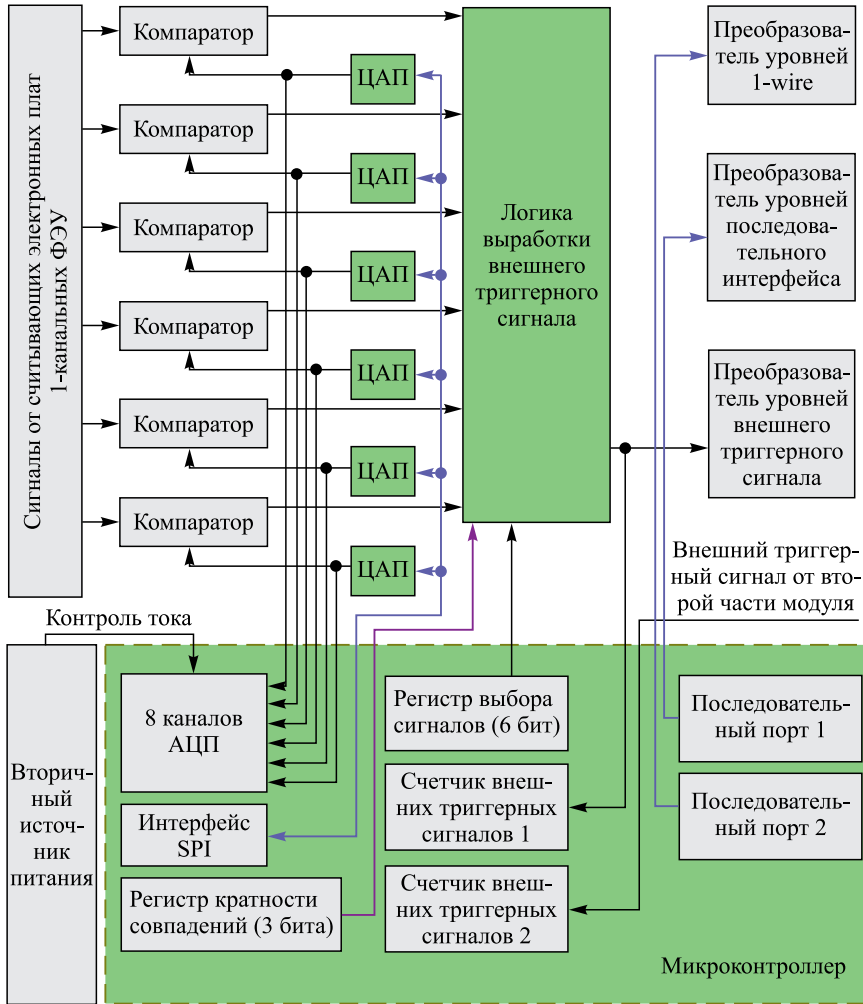


Рис. 4. Принципиальная электрическая блок-схема ПТС детектора «Нуклон»

мирователь LVDS-уровней передается в систему обработки научной и служебной информации (СОНСИ). Управление триггерной системой осуществляется микроконтроллером ATMEGA165P, который регулирует значения триггерных параметров и высокое напряжение 1-канальных ФЭУ.

Внешний вид и габариты электронной ПТС триггера 1-го уровня представлены на рис. 5. Возможны два варианта установки режимов отбора:

— пороги и конфигурация совпадений заданы на Земле и загружаются при включении питания;

— загружается предыдущий вариант, к которому добавляются значения порогов и/или кратности совпадений. Пороговые значения выбираются исходя из скорости счета триггеров в полете.

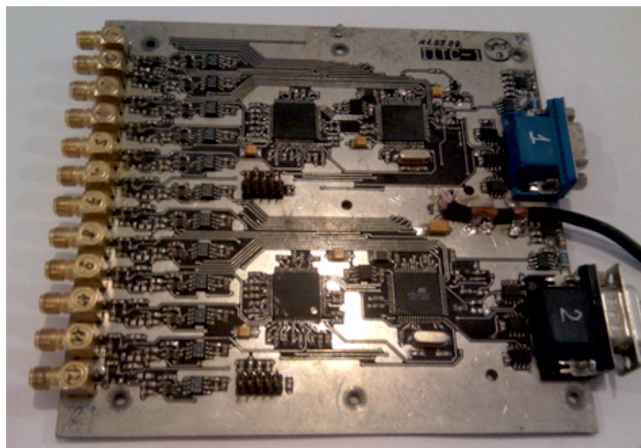


Рис. 5. Электронная ПТС триггера 1-го уровня

Программное обеспечение ПТС служит для управления параметрами плат ССБТ и установки высокого напряжения на 1-канальных ФЭУ. Также устанавливаются параметры канала обмена с СОНСИ. К логическому управлению относятся следующие функции: включение/выключение каналов триггерной платы, изменение кратности совпадений и включение автоматического опроса устройства. При установленной кратности, равной единице, будет работать режим логического суммирования включенных каналов. Максимальное число кратности совпадений равно шести. Если число включенных каналов превышает кратность совпадений, то устройство реализует функцию мажоритарных совпадений. Записью чисел «Код ЦАП» задаются пороги соответствующих каналов. Диапазон вариации чисел «Код ЦАП» от 0 до 1023, каждый шаг соответствует 2,5 мВ.

## 2. КАЛИБРОВКА И ТЕСТ ССБТ НА ПУЧКЕ УСКОРИТЕЛЯ SPS В ЦЕРН

**2.1. Тест прототипов детектора «Нуклон».** Основной задачей тестов прототипов установки «Нуклон» являлась физическая калибровка детекторов на основе данных о регистрации реальных пучковых событий и определение таким образом коэффициентов пересчета электрических сигналов в энергетические величины. Для этого требуется, чтобы все детекторы были прокалиброваны единым образом, т. е. необходимо знать, какие значения электрических сигналов в многоканальных регистрирующих устройствах соответствуют прохождению однозарядной частицы минимальной ионизации ( $mip$ ), которая взаимодействует с детектором преимущественно электромагнитным способом. Для решения этой задачи в тестах на космических и ускорительных мюонах гигаэлектронвольтных энергий были получены распределения амплитуд электрических сигналов во всех каналах многоканальной ССБТ. Типичный пример подобного распределения для одного из сцинтилляционных каналов триггерной системы — узкий пьедестальный пик и широкое распределение Ландау — представлен на рис. 6. Таким образом, для каждого канала была измерена средняя амплитуда электрического сигнала, соответствующая прохождению одной  $mip$ -частицы и примерно 300 отсчетам аналого-цифрового преобразователя (АЦП).



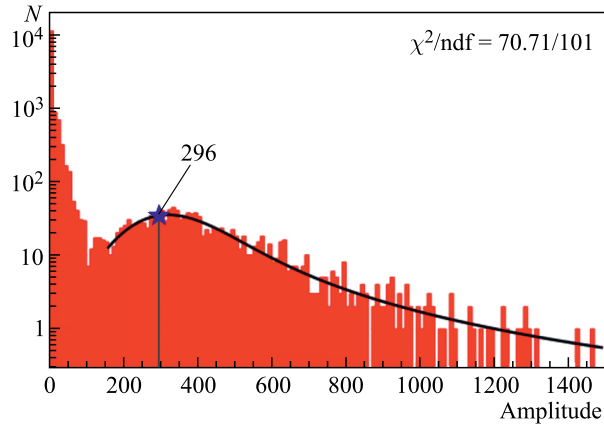


Рис. 6. Распределение амплитуд электрического сигнала от релятивистского мюона ( $\mu$ ) в канале триггерной системы. По горизонтальной оси — амплитуда сигнала в отсчетах АЦП, а по вертикальной — число отсчетов

Величина энергий КЛ, которые должен регистрировать детектор «Нуклон» на орбите, должна превышать 100 ГэВ, поэтому практически единственной возможностью для наземной калибровки является использование выведенных пучков ускорителя SPS в ЦЕРН [14]. Каналы H2 и H8 ускорителя SPS являются тестовыми и используются для проверки и отладки детекторов различных экспериментов, в том числе астрофизических. Многоплановость использования каналов обусловлена физическими характеристиками пучков: положительные и отрицательные пионы, электроны и ядра со значениями энергий в интервале 150–350 ГэВ, интенсивность частиц от  $10^2$  до  $10^7$   $\text{с}^{-1}$  и длительность медленного вывода  $\sim 10$  с.

В тестах ССБТ на пучке с ускорителя измерялась эффективность триггерной системы для подавления событий с пониженной энергией и, следовательно, пониженной множественностью. Изучалась зависимость числа отобранных событий от напряжения на 1-канальных ФЭУ и величин порогов в считывающей электронике триггерных плоскостей. Система сбора данных была реализована на 32-канальном преобразователе зарядкод V792AC фирмы CAEN совместно с USB крейт-контроллером WIENER VM-USB. Накопление информации осуществлялось с помощью специально разработанной программы Nucleon Data Acquisition, написанной на языке LabView. Схема эксперимента представлена на рис. 7.

В данном тестовом эксперименте проводились измерения эффективности подавления событий от пучка пионов с энергией 200–350 ГэВ/с при различных пороговых значениях и напряжениях на ФЭУ. Эффективность подавления определялась как отношение числа отобранных триггером событий к полному числу прошедших за это время через установку частиц, которое бралось из показаний пучковых мониторинговых счетчиков. На одной из триггерных плоскостей варьировался порог или напряжение на ФЭУ, а счет событий осуществлялся с другой.

На рис. 8 показана эффективность подавления событий, инициированных пучковыми пионами по триггеру первой триггерной плоскости, в зависимости от высокого напряже-



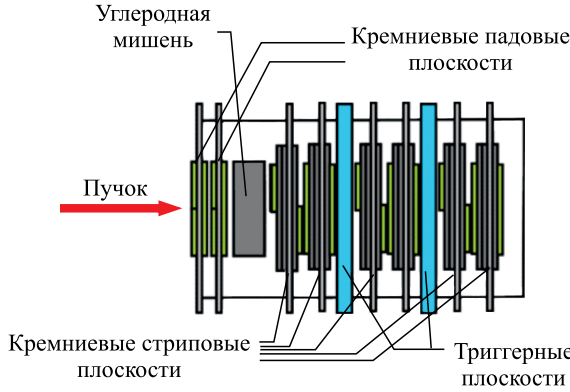


Рис. 7. Схема прототипа детектора «Нуклон» на пучке SPS в ЦЕРН

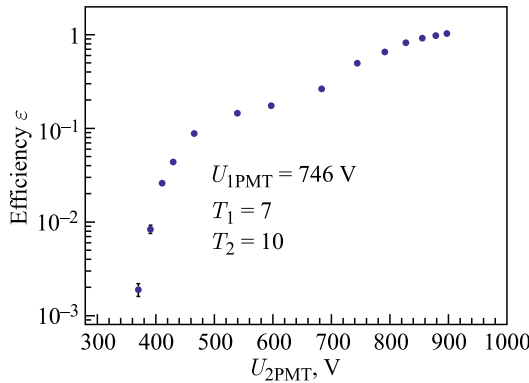


Рис. 8. Эффективность подавления  $\varepsilon$  пионного пучка в зависимости от высокого напряжения  $U_2$

ния  $U_2$  на ФЭУ второй триггерной плоскости. Пороговые значения были зафиксированы на уровне  $T_1 = 7$  и  $T_2 = 10$  условных единиц для первой и второй плоскостей соответственно. Напряжение на ФЭУ второй плоскости  $U_2$  последовательно уменьшалось с 900 до 370 В, в то время как высокое напряжение на ФЭУ первой плоскости  $U_1$  было зафиксировано на уровне 746 В. Как видно из графика, при  $U_2 = 900$  В подавления событий не происходит (вероятность регистрации события  $\approx 100\%$ ). При снижении значения  $U_2$  до 370 В эффективность подавления составила около 0,002 (т. е. было подавлено 99,8% всех событий), чего, однако, недостаточно для успешного проведения космического эксперимента.

Для того чтобы увеличить эффективность подавления событий, было предложено варьировать не только высокое напряжение на ФЭУ, но и пороговые значения триггерной электроники. С этой целью значения  $U_1$  и  $U_2$  были зафиксированы на уровне 413 В, после чего осуществлялось последовательное увеличение порога на второй по пучку плоскости  $T_2$  с 10 до 20 при фиксированном пороговом значении на первой плоскости  $T_1 = 7$ . В результате эффективность подавления изменилась почти в 3 раза: с 0,041 до 0,014 (рис. 9, а). Далее, порог на второй плоскости был поднят до 30 единиц, а порог на первой плоскости последовательно повышался с 15 до 30 единиц (напряжение на ФЭУ для обеих

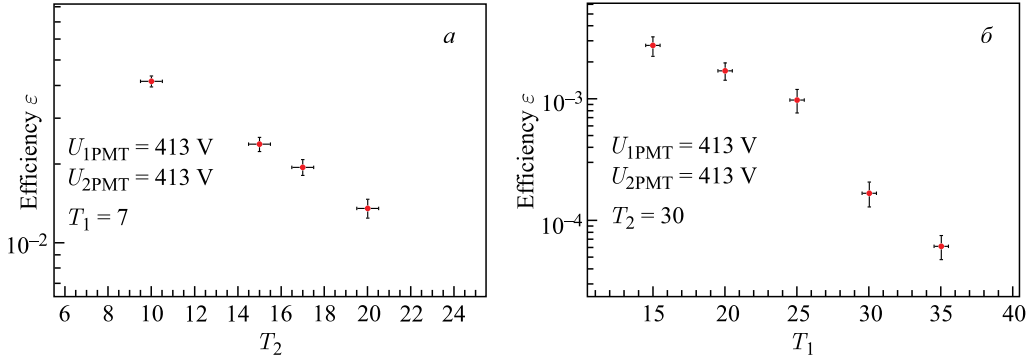


Рис. 9. Эффективность подавления  $\varepsilon$  пионного пучка при различных пороговых значениях

плоскостей по-прежнему было равным 413 В). Как видно на рис. 9, б, эффективность подавления при этом изменилась более чем в 45 раз: с  $2,7 \cdot 10^{-3}$  до  $6 \cdot 10^{-5}$ .

Таким образом, из результатов тестовых экспериментов на пучке SPS в ЦЕРН следует существенный качественный вывод: для достижения уровня подавления  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  для событий от частиц с энергией в сотни гигаэлектронвольт необходимо, помимо регулировки порогов в ССБТ, изменять также высокие напряжения на одноканальных ФЭУ, что и было в дальнейшем реализовано для летного варианта электроники триггерной системы детектора «Нуклон».

**2.2. Комплексный тест летной модели детектора «Нуклон».** Тестирование ССБТ в составе летной модели детектора «Нуклон» проводилось также на пучках электронов и пионов с энергией от 60 до 300 ГэВ ускорителя SPS в ЦЕРН (рис. 10). Детектор устанавливался на специальном поворотном столе, который давал возможность как менять угол падения частиц на регистрирующие плоскости, так и перемещать модель по двум поперечным к пучку направлениям. ССБТ настраивалась на выбор событий, в которых первичная частица взаимодействует в объеме углеродной мишени с образованием ливня вторичных частиц.

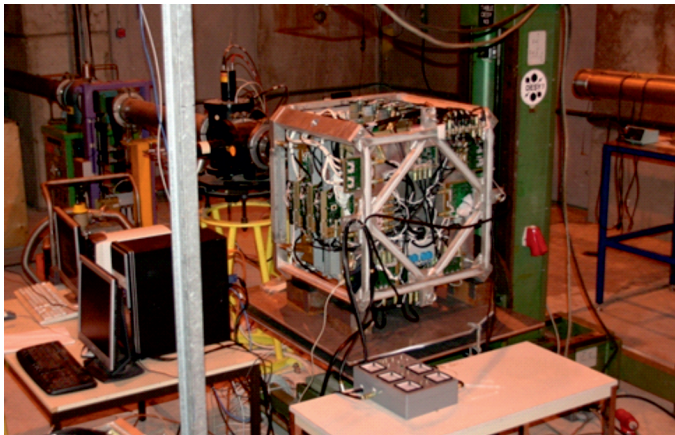


Рис. 10. Летный образец детектора «Нуклон» на тестовом пучке N8 ускорителя SPS в ЦЕРН

В комплексном тесте летной модели детектора на пучке запись сигналов с кремниевых микроstriповых детекторов СИЭ осуществлялась только в том случае, если вырабатывался триггерный сигнал. При увеличении порогов на триггерных плоскостях должно возрастать относительное число событий с большим энерговыделением и множественностью, поэтому можно оценить эффективность триггерной системы, анализируя данные, полученные непосредственно с детекторов СИЭ. Набор данных осуществлялся при высо-

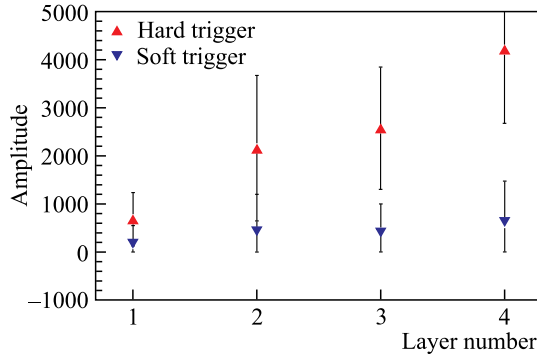


Рис. 11. Суммарные амплитуды событий в последовательно расположенных по пучку кремниевых микроstriповых плоскостях при разных триггерных условиях

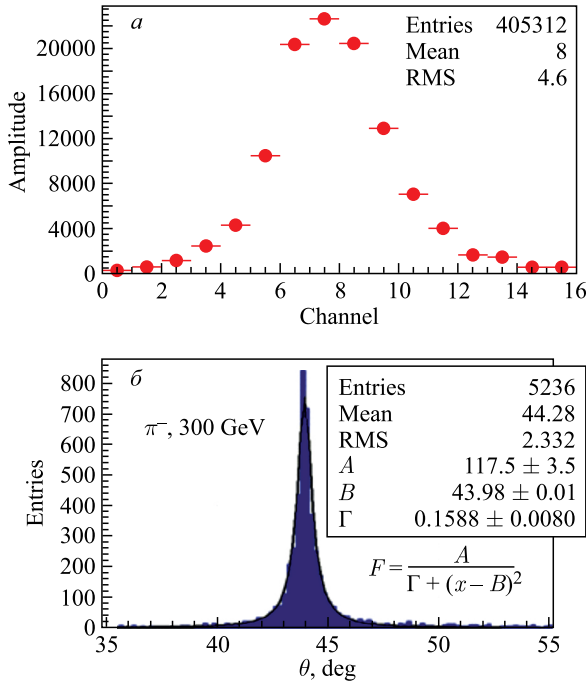


Рис. 12. Измерение профиля вторичных частиц плоскостью ССБТ (а) и углового разрешения детектора «Нуклон» (б)

ком напряжении 680 В на ФЭУ  $U_1$  и  $U_2$ . Устанавливались пороговые значения  $T_1 = 7$  на первой и  $T_2 = 10$  на второй триггерной плоскости, что соответствует «мягкому» триггеру. Если же напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на ФЭУ равны 413 В, то при тех же значениях порогов реализуется вариант «жесткого» триггера. На рис. 11 представлены результаты измерения суммарных амплитуд событий в последовательных кремниевых микростриповых плоскостях СИЭ при мягком и жестком триггерах. Видно, что с ужесточением триггерных условий амплитуда в детекторах СИЭ для отобранных триггером событий, как и следовало ожидать, возрастает.

На рис. 12 представлены некоторые результаты предполетных комплексных тестов детектора «Нуклон». На рис. 12, *а* приведено распределение амплитуд в каналах последней по пучку 16-канальной плоскости ССБТ для событий, отобранных триггерной системой. Вид профиля вторичных частиц соответствует ожидаемому распределению от взаимодействия первичной частицы в мишени детектора. Для оценки углового разрешения аппаратуры детектор был повернут на  $\sim 45^\circ$ . На рис. 12, *б* приведено угловое распределение оси ливня вторичных частиц, восстановленного по измерениям вторичных треков в СИЭ и калориметре. Угловое разрешение детектора  $\sim 2,3^\circ$ , что открывает возможность проведения измерений угловой анизотропии КЛ в исследуемом интервале энергий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектор «Нуклон», предназначенный для исследования КЛ в области  $10^{11} - 5 \cdot 10^{14}$  эВ, разработан с использованием современных детекторов, применяемых в исследованиях по физике высоких энергий. Для отбора событий в круто падающем спектре КЛ в установке имеется система быстрого триггера с многократным резервированием, выполненная на основе мультистриповых сцинтилляционных детекторов. В проведенных испытаниях на пучках SPS в ЦЕРН было показано, что все детекторы и электроника ССБТ надежно работают и обеспечивают подавление адрон-ядерных событий с энергией 300 ГэВ/нуклон на уровне  $10^{-4} - 10^{-5}$ .

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую благодарность Госкорпорации «Роскосмос», при поддержке которой создавался детектор «Нуклон», а также руководству ЦЕРН за предоставление возможности проведения тестов создаваемой аппаратуры на пучках ускорителя SPS.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христиансен Г. Б., Куликов Г. В. Спектр широких атмосферных ливней по числу частиц на уровне моря // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, № 6. С. 353.
2. Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V., Gorbunov N., Filippov S., Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., Merkin M., Pakhomov A., Podorozhny D., Polkov D., Porokhovoy S., Shumikhin V., Sveshnikova L. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 770. P. 189.
3. Chang J. et al. // Astropart. Phys. 2017. V. 95. P. 6;  
DAMPE Collab. // Astropart. Phys. 2019. V. 106. P. 18.
4. Marrocchesi P. S. (CALET Collab.) // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 718. P. 052023.

5. Seo E. S., Anderson T., Angelaszeka D., Baek S. J., Baylon J., Buenerd M., Copley M., Coutu S., Derome L., Fields B., Gupta M., Han J. H., Howley I. J., Huh H. G., Hwang Y. S., Hyun H. J. et al. // *Adv. Space Res.* 2014. V. 53, No. 10. P. 1451.
6. Seo E. S. et al. Advanced Thin Ionization Calorimeter to Measure Ultrahigh Energy Cosmic Rays // *Adv. Space Res.* 1997. V. 19, No. 5. P. 711.
7. Seo E. S., Ahn H. S., Beatty J. J., Marrocchesi P. S., Allison P., Bagliesi M. G., Barbierj L., Bigongiari G., Brandt T. J., Childers J. T., Conklin N. B., Coutu S., Du Vernois M. A., Ganela O., Han J. H., Jeon J. A. et al. // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. P. 1777.
8. Podorozhnyi D. M., Postnikov E. B., Sveshnikova L. G., Turundaevsky A. N. // *Phys. Atom. Nucl.* 2005. V. 68, No. 1. P. 50.
9. Boreiko V., Gorbunov N., Grebenyuk V., Kalinin A., Krumstein Z., Naumov D., Nguen Man Sat, Plotnikova E., Podorozhnyi D., Porokhovoy S., Sabirov B., Sadovsky A., Stolupin V., Tkachenko A., Tkachev L., // *Proc. of the 21st ECRS.* 2008. P. 90;  
Tkachenko A., Boreiko V., Gorbunov N., Grebenyuk V., Kalinin A., Karmanov D., Krumstein Z., Pakhomov A., Podorozhnyi D., Porokhovoy S., Sabirov B., Sadovsky A., Timoshenko A., Tkachev L. // *Proc. of the 31st ICRC.* 2009. P. 1675.
10. Viertel G. M., Capell M. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1988. V. 419. P. 295–299.
11. CDF Collab. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2005. V. 52. P. 879.
12. Wojcik R. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1994. V. 342. P. 416–435.
13. White T. O. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1988. V. 273. P. 820–825.
14. Bulatov V. L., Vlasov A. V., Gorbunov N. V., Grebenyuk V. M., Karmanov D. E., Pakhomov A. Yu., Podorozhnyi D. M., Polkov D. A., Tkachev L. G., Tkachenko A. V., Tarabrin S. P., Turundaevskii A. N., Filippov S. B. // *Instr. Exp. Tech.* 2010. V. 53. P. 29.

Получено 14 июня 2019 г.