Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Прокопенко Николай Николаевич

Мультисекторный сцинтилляционный детектор для установок ШАЛ

Специальность 01.04.23 – Физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-образовательного центра НЕВОД НИЯУ МИФИ Петрухин Анатолий Афанасьевич
Официальные оппоненты:	
доктор физико-математических наук, Шаулов Сергей Борисович	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник Лаборатории адронной физики и астрофизики
доктор физико-математических наук, Просин Василий Владимирович	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, ведущий научный сотрудник отдела космических наук лаборатории наземной гамма-астрономии
кандидат физико-математических наук, Лидванский Александр Сергеевич	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, заведующий лабораторией лептонов высоких энергий, ведущий научный сотрудник

Защита состоится 16 декабря 2020 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: https://ds.mephi.ru федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.01.01,
д.ф.-м.н., профессор — Сергей Евгеньевич Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В экспериментах по изучению широких атмосферных ливней (ШАЛ) были обнаружены особенности в характеристиках космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий (> 10^{15} эВ): изменения в энергетическом спектре и массовом составе, растущий с энергией избыток мюонов в ШАЛ, избыток молодых и старых ливней, большие поперечные импульсы и т.д. Результаты исследований ШАЛ показали, что распределение ливней по числу электронов может быть описано простой степенной функцией

$$n(N_e) \sim N_e^{-\gamma}. \quad (1)$$

В дважды логарифмических координатах функция (1) представляется прямой линией с наклоном γ. Полагая, что число электронов и их полная энергия E_e пропорциональны энергии первичной частицы, можно заключить, что энергетический спектр первичных космических частиц также описывается степенной функцией

$$n(E) \sim E^{-\gamma}. \quad (2)$$

В области ПэВ-ных энергий наблюдается излом (укручение) спектра мощностей широких атмосферных ливней, регистрируемых на поверхности Земли (рис. 1). Известно, что при N_e в интервале 10^5 – 10^6 частиц на уровне моря (E ~ 1 – 10 ПэВ) показатель наклона спектра γ изменяется от величины ~ 1,7 до значения 2,0 – 2,1. Этот результат был получен во многих экспериментах, а само явление получило название «излом» энергетического спектра, а в английском the knee – колено.

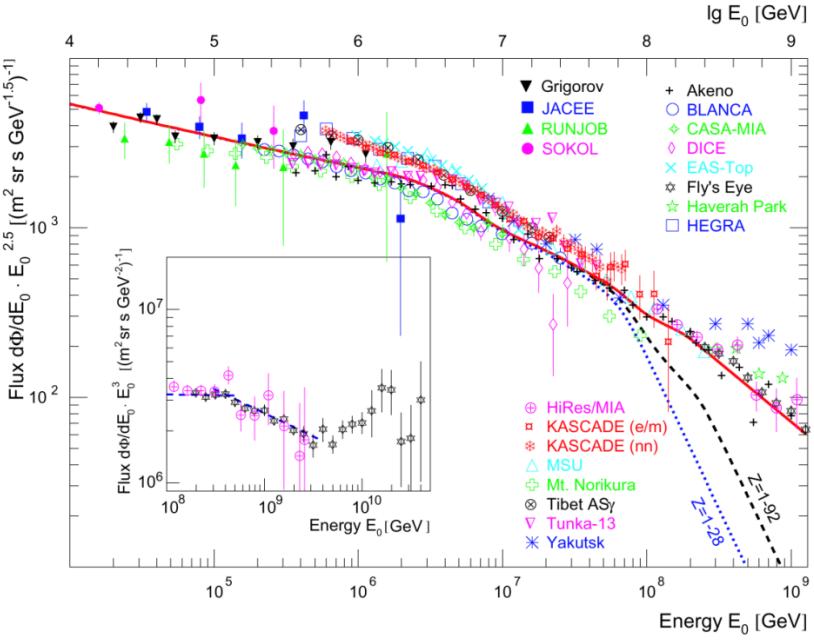

Рис. 1. Компиляция данных по энергетическому спектру ПКИ.

В принципе, возможны три интерпретации этого излома. Первая – феноменологическая, связана с процессами развития ШАЛ в атмосфере Земли, а именно – с радикальной перестройкой структуры ШАЛ на уровне моря при энергии порядка 100 ТэВ/нуклон. Вторая – космофизическая, связывает его с изменением спектра и (или) состава первичных космических лучей и третья – ядернофизическая, связана с изменением характеристик взаимодействия частиц при таких больших энергиях, в том числе и включение новых физических процессов (частиц или состояний материи). И хотя в мире было создано много установок для исследования различных компонент широких атмосферных ливней, тем не менее, до сих пор нет общепринятого объяснения причин появления излома.

В основе метода ШАЛ лежит решение обратной задачи: восстановление параметров потока ПКЛ (энергетический спектр, массовый состав и др.) по откликам детекторов, входящих в состав установки. Однако большинство характеристик ШАЛ одновременно зависит от многих неизвестных и, кроме того, от модели адрон-ядерных взаимодействий, параметры которых получаются на основе экстраполяции ускорительных данных в область сверхвысоких энергий, где такие данные отсутствуют. Проблему определения энергетического спектра и состава космических лучей сверхвысоких энергий, а также основных характеристик адронных взаимодействий, пытаются решить путем анализа и сопоставления данных по различным компонентам ШАЛ, которые одновременно регистрируются в многочисленных экспериментах, нацеленных на изучение разных областей энергий первичных частиц – от 10^{14} до 10^{20} эВ, обладающих различной чувствительностью к неизвестным параметрам потока КЛ.

Площади современных установок для исследования ШАЛ достигли сотен и тысяч квадратных километров. Размеры этих установок растут с увеличением энергии первичного космического излучения (ПКИ). Для исследований энергетической области вокруг «излома» спектра развертываются установки ШАЛ площадью 0,01 – 1 км^2, для исследования области «второго колена» – 1 – 10 км^2, а области обратного изгиба – 10 – 100 км^2. Для исследования ПКИ предельно высоких энергий (область ГЗК обрезания спектра) ливневые установки располагаются на территории более 1000 км^2.

Большинство исследователей придерживается космофизической гипотезы происхождения «излома», аргументируя это наличием характерного «излома» во всех компонентах ШАЛ, которые регистрируются существующими установками. Однако, величина наблюдаемого «излома» в различных компонентах противоречит гипотезе об «изломе» первичного спектра, т.к. в этом случае должно быть вполне определенное соотношение между ними, а именно – «излом» в адронной и мюонной компонентах должен быть больше, чем в электромагнитной. Экспериментально же наблюдается обратная картина, что свидетельствует в пользу ядернофизического объяснения «излома», где предсказывается именно такое поведение. Наконец,

за рамками исследований осталась еще одна важная характеристика – энергия мюонной компоненты. В отличие от электронно-фотонной или адронной компонент ШАЛ, которые быстро теряют свою энергию на образование каскадных ливней, мюоны сохраняют полученную при рождении энергию и медленно ее диссипируют только при прохождении через большие толщины вещества. Поэтому, если в результате включения новых физических процессов образуются мюоны (и соответственно, нейтрино) высоких и сверхвысоких энергий (10 – 100 ТэВ и выше), то такие частицы не могут быть идентифицированы существующими в настоящее время установками для изучения ШАЛ. Перераспределение энергии между различными компонентами ливней в пользу мюонов и нейтрино приведет к недооценке энергии первичных частиц и появлению «излома» в спектре космических лучей, поскольку характеристики первичных частиц определяются на основе измеряемых параметров ШАЛ.

Измерение энергии мюонов в области выше 10 ТэВ является нетривиальной задачей, для решения которой требуются прецизионные установки большого масштаба. В период выполнения данной работы существовало два детектора, способных оценить энергию мюонов или их энерговыделение: большой жидкоаргоновый спектрометр БАРС (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, г. Протвино) и нейтринный водный детектор НЕВОД (НИЯУ МИФИ, г. Москва). Для этих двух детекторов и были разработаны предложения экспериментов по исследованию энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ.

В спектрометре БАРС возможна оценка энергии одиночных мюонов методом парметра. В детекторе НЕВОД возможно измерение энерговыделения групп мюонов, количество и пространственное распределение которых измеряется координатно-трековым детектором ДЕКОР. Для привязки энергетических характеристик мюонной компоненты и их изменений к энергии ПКИ необходима оценка энергии ШАЛ традиционным методом по распределению заряженной компоненты вокруг оси ШАЛ.

При регистрации мюонной компоненты ШАЛ под большими зенитными углами появляется дополнительное требование, связанное с небольшим количеством регистрируемых частиц. Если количество регистрируемых частиц велико, то важна только средняя однородность детектора, т.к. сигналы от частиц, попавших в точки детектора с разной эффективностью, автоматически усредняются. А если частиц мало, то становится важным вопрос о разбросе эффективности и требования к однородности отклика детектора существенно возрастают. Но при этом требование к временному разрешению не снижается, а наоборот усиливается. Так как главной задачей установок ШАЛ в экспериментах БАРС-ШАЛ и НЕВОД-ШАЛ является оценка энергии первичных частиц, при которых появляются мюоны высоких и сверхвысоких энергий, а не детальное исследование ШАЛ, то нет необходимости создавать плотные дорогостоящие установки с большим количеством детекторов. А в этом случае, требование к временному разрешению

каждого детектора существенно возрастает. Таким образом, для решения поставленной задачи требуется создание детекторов с наилучшим соотношением однородность – временное разрешение. Их использование в ливневых установках для измерений в широком диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0) обеспечит необходимую точность оценки энергии частиц ПКЛ. При работе с комплексом НЕВОД-ДЕКОР, в котором для оценки энергии первичных частиц используется метод спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ), возможно, решение ещё одной задачи, а именно проведение калибровки метода СЛПМ, что в свою очередь значительно расширит возможности ЭК НЕВОД в мультикомпонентных исследованиях ШАЛ.

Цель работы

Разработка и создание мультисекторных сцинтилляционных детекторов, имеющих одновременно высокую однородность светосбора (90%) и временное разрешение (1 нс) и обеспечивающих регистрацию ШАЛ в полном диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0).

Научная новизна

Впервые для регистрации ШАЛ в широком диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0) созданы два варианта мультисекторных сцинтилляционных детектора с использованием для светосбора спектросмещающих полосок и оптоволокна с рекордными соотношениями однородность – временное разрешение (90 %, 0,88 нс).

Достоверность

1. Исследование характеристик, тестирование и настройка сцинтилляционных детекторов, их элементов и регистрирующей электроники проводились с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

2. Измерение неоднородности светосбора сцинтилляционных детекторов проводилось с использованием сертифицированного радиоактивного источника Sr^{90} и с помощью мюонного годоскопа УРАГАН, прошедшего метрологические испытания и имеющего высокую пространственную и угловую точность регистрации мюонов (соответственно 1 см и 0,8°).

Практическая значимость

1. Созданные детекторы, обеспечивающие высокую эффективность регистрации ШАЛ в широком диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0), будут включены в состав Экспериментального комплекса НЕВОД-ШАЛ, что позволит повысить точность оценки энергии частиц ПКЛ методом спектров локальной плотности мюонов, а также провести его калибровку, что в свою очередь значительно расширит возможности ЭК НЕВОД в мультикомпонентных исследованиях ШАЛ.

2. Результаты работы, в первую очередь конструкторские решения, методы и стенды для тестирования и настройки детектирующих элементов и регистрирующей электроники, будут использованы при расширении установки НЕВОД-ШАЛ.

3. Опыт создания детекторов для установок ШАЛ с требуемыми характеристиками, а также методики и методы исследования, примененные при создании детекторов (методика отбора сцинтилляционных пластин и переизлучателей, методика получения диаграмм рассеяния света переизлучателями, методы проверки неоднородности пластин, калибровки фотоэлектронных умножителей и спектрометрических трактов), могут быть использованы при создании новых детекторов для регистрации различных компонент ШАЛ.

Личный вклад

Все работы по диссертации были выполнены лично автором, либо при его определяющем участии. Непосредственно автором:

- разработаны сцинтилляционные детекторы с рекордными характеристиками по соотношению однородность – временное разрешение для регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ, позволяющие регистрировать ШАЛ в широком диапазоне зенитных углов ($0^0 – 90^0$);
- созданы стенды для исследования основных характеристик сцинтилляционных детекторов для регистрации ШАЛ;
- исследованы характеристики сцинтилляционных счетчиков, их составных элементов, фотоэлектронных умножителей и регистрирующей электроники;
- получены и проанализированы методические и физические результаты, подготовлены основные публикации.

Автор защищает

1. Разработанные мультисекторные сцинтилляционные детекторы для двух установок: БАРС-ШАЛ и НЕВОД-ШАЛ.

2. Созданные стенды, методы и результаты тестирования и настройки сцинтилляционных детекторов, их элементов, фотоэлектронных умножителей и регистрирующей электроники.

3. Характеристики двух вариантов сцинтилляционных детекторов, полученные при проведении их исследований (однородность 90 %, временное разрешение 0,88 нс).

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: 28-й Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2004), 29-й Международной конференции по космическим лучам (ICRC 2005); 12-й Международной конференции по методике экспериментов на встречных пучках (INSTR-2017), 1-ом Международном симпозиуме по космическим лучам и астрофизике (ISCRA-2017), научных сессиях НИЯУ МИФИ (2002), а также

опубликованы в журналах: «Известия РАН. Серия физическая», 2005, том 69, стр.: 391-393; «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A», 2009, том 598, стр.: 296-299; «Journal of Instrumentation», 2017, том 12, C07004 и сборниках трудов конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, двух разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Объем диссертации: 124 страницы, 113 иллюстраций, 14 таблиц, 67 наименований источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении представлены основные проблемы, связанные с исследованиями широких атмосферных ливней, а также описаны используемые ранее и в настоящее время детекторы и установки для регистрации и изучения ШАЛ. Отражена цель работы, научная новизна и актуальность создания нового мультисекторного сцинтилляционного детектора (МСД) для ливневых установок двух экспериментов БАРС-ШАЛ и НЕВОД-ШАЛ.

В первом разделе описан полный цикл работ по разработке, созданию и исследованию основных характеристик мультисекторного сцинтилляционного детектора (МСД) для ливневой части эксперимента БАРС-ШАЛ, целью которого является поиск новых физических процессов генерации мюонов в космических лучах. Представлены и описаны основные детектирующие элементы установки, которыми являются Большой жидкоаргоновый спектрометр БАРС (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, г. Протвино) и ливневая установка, состоящая из распределенной сети сцинтилляционных детекторов, каждый с рабочей площадью 1 $м^2$.

Также описывается устройство и принцип работы стендов для тестирования элементов МСД, сборки и настройки, приведены результаты исследования характеристик сцинтилляторов, переизлучателей, фотоумножителей (ФЭУ), а также представлены результаты исследования неоднородности МСД.

Мультисекторный сцинтилляционный детектор для ливневой установки комплекса БАРС-ШАЛ обеспечивает высокую эффективность регистрации ШАЛ под большими зенитными углами (45^0 – 90^0), имеет форму правильного восьмиугольника, разделенного на сектора (трапециевидной формы), между которыми проложены переизлучатели света, сводимые в центр детектора, где размещается ФЭУ-115м. Он имеет мультищелочной фотокатод с диаметром рабочей площади 25 мм и 12-динодную систему усиления, материал динодов: Al-Mg-Sr-Ti, материал окна стекло: C95-2, материал фотокатода Sb-K-Na-Cs, смещенный максимум чувствительности фотокатода в зеленую область видимого спектра. Съем сигнала с ФЭУ возможен с 2 динодов (7 и 12) для увеличения динамического диапазона. Полезная площадь регистрации составляет 1 $м^2$. В качестве

сцинтиллятора используется пластический сцинтиллятор толщиной 20 мм марки СОФГ-120 и переизлучатель марки СОФЗ-105. Временное разрешение детектора составляет (0,88 нс), а необходимый уровень неоднородности ($К_{неодн.}$~ 0,09) достигается комбинированием светоотражающих и светопоглощающих материалов (применение затемняющей «маски»). Внешний корпус детектора изготовлен из оцинкованной стали толщиной 1 мм и имеет цилиндрическую форму, что обеспечивает достаточную жесткость конструкции и изолирует от внешних условий, а также играет роль дополнительной светоизоляции. В конструкции детектора предусмотрена поворотная рама, позволяющая изменять ориентацию положения детектора относительно своей оси, что позволяет проводить измерения ШАЛ под большими зенитными углами.

Разработанный мультисекторный сцинтилляционный детектор для эксперимента БАРС-ШАЛ представлен на рисунке 2.

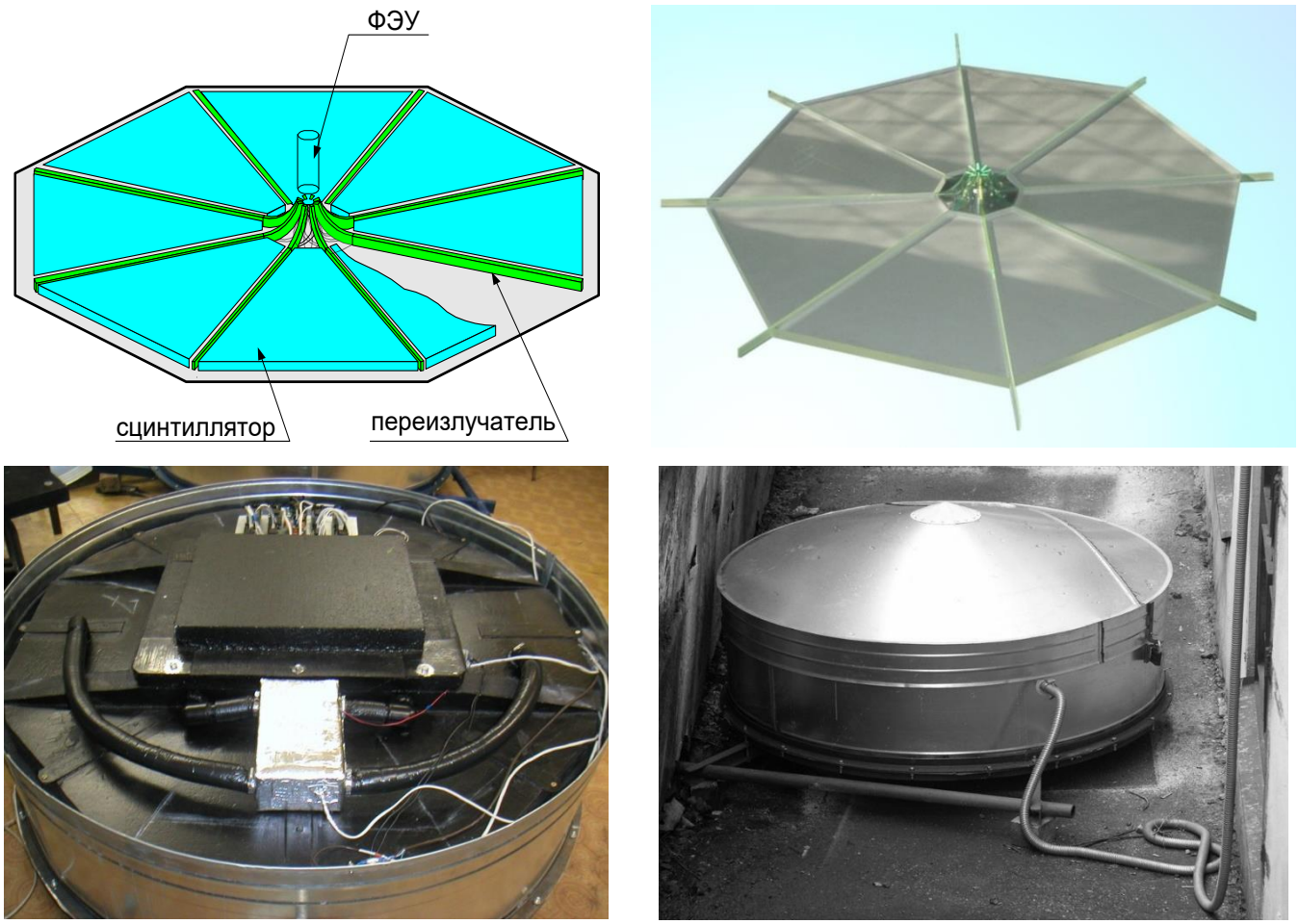

Рис. 2. Мультисекторный сцинтилляционный детектор для эксперимента БАРС-ШАЛ. Сверху: модель детектора и сборка секторов, снизу: общий вид в полномасштабной сборке.

При разработке и создании МСД БАРС-ШАЛ были проведены исследования оптимального количества сцинтилляционных пластин, их однородности, световых потерь переизлучателей, основных характеристик ФЭУ, а также сборка, тестирование и настройка детектора.

Выполнены исследования основных характеристик МСД на специализированном стенде, измерена степень неоднородности сцинтилляционного детектора, а также выбран оптимальный способ передачи света со световодов-переизлучателей (шифтеров) на ФЭУ. Измерения по исследованию неоднородности детектора проводились на специализированном стенде на 1/8 части детектора (1 пластина) при помощи радиоактивного источника Sr^{90}. Пластина сцинтиллятора оборачивалась сверху и снизу в специальную «маску», состоящую из комбинации светоотражающих (тайвек) и светопоглащающих материалов. Переизлучатели устанавливались на малом расстоянии от пластины (~1 мм), а их дальние концы от ФЭУ проклеивались отражающим материалом с коэффициентом отражения ~95% (майларом) для увеличения амплитуды световыхода. Использовались загнутые с одного конца переизлучатели света с радиусом загиба ~ 10 см. С изогнутых концов переизлучателей снимался световой сигнал, который регистрировался ФЭУ-115м в токовом режиме (измерялось напряжение на выходе с анода). На рисунке 3 показаны относительные амплитуды световыходов от разных точек пластины сцинтиллятора с использованием затемняющей «маски».

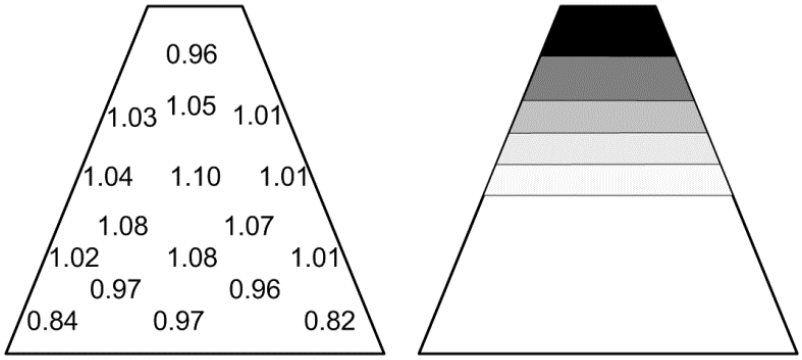

Рис. 3. Амплитуда отклика сигнала для пластины мультисекторного сцинтилляционного детектора с использованием затемняющей «маски» и вид затемняющей «маски».

Коэффициент неоднородности вычислялся по следующей формуле:

$$К_{неодн.} = \frac{\sigma}{\overline{A}}, \qquad (3)$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i - \overline{A})^2}{n-1}}$ – среднеквадратичное отклонение, $\overline{A}$ – среднее значение амплитуды отклика по всей пластине. На основании проделанных измерений по изучению неоднородности светосбора для сектора 8-секционного МСД БАРС-ШАЛ был получен коэффициент неоднородности $К_{неоодн.} = 0{,}07 \pm 0{,}01$.

Для изучения неоднородности всего МСД БАРС-ШАЛ было изготовлено необходимое количество пластин сцинтилляторов и переизлучателей.

Для каждой из пластин по описанной выше методике были проведены измерения неоднородности с использованием радиоактивного источника Sr^{90}. Результаты измерений представлены в таблице 1. Усредненное значение неоднородности по всем секторам для восьмисекционного прототипа составило (9 ± 1)%.

Таблица 1. Измерения неоднородности пластин восьмисекционного МСД.

N пластины	1	2	3	4	5	6	7	8
$k_{неодн.}$,%	8 ± 1	10 ± 1	8 ± 1	9 ± 1	10 ± 1	10 ± 1	8 ± 1	10 ± 1

При тестировании ФЭУ исследовались следующие параметры: коэффициент усиления динодной системы; диапазон линейности; темновые шумы и разброс задержек времен срабатывания (джиттер) ФЭУ при одноэлектронной подсветке.

Были получены зарядовые спектры в режиме одноэлектронной подсветки (рис. 4). На зарядовом спектре одноэлектронной подсветки фотокатода видны разделяющиеся пики. Левый пик соответствует пьедесталу (шумовые события ФЭУ), а правый пик соответствует распределению зарядов, полученных в режиме регистрации одиночных фотоэлектронов. График фитировался с помощью функции 2-х Гауссов по формуле:

$$y = y_0 + \frac{A_1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-Q_p)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{A_2}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-Q_{1e}-Q_p)^2}{2\sigma_2^2}}, \quad (4)$$

где Q_p – среднее значение заряда пьедестала, Q_{1e} – среднее значение заряда одноэлектронного пика, σ_1 и σ_2 – среднеквадратичные отклонения первого и второго пиков, A_1 и A_2 – площади первого и второго распределения Гаусса.

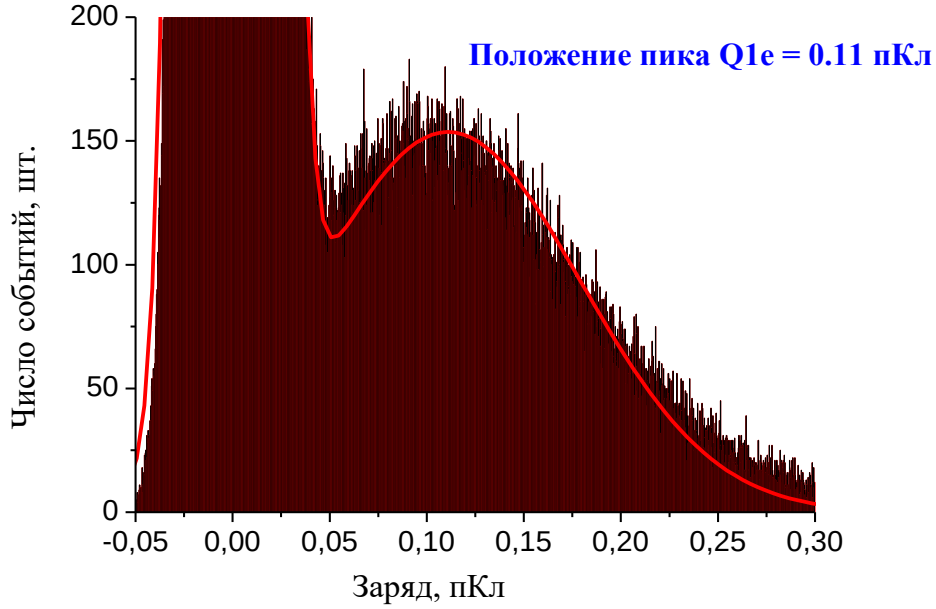

Рис. 4. Зарядовый спектр при одноэлектронной подсветке фотокатода ФЭУ-115м для напряжения питания 2100 В.

Коэффициент усиления динодной системы ФЭУ (М) вычислялся по формуле:

$$M = \frac{\bar{Q}_{1e}}{q_e}, \quad (5)$$

где $\bar{Q}_{1e}$ – среднее значение заряда одноэлектронного пика; q_e – заряд электрона.

Для нескольких напряжений питания ФЭУ-115м были измерены коэффициенты усиления М (табл. 2).

Таблица 2. Измеренные коэффициенты усиления (М) ФЭУ-115м для различных значений напряжения питания.

Напряжение питания ФЭУ-115м, В	Коэффициент усиления ФЭУ-115м (М), 10^6
2000	0,45
2100	0,70
2200	0,88

Было выбрано рабочее напряжение питания ФЭУ-115м, которое составило $U_{пит.}$=2100 В, при этом коэффициент усиления составил величину М=0,70×10^6.

Динамический диапазон детектора, то есть максимальное количество заряженных частиц, которое может быть им зарегистрировано, во многом определяется диапазоном линейности используемого фотоумножителя. Определение диапазона линейности ФЭУ основано на методе парных подсветок. В данном методе фотокатод ФЭУ подсвечивают двумя светодиодами. На каждом шаге средний заряд отклика фотоумножителя измеряется три раза: набираются спектры при подсветке сначала только первым светодиодом – Q_1, затем только вторым – Q_2, после этого ФЭУ засвечивается двумя одновременно – Q_{12}. Интенсивность подсветки светодиодов постепенно увеличивается на каждом последующем шаге. В области линейности отклик ФЭУ на подсветку двумя источниками должен быть равен сумме откликов на подсветку первым и вторым источником по отдельности. В качестве критерия для оценки диапазона линейности использовался коэффициент нелинейности α:

$$\alpha = \frac{Q_{12} - Q_1 - Q_2}{Q_1 + Q_2}, \quad (6)$$

где, Q_{12} – заряд при подсветке двумя светодиодами одновременно, Q_1 и Q_2 – заряды при подсветке светодиодами по отдельности. Область линейности определялась из условия $|\alpha| \leq 0{,}05\%$.

Были получены зависимости коэффициента нелинейности α от заряда при подсветке двумя светодиодами одновременно для 12-го и 7-го динодов ФЭУ-115м. Верхний диапазон линейности для 12-го динода заканчивается на 2000 пКл и на 60 пКл для 7-го динода. С учетом коэффициента сшивки, т.е. отношения зарядов 12-го к 7-му диноду в области линейности обоих динодов ($K=Q_{12}/Q_7$=118), верхний диапазон линейности продлевается за счет 7-го динода путем умножения его зарядов на коэффициент сшивки и достигает 8000 пКл.

Разброс времени срабатывания ФЭУ (джиттер) оказывает влияние на точность определения времени срабатывания сцинтилляционного счетчика при регистрации частиц. Данная характеристика измерялась параллельно с настройкой коэффициента усиления динодной системы фотоумножителей. При измерении спектров откликов ФЭУ при одноэлектронной подсветке для каждого срабатывания фотоумножителя, кроме заряда, определялся и момент превышения сигналом программного порога 2 мВ относительно момента прихода триггерного сигнала от контроллера подсветки.

Джиттер ФЭУ определялся, как полная ширина на полувысоте (FWHM) распределения временных задержек срабатывания фотоумножителя, относительно момента прихода триггерного сигнала и составил 12 нс.

Еще одним важным параметром детектора при регистрации электромагнитной компоненты ШАЛ является получение количественной характеристики амплитудного сигнала на прохождение мюона, измеренного в фотоэлектронах, что позволяет оценить динамический диапазон детектора. Такая характеристика изучалась на стенде, схема которого приведена на рисунке 5.

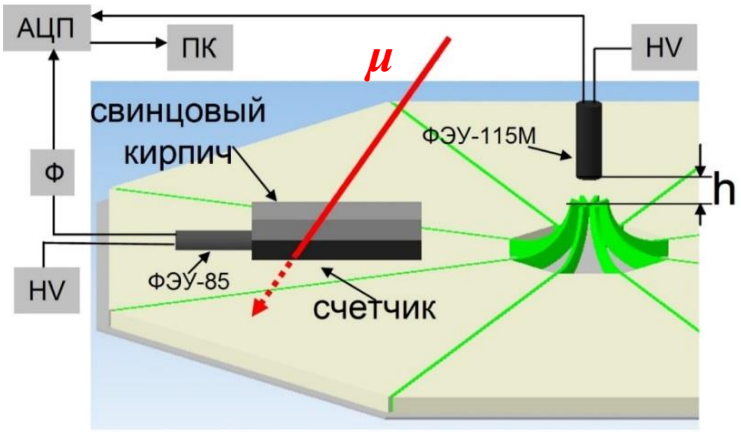

Рис. 5. Стенд для изучения характеристик мультисекторного сцинтилляционного детектора БАРС-ШАЛ.

В состав стенда входит: усилитель (VME, FastAmplifier, Mod. V974); АЦП (VME, Mod.V1729); формирователь (ВЕКТОР, модель Ф-133); сцинтилляционный счетчик; источник высоковольтного напряжения (HV Stanford Research Systems PS-325); персональный компьютер (ПК) с установленной программой для обработки данных.

В светоизолированном боксе на одной из сцинтилляционных пластин МСД располагается сцинтилляционный счетчик, представляющий собой светоизолированную пластину сцинтиллятора размером 20×10×2 $см^3$ с приставленным к торцу ФЭУ-85. Сигнал на ФЭУ-85, возникающий при попадании на фотокатод ФЭУ фотонов сцинтилляционной вспышки от заряженной частицы, пересекающей счетчик, вырабатывает сигнал на формирователе, после чего инициируется запуск АЦП. Сверху счетчик закрыт свинцом толщиной 5 см, для отсечения низкоэнергетических электронов, летящих с верхней полуплоскости. Триггерным условием стенда

является срабатывание счетчика, по сигналу от которого открываются временные ворота 100 нс, в течение которых анализируется сигнал с детектора и посылается на АЦП.

Форма импульса сигнала, оцифрованная сканирующим АЦП, считывается и посылается в память компьютера и анализируется программой обработки данных. По осциллограмме определяется заряд сигнала. По полученным значениям зарядов сигнала строятся спектры. На рисунке 6 приведен пример зарядового спектра (в случае расположения перизлучателей вплотную к ФЭУ-115м), полученного для МСД БАРС-ШАЛ. На спектре видно два разделяющихся пика, левый пик соответствует заряду пьедестала, а правый пик заряду прошедших частиц через счетчик и детектор. Из распределения видно, что положение пика находится в области ~ (22 ± 2) ф.э.

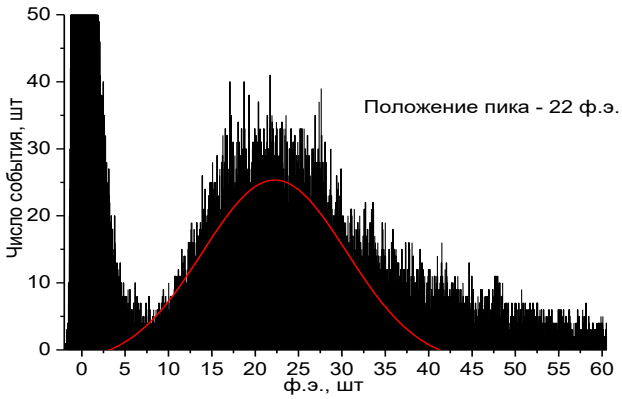

Рис. 6. Зарядовый спектр для МСД БАРС-ШАЛ.

Таким образом, для мультисекторного детектора БАРС-ШАЛ был измерен сигнал от прохождения одиночного мюона, который составил (22 ± 2) ф.э., что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к разработке детектора ливневой части установки БАРС-ШАЛ.

В результате был разработан мультисекторный сцинтилляционный детектор для ливневой установки комплекса БАРС-ШАЛ, удовлетворяющий требованиям эксперимента и обеспечивающий высокую эффективность регистрации ШАЛ под большими зенитными углами ($45^0 – 90^0$). Детектор имеет форму правильного восьмиугольника, разделенного на сектора, между которыми проложены переизлучатели света, сводимые в центр детектора, где размещается ФЭУ-115м. В качестве сцинтиллятора используется пластический сцинтиллятор марки СОФГ-120 и переизлучатель СОФЗ-105. Это обеспечивает требуемое временное разрешение, а необходимый уровень неоднородности $К_{неодн.} = (0,09 \pm 0,01)$ достигается комбинированием светоотражающих и светопоглощающих материалов.

Во втором разделе описаны работы по разработке, созданию и исследованию основных характеристик мультисекторного сцинтилляционного детектора (МСД) для второй очереди ливневой части установки НЕВОД-ШАЛ. Дано описание установок экспериментального комплекса НЕВОД-ШАЛ. Проведены измерения направления прихода ШАЛ и получены распределения по косинусу зенитного θ и азимутального φ углов зарегистрированных ШАЛ.

Также описывается устройство и принцип работы стендов для тестирования элементов МСД, сборки и настройки, приведены результаты исследования характеристик сцинтилляторов, фотоумножителей (ФЭУ), а также представлены результаты исследования однородности МСД и временных характеристик кластера.

Установка НЕВОД-ШАЛ предназначена для регистрации классическим методом электронно-фотонной компоненты ШАЛ в диапазоне энергий от 10^{15} до 10^{17} эВ и реконструкции положения осей ливней, их мощности и направлений прихода. В 2014-2016 годах была создана и введена в эксплуатацию центральная часть (1-я очередь) ливневой установки НЕВОД-ШАЛ, которая включает 9 кластеров с характерными размерами 15×15 м^2, размещенных на площади 10^4 м^2. Расстояние между центрами соседних кластеров – около 30 м. Кластер состоит из 4 детектирующих станций (ДС), каждая из которых состоит из 4 сцинтилляционных счетчиков частиц электронно-фотонной компоненты ШАЛ. В качестве детекторов центральной части установки НЕВОД-ШАЛ используются сцинтилляционные счетчики частиц электронно-фотонной компоненты широких атмосферных ливней, которые ранее работали в экспериментах EAS-TOP и KASCADE-Grande.

Основным недостатком центральной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ является ее малый интервал регистрируемых зенитных углов. Поэтому для расширения интервала регистрируемых зенитных углов создаются дополнительные кластеры периферийной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ (2 очередь). Схема расположения периферийной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ показана на рисунке 7. Общая площадь создаваемой установки составит ~ 2×10^5 м^2.

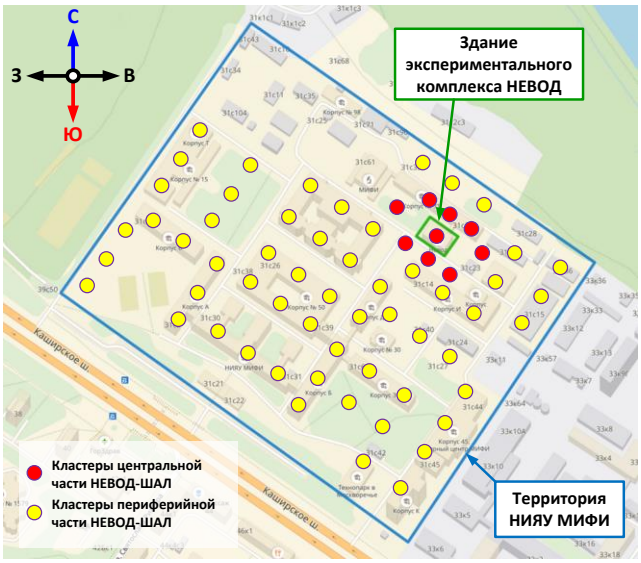

Рис. 7. Схема размещения установки НЕВОД-ШАЛ на территории НИЯУ МИФИ.

Периферийная часть разрабатывается на основе новых счетчиков частиц, которые должны обладать малой неоднородностью ($К_{неодн.}$ ~10 %) при площади детектора ~1 м^2, хорошим

временным разрешением (~ 1 нс), иметь широкий динамический диапазоном регистрируемых частиц (до 10^4) и работать в единой системе сбора данных, организованных для центральной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ.

В отличие от эксперимента БАРС-ШАЛ, в котором калориметрические свойства спектрометра БАРС могли использоваться только для частиц, приходящих под большими зенитными углами ~ (45° – 90°), в эксперименте НЕВОД-ШАЛ черенковский водный калориметр имеет 4π-геометрию и может измерять энерговыделение частиц и каскадных ливней во всем диапазоне зенитных и азимутальных углов. Поэтому для эксперимента НЕВОД-ШАЛ разработанные счетчики должны обеспечивать регистрацию ШАЛ в диапазоне углов от 0° до 90°.

В качестве рабочей модели детекторов периферийной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ рассматривался уже созданный мультисекторный сцинтилляционный детектор ливневой установки БАРС-ШАЛ. Учитывая, что в последнее время новой тенденцией в развитии детекторов ШАЛ является использование для сбора света со сцинтилляционных пластин спектросмещающих волокон (что существенно упрощает конструкцию детектора и улучшает его характеристики по светосбору и однородности), то была проведена работа по модернизации сцинтилляционного детектора БАРС-ШАЛ с целью улучшения его характеристик и использования в эксперименте НЕВОД-ШАЛ.

Мультисекторный сцинтилляционный детектор НЕВОД-ШАЛ повторяет основные принципиальные конструктивные особенности детектора БАРС-ШАЛ и представляет собой детектор из восьми трапециевидных сцинтилляционных сборок, расположенных в форме правильного восьмиугольника (рис. 8).

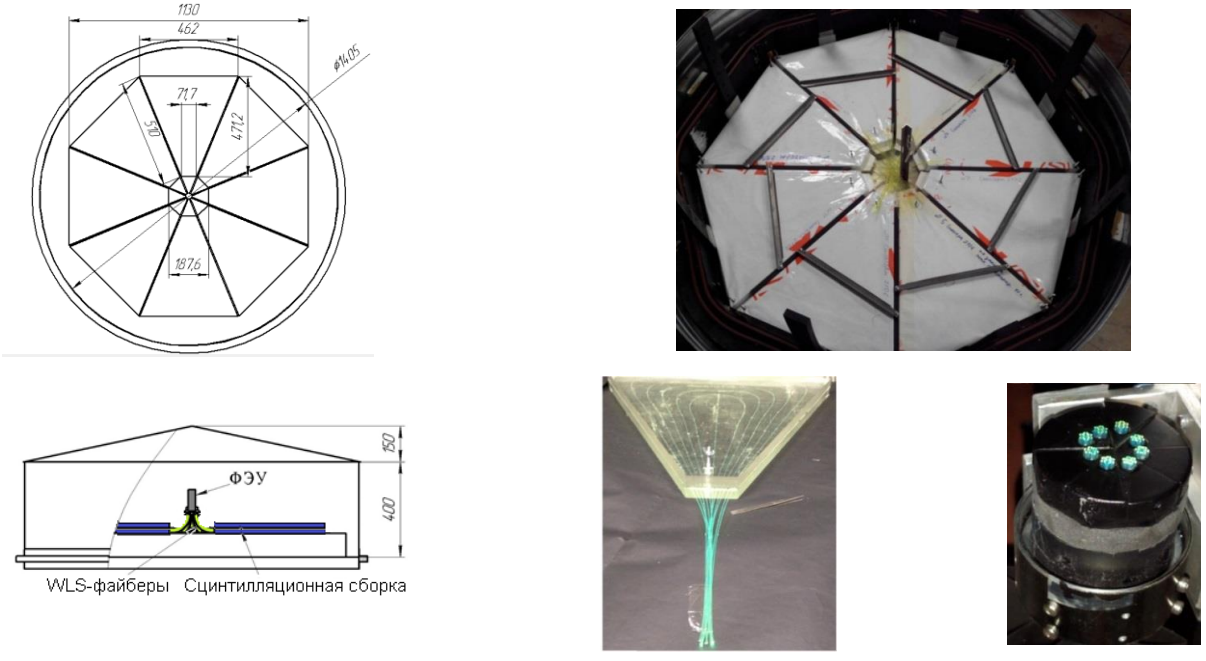

Рис. 8. Мультисекторный сцинтилляционный детектора НЕВОД-ШАЛ. Слева: чертеж детектора, справа: основные элементы: сборка пластин с волокном и крепление волокон с помощью оптического разъема.

Сцинтилляционная сборка состоит из двух сцинтилляционных пластин марки СОФГ-120, каждая толщиной 20 мм, между которыми расположен слой силикона «Силагерм 2106» производства компании «Технология-Пласт» с вклеенными оптическими волокнами марки Kuraray Y11, которые сводятся в центр детектора на ФЭУ-115м. Общая площадь детектора составляет 1 $м^2$. Пластины обёрнуты с обеих сторон диффузно-отражающим материалом – тайвеком для уменьшения потерь фотонов от сцинтилляционных вспышек. Внешний корпус детектора аналогичен детектору БАРС-ШАЛ. Мультисекторный сцинтилляционный детектор для 2-й очереди ливневой установки НЕВОД-ШАЛ позволяет регистрировать ШАЛ в широком диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0), благодаря использованию в конструкции детектора поворотной рамы.

Определение положения оси ливня и оценка энергии основаны на анализе распределения энерговыделений частиц ШАЛ, прошедших через детекторы. Поэтому для корректной оценки энерговыделения нужно знать зависимость отклика детектора от места прохождения частицы через рабочий объем сцинтиллятора (неоднородность светосбора). Так как концентрация оптических волокон в сцинтилляторе увеличивается к краю пластины, максимально приближенному к ФЭУ, то соответственно, в сцинтилляционной сборке существует неоднородность светосбора по площади.

Измерение неоднородности светосбора сцинтилляционных счетчиков периферийной части установки НЕВОД-ШАЛ проводилось с помощью супермодуля мюонного годоскопа УРАГАН. Принцип калибровки заключается в регистрации тестируемым детектором мюона, трек которого определяется по данным детектора УРАГАН с высокой угловой (1 градус) и пространственной (1 см) точностью. Определяются координаты пересечения треком плоскости, проходящей через чувствительный объем тестируемого детектора и параллельной верхней регистрирующей плоскости детектора УРАГАН. Программа реконструкции выделяет треки с зенитными углами не более 10 градусов (околовертикальные мюоны). Вся площадь регистрирующей поверхности в пределах тестируемой детектирующей системой УРАГАН области разбита на ячейки с размерами 2×2 $см^2$. В ячейку, в которую попали координаты точки пересечения трека с плоскостью, прибавляется единица, при этом, дополнительно в отдельных массивах в соответствующей ячейке суммируется сигнал с ФЭУ сцинтилляционной сборки (вычисляется заряд Q в пКл – площадь под кривой, описывающей сигнал). Затем значения в ячейках суммированных зарядов делятся на количество событий в каждой ячейке. Таким образом, строятся матрицы средних зарядов отклика сцинтилляционной сборки (детектора) по площади сборки – «мюонографии». Неоднородность сборки рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{\sigma}{\overline{Q}} \qquad (7)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение среднего заряда по всем ячейкам, $\bar{Q}$– средний заряд по всем ячейкам.

С помощью этих матриц, используя формулу (7), можно оценить неоднородность детектора.

На верхних и боковых графиках рисунка приведены значения заряда отклика, отнесенного к усредненному по площади сцинтиллятора заряду, в двух взаимно перпендикулярных разрезах. На матрице области разрезов выделены линиями.

Матрица по средним зарядам в области расположения детектора на СМ УРАГАН представлена на рисунке 9. Измерения проводились с приложенными к каждому сектору затемняющими «масками».

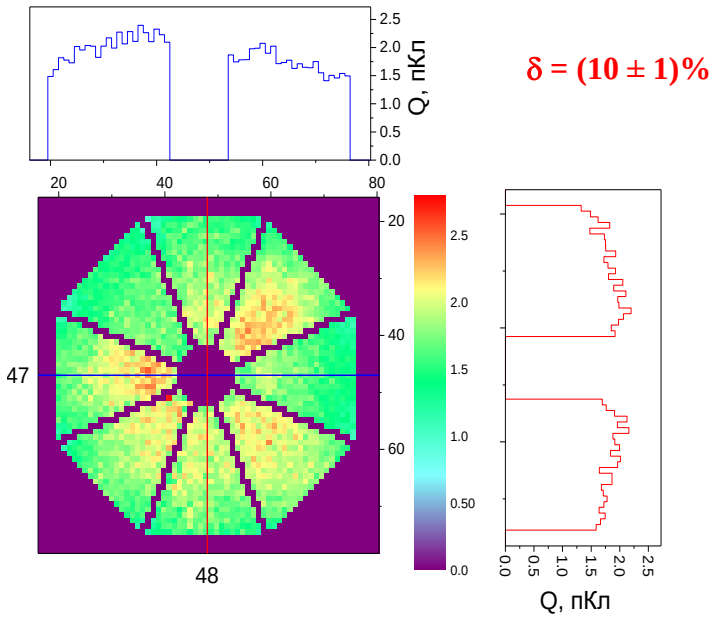

Рис. 9. Матрица по среднему заряду отклика МСД НЕВОД-ШАЛ с приложенными «масками».

На рисунке 10 представлены распределения по неоднородности для каждой из сборок сцинтилляционных пластин МСД НЕВОД-ШАЛ.

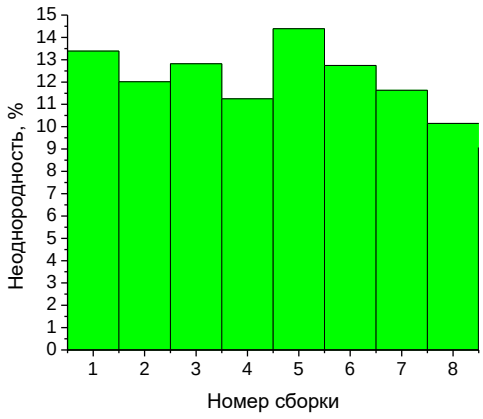

Рис. 10. Распределение по неоднородности 8 сборок МСД НЕВОД-ШАЛ с использованием затемняющих «масок».

Для трех мультисекторных сцинтилляционных детекторов кластера периферийной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ получены амплитудные отклики на мюонный пик в режиме самозапуска. В среднем он составляет 24,3 ф.э. на детектор (рис. 11).

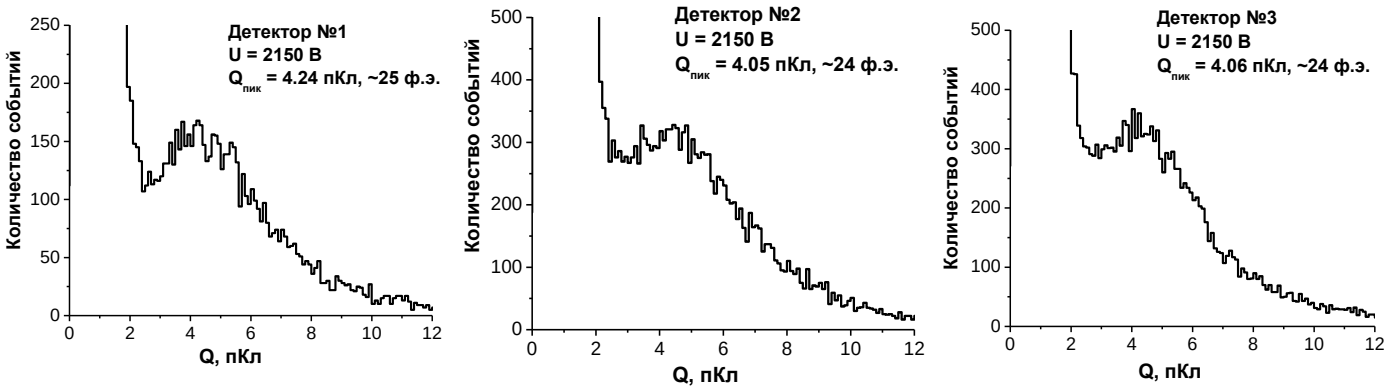

Рис. 11. Спектры, набранные в режиме самозапуска для трех мультисекторных сцинтилляционных детекторов НЕВОД-ШАЛ.

После окончания тестирования трех детекторов была проведена сборка кластера периферийной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ. Детекторы кластера располагались на 4 этаже ЭК НЕВОД на расстоянии 11,3 м, 16,0 м и 14,1 м друг от друга. Принципиальная схема кластера, состоящая из трех мультисекторных сцинтилляционных детекторов, представлена на рисунке 12.

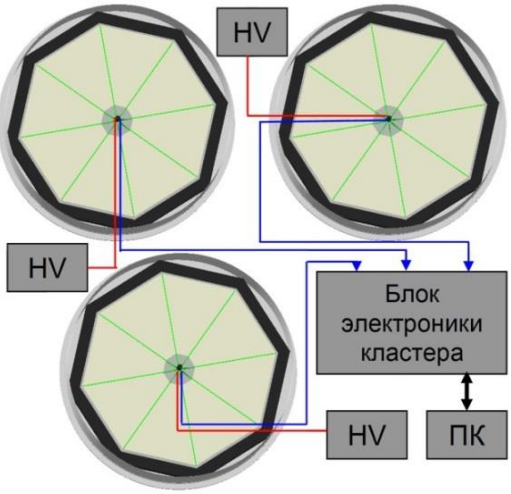

Рис. 12. Схема кластера из трех МСД ливневой установки НЕВОД-ШАЛ.

При тестировании сборок сцинтилляционных пластин и детектора в целом, предварительно, так же, как и в первом разделе, были проведены исследования параметров ФЭУ (коэффициента усиления динодной системы; диапазона линейности; темновых шумов, джиттера при одноэлектронной подсветке). Комплектация детекторов и подобранное напряжение питания приведены в таблице 5.

Таблица 5. Комплектация МСД НЕВОД-ШАЛ.

Номер детектора	Индивидуальный номер ФЭУ	Напряжение питания, В	Коэффициент усиления (М), $\times 10^6$
1	№ 9-25930-2	2150	1,05
2	№ 2-675-9	2150	1,09
3	№ 4-2288-9	2000	1,50

При регистрации широких атмосферных ливней необходимо знать направления прихода ствола ШАЛ. Направление прихода ливня определяется по разности времен срабатываний детекторов ливневой установки. Поэтому важной задачей являлось исследование временных параметров работы кластера и оценки точности определения времени прихода фронта ШАЛ.

Данные исследования проводились с кластером периферийной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ, состоящем из трех детекторов. При одновременном срабатывании детекторов в пределах временного окна длительностью ~ 50 нс, которое определяется расстоянием между детекторами (~ 16 м) вырабатывался триггер на запись сигналов с детекторов с временной привязкой данного события. По полученным данным определялось время срабатывания каждого детектора в конкретном событии, а затем вычислялась разница времен срабатывания между парами детекторов (1-2), (1-3) и (2-3). Затем были построены распределения разностей времен срабатывания для каждой из пар детекторов (рис. 13).

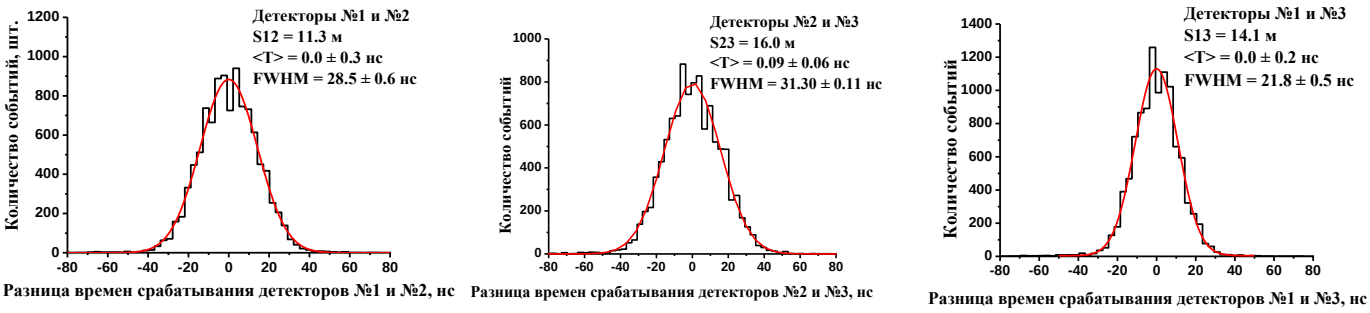

Рис. 13. Распределения разностей времен срабатывания детекторов кластера НЕВОД-ШАЛ.

Так как наибольшее количество ливней падает на кластер с околовертикальных направлений, то соответственно детекторы должны срабатывать одновременно. Из рисунка 13 видно, что среднее (пиковое) значение распределений разностей времен срабатывания детекторов ~ 0 нс.

Далее детектор 1 был передвинут к детектору 2 вплотную и кластер аналогично тестировался в данной конфигурации. Из рисунка 13 видно, что форма распределений разностей времен срабатывания для пар детекторов стала значительно уже. Так как детекторы № 1 и 2 расположены

вблизи друг от друга, то при регистрации ШАЛ, они должны срабатывать одновременно. Соответственно, из распределения разности времен срабатывания этих двух детекторов было оценено временное разрешение детектора при регистрации частиц фронта ливня: σ_t = (0,88 ± 0,01) нс.

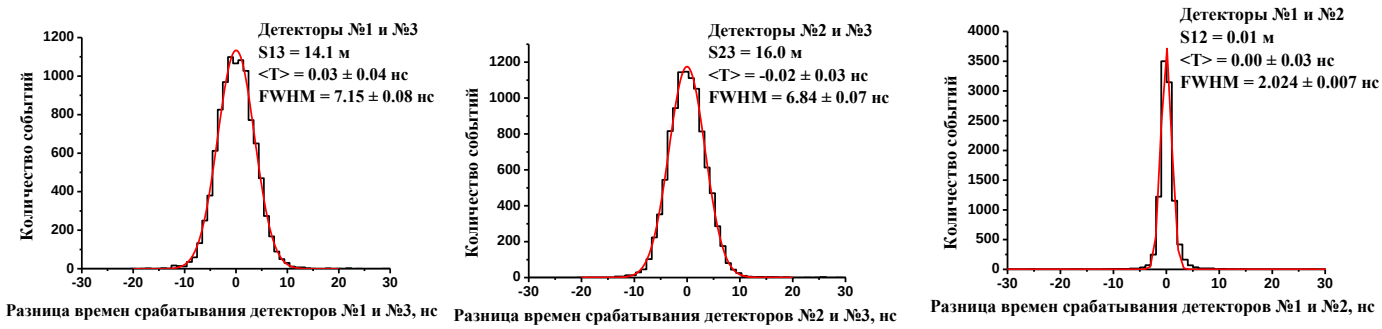

Рис. 14. Распределения разностей времен срабатывания детекторов кластера НЕВОД-ШАЛ в конфигурации совместного расположения двух детекторов (1 и 2).

Направление прихода ШАЛ (зенитный и азимутальный углы θ и φ) находится общепринятым способом по относительным временам срабатывания детекторов. По данным серии измерений с использованием методики реконструкции ШАЛ были восстановлены направления прихода зарегистрированных кластером широких атмосферных ливней. На рисунке 15 представлены распределения по косинусу зенитного θ (слева) и азимутального φ (справа) углов зарегистрированных ШАЛ.

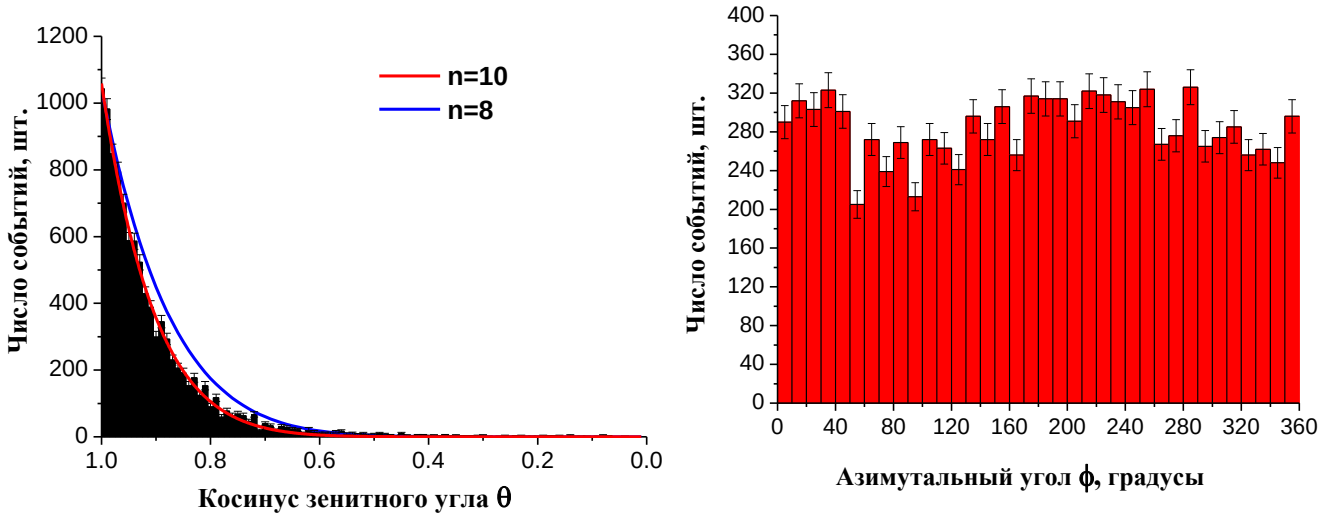

Рис. 15. Распределения по косинусу зенитного θ (слева) и азимутального φ (справа) углов зарегистрированных ШАЛ.

Распределение по азимутальному углу близко к равномерному. Распределение по косинусу зенитного угла фитировалось функцией $I(\theta) = I_0 \times \cos^n\theta$ с показателем степени косинуса $n \approx 10$. Ожидаемое значение зависимости потока ШАЛ от зенитного угла на данной высоте в атмосфере

имеет степень $n \approx 8$. Расхождение связанно с проведением эксперимента в здании, конструкция которого увеличивает пробег частиц в веществе стен и крыши, что уменьшает количество зарегистрированных низкоэнергитичных частиц ШАЛ под большими зенитными углами.

В результате проведенных работ разработан мультисекторный сцинтилляционный детектор на основе оптоволоконного светосбора для периферийной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ, обеспечивающий высокую эффективность регистрации ШАЛ во всем диапазоне зенитных углов верхней полусферы (0^0 – 90^0). Детектор имеет форму правильного восьмиугольника, разделенного на 8 секторов, каждый из которых состоит из двух пластин пластического сцинтиллятора толщиной 20 мм, между которыми расположен слой силикона с вклеенными оптическими волокнами, сводимыми в центр детектора, где размещается ФЭУ-115м. Исследование его характеристик (однородности (90 ± 1)%, временного разрешения (0,88 ± 0,01) нс, отклика на мюонный пик (24 ± 2) ф.э.) показало их соответствие установленным требованиям эксперимента. Изготовлено три таких мультисекторных сцинтилляционных детектора (кластер), которые будут включены в состав детектирующей части НЕВОД-ШАЛ.

Таким образом, поставленная задача создания мультисекторных сцинтилляционных детекторов, одновременно имеющих высокую однородность и временное разрешение, решена на рекордном уровне (рис. 16). Из рисунка видно, что детекторы ШАЛ имеют широкий разброс соотношений однородность–временное разрешение, а лучшие из них либо обладают хорошей однородностью, но худшим временным разрешением, либо не очень высокой однородностью, но хорошим временным разрешением. Мультисекторный сцинтилляционный детектор (МСД), разработанный для двух ливневых установок БАРС-ШАЛ и НЕВОД-ШАЛ, обладает рекордными характеристиками по соотношению однородности и временного разрешения, превосходящими лучшие зарубежные образцы AGASA и SPASE-2.

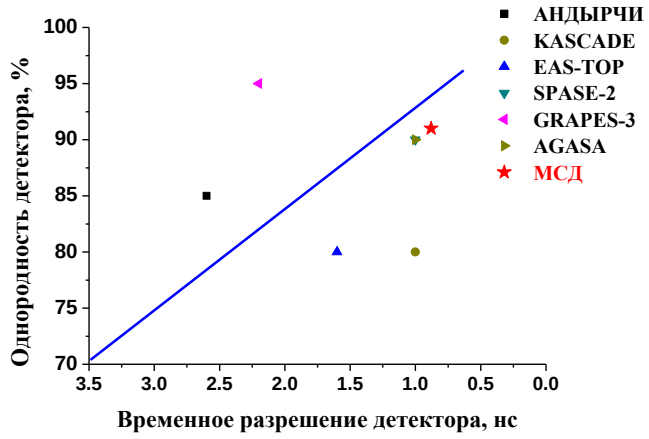

Рис. 16. Зависимость однородность – временное разрешение для детекторов ШАЛ, используемых в различных установках.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Впервые для проведения исследований в космических лучах были разработаны и созданы два мультисекторных сцинтилляционных детектора с рекордным соотношением однородность – временное разрешение (90 %, 0,88 нс), обеспечивающих регистрацию ШАЛ в полном диапазоне зенитных углов для двух ливневых установок: БАРС-ШАЛ и НЕВОД-ШАЛ, которые имеют следующие параметры:
   - площадь детектора: S ~1 $м^2$;
   - тип сцинтиллятора: пластический марки СОФГ-120 толщиной 20 и 40 мм;
   - тип переизлучателя:
     - изогнутые полоски пластического переизлучателя марки СОФЗ-105 (для детектора БАРС-ШАЛ);
     - спектросмещающие оптические волокна марки Kuraray Y11 (для детектора НЕВОД-ШАЛ);
   - один ФЭУ-115м, имеющий мультищелочной фотокатод с диаметром рабочей площади 25 мм и 12-динодную систему усиления.
2. В процессе выполнения работы были выполнены следующие работы:
   - подобрана оптимальная «маска» для получения высокой однородности детектора, состоящая из светоотражающих и светопоглощающих материалов;
   - получены диаграммы рассеяния излучаемого переизлучателем света, что позволило выбрать оптимальную конфигурацию перезлучателя с точки зрения минимизации потерь света (выбор изогнутого световода) для данной конструкции детектора;
   - выполнен отбор пластин сцинтилляторов и переизлучателей с одинаковыми параметрами по световыходу (длина затухания света, неоднородность) с использованием радиоактивного источника Sr^{90}, что позволило значительно уменьшить влияние неоднородности на весь детектор;
   - проведено измерение неоднородности сцинтилляционных сборок и всего детектора с помощью мюонного годоскопа УРАГАН.
3. В результате проведенных исследований и разработок было обеспечено достижение следующих рабочих характеристик мультисекторных сцинтилляционных детекторов:
   - однородность светосбора:
     - (91 ± 1)% (для детектора БАРС-ШАЛ);
     - (90 ± 1)% (для детектора НЕВОД-ШАЛ);
   - количество фотоэлектронов в мюонном пике:
     - 22 ф.э. (для детектора БАРС-ШАЛ);
     - 24 ф.э. (для детектора НЕВОД-ШАЛ);

- временное разрешение детектора при регистрации фронта ливня (0,88 ± 0,01) нс;
- широкий динамический диапазон измерений от 1 до 10^5 фотоэлектронов (использование 2-динодного съема сигнала с ФЭУ);

4. Разработанные и созданные мультисекторные сцинтилляционные детекторы имеют оригинальную конструкцию, позволяющую изменять ориентацию детектора от вертикального до горизонтального положения (под любым углом), что обеспечивает эффективную регистрацию ШАЛ в широком диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0).

5. Изготовлены мультисекторные сцинтилляционные детекторы (по три каждого типа) для кластеров ливневой части экспериментов БАРС-ШАЛ и НЕВОД-ШАЛ.

6. Для действующей установки НЕВОД-ШАЛ с использованием созданного кластера были проведены измерения направления прихода ШАЛ и получены распределения по косинусу зенитного θ и азимутального φ углов зарегистрированных ШАЛ. Угловое распределение зарегистрированных ШАЛ характеризуется зависимостью $\cos^n\theta$ с показателем степени косинуса $n \approx 10$, распределение по азимутальному углу близко к равномерному.

Разработанные детекторы будут использованы как в периферийной, так и уже созданной центральной части ливневой установки НЕВОД-ШАЛ. Их использование в ливневых установках для проведения измерений в широком диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0) позволит повысить точность оценки энергии частиц ПКЛ методом спектров локальной плотности мюонов, а также провести его калибровку, что в свою очередь значительно расширит возможности ЭК НЕВОД в мультикомпонентных исследованиях ШАЛ.

Таким образом, решена актуальная научная задача создания детекторов с рекордными характеристиками по соотношению однородность – временное разрешение, предназначенных для регистрации ШАЛ в широком диапазоне зенитных углов (0^0 – 90^0).

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

[1] Amelchakov M.B., Bogdanov A.G., Kindin V.V., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Matyushin A.A., Ovchinnikov A.V., Petrukhin A.A., **Prokopenko N.N.**, Yanson E.E., Yashin I.I., Gilitsky Yu.V., Gurzhiev S.N., Denisov S.P., Dunaitsev A.F., Zholobov V.G., Lipaev V.V., Rybin A.M., Soldatov M.M., Sytin A.N., Lidvansky A.S., Novoseltsev Yu.F., Petkov V.B., Stenkin Yu.V. «Proposal for a BARS-SHAL experiment to search for new physical processes in cosmic rays», 2005, Bulletin of The Russian Academy of Sciences: Physics, 69 (3), p.: 448-450;

[2] Denisov S.P., Gilitsky Yu.V., Kokoulin R.P., Kostin M.Yu., Lipaev V.V., Matyushin A.A., Ovchinnikov A.V., Petrukhin A.A., **Prokopenko N.N.**, Soldatov M.M., Sytin A.N., Yanson E.E.,

Zholobov V.G. «Scintillation detector for shower array of EAS-BARS project», 2005, Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, vol. 8, p.: 267-270, WOS: 000243522900068;

[3] Yanson E.E., Denisov S.P., Gilitsky Yu.V., Kindin V.V., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Lipaev V.V., Matyushin A.A., Ovchinnikov A.V., Petrukhin A.A., **Prokopenko N.N.**, Soldatov M.M., Sytin A.N. «Multi-sector scintillation detector for investigations of extensive air showers», 2009, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 598 (1), DOI: 10.1016/j.nima.2008.08.026, WOS: 000262662500071;

[4] Ampilogov N.V., Denisov S.P., Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., **Prokopenko N.N.**, Shulzhenko I.A., Unatlokov I.B., Yashin I.I. «Multisector scintillation detector with fiber-optic light collection», 2017, Journal of Instrumentation, 12 (7), art. no. C07004, DOI: 10.1088/1748-0221/12/07/C07004, WOS: 000406420100004.