

На правах рукописи

ШУЛЬЖЕНКО ИВАН АНДРЕЕВИЧ

**УСТАНОВКА КЛАСТЕРНОГО ТИПА ДЛЯ
РЕГИСТРАЦИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ
ЛИВНЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ
КОМПЛЕКСЕ НЕВОД**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Автор:



Москва - 2018

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

- Научный руководитель: Петрухин Анатолий Афанасьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ
- Официальные оппоненты: Просин Василий Владимирович, доктор
физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник НИИЯФ МГУ
- Лидванский Александр Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией ИЯИ РАН
- Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук (ФИАН)

Защита состоится 27 июня 2018 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/dissertations>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В экспериментах по изучению широких атмосферных ливней (ШАЛ) были обнаружены особенности в характеристиках космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий: 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. Классические методы исследования ШАЛ не дают ответа на вопрос о причинах возникновения этих особенностей. Поэтому в настоящее время создаются новые гибридные установки, способные одновременно регистрировать большое число компонент, и активно развиваются уже существующие за счет расширения состава используемых типов детекторов. Одной из таких установок является Экспериментальный комплекс (ЭК) НЕВОД, в котором в настоящее время разрабатываются и строятся новые детекторы для регистрации различных компонент широких атмосферных ливней. В число новых детекторов комплекса входит установка НЕВОД-ШАЛ, которая создается из сцинтилляционных счетчиков частиц электронно-фотонной компоненты ШАЛ, использовавшихся ранее в экспериментах EAS-TOP (Италия) и KASCADE-Grande (Германия).

Сочетание в ЭК НЕВОД (НИЯУ МИФИ, г. Москва) черенковского водного калориметра (ЧВК) и координатно-трековых детекторов большой площади позволяет применять для изучения наклонных ШАЛ в диапазоне энергий первичных частиц КЛ от 10^{15} до 10^{19} эВ новый метод спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ). С помощью данного метода для различных зенитных углов впервые была измерена энергетическая зависимость избытка мюонов ШАЛ при энергиях выше 10^{17} эВ по сравнению с расчетными оценками даже в предположении чисто железного состава первичных космических лучей (ПКЛ), который был ранее обнаружен на ускорительных экспериментах ALERH и DELPHI (CERN, Швейцария). В 2013 г. данный результат был подтвержден в Pierre Auger Observatory (Аргентина).

Метод СЛПМ основан на том, что одинаковой плотности мюонов в группах, регистрируемых координатно-трековыми детекторами ЭК НЕВОД под разными зенитными углами, соответствуют различные энергии первичных частиц. Данный метод позволяет исследовать характеристики потока и взаимодействия космических лучей в очень

широком энергетическом диапазоне в рамках одного эксперимента с помощью одной установки относительно небольших размеров. Однако типичная ширина распределений первичных энергий (для фиксированной плотности мюонов) характеризуется среднеквадратичным разбросом $\sigma_{lgE} \sim 0.4$. Такой разброс обусловлен тем, что вклад в события с фиксированной локальной плотностью мюонов дают ШАЛ с различными энергиями, регистрируемые на разных (случайных) расстояниях от оси.

Новая установка НЕВОД-ШАЛ предназначена для калибровки метода спектров локальной плотности мюонов путем сопоставления энергетических спектров ПКЛ, полученных при одновременной регистрации широких атмосферных ливней и реконструкции их параметров по группам мюонов и традиционным способом по электронно-фотонной компоненте, а также расширения возможностей экспериментального комплекса НЕВОД в мультикомпонентных исследованиях космических лучей за счет увеличения площади регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ.

Цель работы

Разработка и создание первой очереди ливневой установки НЕВОД-ШАЛ для получения независимой информации о характеристиках широких атмосферных ливней (мощности, положении оси и направлении прихода), регистрируемых другими детекторами и установками Экспериментального комплекса НЕВОД.

Научная новизна

1. Впервые разработан и реализован кластерный подход не только к организации регистрирующей системы установки ШАЛ, но и к анализу получаемых на ней экспериментальных данных.

2. Впервые в мире создана установка ШАЛ на основе полностью независимых друг от друга кластеров, расположенных на разных высотах, и решена проблема реконструкции широких атмосферных ливней в такой установке.

3. Впервые обеспечена привязка широких атмосферных ливней, регистрируемых по группам мюонов, к их параметрам, реконструируемым традиционным методом по электронно-фотонной компоненте, в широком интервале зенитных углов.

Достоверность

1. Исследование характеристик, тестирование и настройка сцинтилляционных детекторов, их элементов и регистрирующей

электроники проводились с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

2. Измерение зонных характеристик сцинтилляционных детекторов проводилось с помощью мюонного годоскопа УРАГАН, прошедшего метрологические испытания и имеющего высокую пространственную и угловую точность регистрации мюонов (соответственно 1 см и 0.8°).

3. Точность реконструкции кластерами установки НЕВОД-ШАЛ направления прихода фронтов широких атмосферных ливней определена путем сопоставления данных кластеров с результатами реконструкции по данным координатно-трекового детектора ДЕКОР, имеющего точность лучше 0.7° и 0.8° для зенитных и азимутальных углов соответственно.

4. Оценка энергетических характеристик регистрируемых событий основана на регулярной калибровке откликов измерительных каналов при регистрации одиночных мюонов и их линейности.

Практическая значимость

1. Созданная установка включена в состав Экспериментального комплекса НЕВОД и расширяет его возможности в мультикомпонентных исследованиях космических лучей.

2. Одновременная регистрация широких атмосферных ливней и реконструкция их параметров по электронно-фотонной компоненте в НЕВОД-ШАЛ и по группам мюонов в НЕВОД-ДЕКОР позволят впервые провести калибровку метода спектров локальной плотности мюонов путем прямого сопоставления энергетических спектров ПКЛ, полученных двумя методами при регистрации одних и тех же событий.

3. Результаты работы, в первую очередь регистрирующая система, конструкторские решения, методы и стенды для тестирования и настройки детектирующих элементов и регистрирующей электроники, а также методы мониторинга рабочих параметров кластеров будут использованы при расширении НЕВОД-ШАЛ до площади $\sim 0.2 \times 10^6 \text{ м}^2$.

4. Опыт создания установки кластерного типа, а также разработанные методы реконструкции характеристик ШАЛ по данным установки, состоящей из независимых друг от друга кластеров, могут быть использованы при создании новых ливневых детекторов.

Личный вклад

Все работы по диссертации были выполнены лично автором, либо при его определяющем участии. Непосредственно автором разработана регистрирующая система установки НЕВОД-ШАЛ на основе

независимых кластеров сцинтилляционных детекторов, созданы стенды и разработаны методы для тестирования и настройки основных элементов установки, исследованы характеристики сцинтилляционных счетчиков, их составных элементов и регистрирующей электроники, разработано программное обеспечение для управления регистрирующей системой, обработки экспериментальных данных и определения рабочих характеристик кластеров, разработаны алгоритмы интерпретации отклика кластеров при регистрации широких атмосферных ливней, определения мониторинговых параметров, разработаны методы объединения данных отдельных кластеров в события ШАЛ на установке, а также методы поиска совместных событий в данных НЕВОД-ШАЛ и других детекторов и установок Экспериментального комплекса НЕВОД. Автором проведены экспериментальные исследования характеристик кластеров установки НЕВОД-ШАЛ, получены и проанализированы методические и физические результаты, подготовлены основные публикации.

Автор защищает

1. Первую очередь установки НЕВОД-ШАЛ кластерного типа площадью 10^4 м^2 , предназначенную для регистрации и реконструкции по электронно-фотонной компоненте характеристик ШАЛ, детектируемых совместно с черенковским водным калориметром НЕВОД и координатно-трековым детектором ДЕКОР.

2. Стенды, методы и результаты тестирования и настройки сцинтилляционных детекторов, их элементов и регистрирующей электроники.

3. Программный комплекс для мониторинга рабочих параметров кластеров и реконструкции регистрируемых ими событий, объединения данных отдельных кластеров в события ШАЛ на установке и поиска совместных событий в данных НЕВОД-ШАЛ и других детекторов Экспериментального комплекса НЕВОД.

4. Результаты сопоставления данных НЕВОД-ШАЛ, ЧВК НЕВОД и ДЕКОР при регистрации широких атмосферных ливней.

Апробация

Результаты работы были представлены на российских и международных конференциях: Международных конференциях по космическим лучам (ICRC 2013, 2015), Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН (2013), научных сессиях НИЯУ МИФИ (2014, 2015), Всероссийских конференциях по

космическим лучам (ВККЛ 2014, 2016), Европейских симпозиумах по космическим лучам (ECRS 2012, 2014, 2016), 19-м Международном симпозиуме по взаимодействиям космических лучей сверхвысоких энергий (ISVHECRI-2016), Международных конференциях по физике частиц и астрофизике (ICPPA 2015, 2016), Международном симпозиуме по космическим лучам и астрофизике (ISCRA-2017), конференции «Приборы для физики сталкивающихся пучков» (INSTR17) и опубликованы в их трудах, а также в статьях в журналах: “Известия РАН. Серия физическая”, “Proceedings of Science”, “Приборы и техника эксперимента”, “The European Physical Journal. Web of Conferences”, “Journal of Instrumentation”, “Journal of Physics: Conference Series”. Получен патент на изобретение.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и трех приложений. Объем диссертации: 127 страниц, 87 рисунков, 7 таблиц, 68 наименований источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведено описание основных проблем исследования ШАЛ и некоторых установок для регистрации широких атмосферных ливней. Дано краткое описание установок экспериментального комплекса НЕВОД и метода спектров локальной плотности мюонов для исследования КЛ. Отражена цель работы, научная новизна и актуальность создания новой ливневой установки кластерного типа.

В главе 1 описаны сцинтилляционный счетчик и детектирующая станция кластера, их основные характеристики, приводится устройство и принцип работы стендов для тестирования элементов счетчиков, сборки и настройки счетчиков и детектирующих станций, приведены результаты изучения характеристик сцинтилляторов и фотоумножителей, а также результаты исследования зонных характеристик счетчиков.

Основным детектирующим элементом установки является сцинтилляционный счетчик (рис. 1), который состоит из пластикового сцинтиллятора NE102A с размерами $800 \times 800 \times 40$ мм³ и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) Philips XP3462 с полусферическим фотокатодом, размещенных в светоизолированном корпусе пирамидальной формы из нержавеющей стали. В корпусе счетчика предусмотрена возможность установ-

ки второго ФЭУ. Для улучшения светосбора внутренняя поверхность корпуса окрашена диффузно-отражающим покрытием.

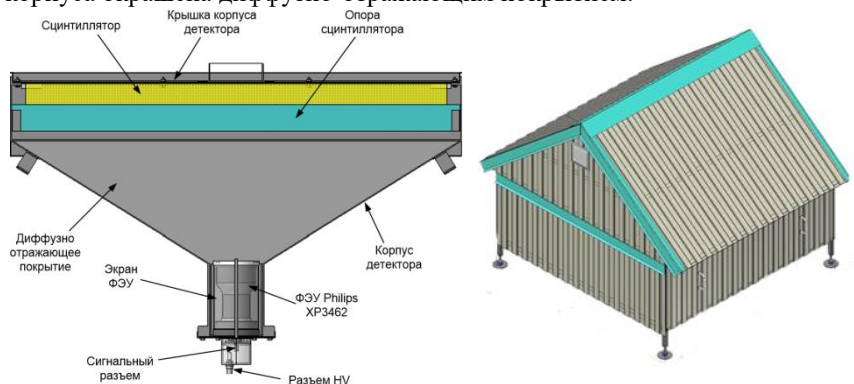


Рис. 1. Сцинтилляционный счетчик и детектирующая станция установки НЕВОД-ШАЛ.

Детектирующая станция (ДС) состоит из 4 счетчиков, расположенных внутри защитного корпуса. Площадь ДС составляет $\sim 2.6 \text{ м}^2$. Три счетчика оснащены одним («стандартным») ФЭУ. Четвертый счетчик ДС оборудован двумя фотоумножителями: «стандартным» и «дополнительным». Стандартные ФЭУ используются для измерения плотности частиц регистрируемых ШАЛ и временных измерений. Данные фотоумножители настроены так, чтобы отклики счетчиков при регистрации одиночного мюона составляли $\sim 13 \text{ пКл}$, что обеспечивает их динамический диапазон до 100 регистрируемых частиц. Дополнительный ФЭУ предназначен для расширения динамического диапазона ДС до $\sim 10000 \text{ частиц/м}^2$ и имеет в ~ 90 раз меньший коэффициент усиления динодной системы, чем стандартный. Отклик дополнительного фотоумножителя при регистрации одиночного мюона составляет $\sim 0.15 \text{ пКл}$.

При создании установки НЕВОД-ШАЛ были проведены детальное исследование характеристик фотоэлектронных умножителей и сцинтилляционных пластин, а также сборка, тестирование и настройка самих счетчиков для использования в детектирующих станциях кластеров.

Исследовались следующие характеристики ФЭУ: напряжение питания, обеспечивающее коэффициент усиления динодной системы 2.0×10^6 , разброс задержек срабатывания (джиттер) при одноэлектронной подсветке, верхняя граница диапазона линейности, относительная чувствительность фотокатода при фиксированной подсветке, темп счета темновых

шумов. Для сцинтилляционных пластин с помощью эталонных фотоумножителя и корпуса счетчика измерялся относительный световыход.

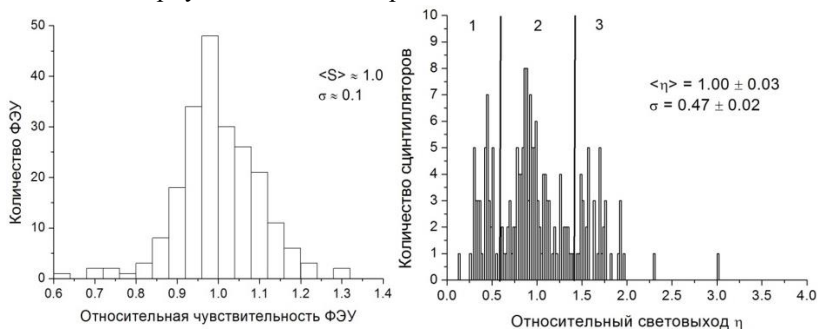


Рис. 2. Распределение ФЭУ по относительной чувствительности фотокатода (слева) и распределение сцинтилляторов по относительному световыходу (справа).

При формировании комплектов счетчиков использовались данные об относительном световыходе сцинтилляционных пластин и об относительной чувствительности фотокатодов ФЭУ, полученные на этапе предварительного тестирования (рис. 2). Соблюдался следующий принцип: пониженный световыход (относительно среднего значения по полной выборке пластин) сцинтиллятора должен компенсироваться повышенной чувствительностью ФЭУ (относительно среднего значения по полной выборке фотоумножителей), и наоборот.

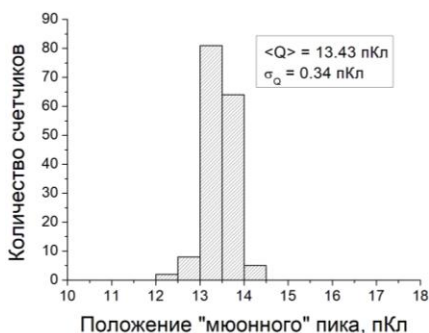


Рис. 3. Распределения счетчиков по наиболее вероятным откликам на прохождение одиночного мюона

После подбора комплекта ФЭУ и сцинтилляционной пластины осуществлялась настройка наиболее вероятного отклика счетчика на прохождение одиночного мюона на значение 13 ± 1 пКл, которое обеспечивает динамический диапазон счетчика ~ 100 регистрируемых частиц (в эквиваленте вертикального мюона). На рис. 3 представлено распределение 160 настроенных счетчиков по наиболее вероятным откликам на прохождение

одиночного мюона, измеренным в режиме самозапуска.

Исследование неоднородности светосбора счетчиков проводилось с помощью супермодуля установки УРАГАН, который имеет высокое пространственное и угловое разрешение. Матрица значений среднего заряда отклика на прохождение одиночных мюонов через различные участки сцинтиллятора показана на рис. 4. Отклик счетчика практически не зависит от места прохождения мюона за исключением центральной области (область напротив входного окна ФЭУ), в которой заряд отклика в 1.5 раза превышает заряд на периферийных частях сцинтилляционной пластины.

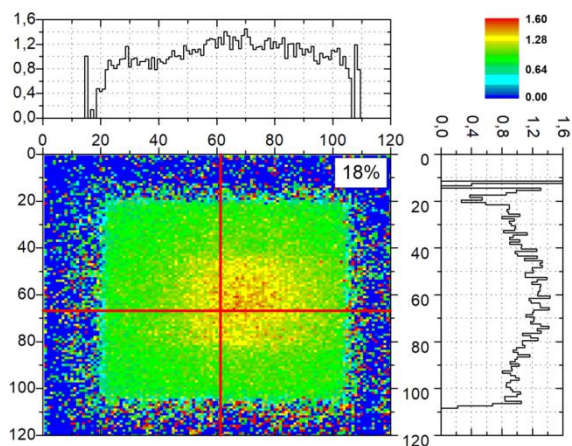


Рис. 4. Матрица среднего заряда отклика счетчика на прохождение одиночного мюона.

В главе 2 приведено устройство установки НЕВОД-ШАЛ и ее коммуникационных систем. Описаны принципы работы регистрирующей системы кластеров, системы сбора и обработки данных, системы глобальной временной синхронизации и программного комплекса.

Структура регистрирующей системы установки НЕВОД-ШАЛ (рис. 5) имеет 2 ключевых элемента: кластер сцинтилляционных детектирующих станций и центральный пункт (ЦП) управления, синхронизации, сбора и обработки данных. Каждый кластер независимо осуществляет регистрацию частиц ШАЛ, сбор и оцифровку аналоговых сигналов с детектирующих элементов, отбор событий по триггерным условиям, присваивание событиям временной метки, передачу информации в ЦП и, таким образом, является самостоятельнойливневой установкой, способной определять как число частиц зарегистрированных каждым детекти-

рующим элементом, так и направление прихода фронта широких атмосферных ливней. Характерные размеры кластера составляют около $15 \times 15 \text{ м}^2$. Расстояние между центрами соседних кластеров – около 30 м.

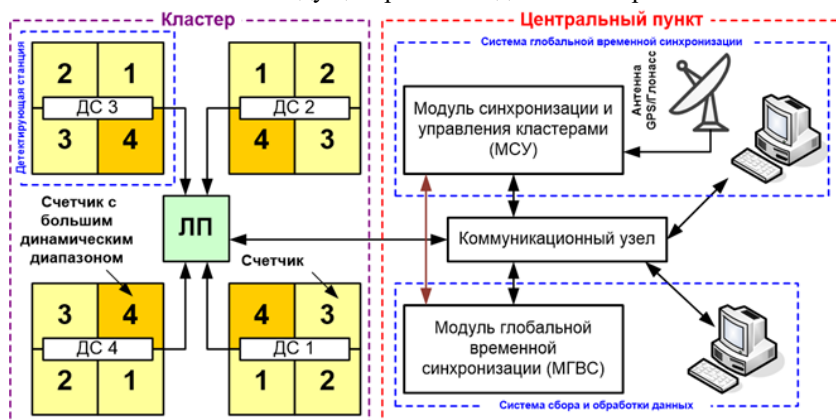


Рис. 5. Структура регистрирующей системы установки.

Кластер установки состоит из 4 ДС, объединенных локальным пунктом (ЛП) сбора и первичной обработки данных. Основным элементом ЛП – блок электроники кластера детектирующих станций (БЭКДС) – осуществляет оцифровку аналоговых сигналов с ФЭУ ДС кластера, отбор событий по внутрикластерным триггерным условиям, временную привязку экспериментальных данных и их передачу в ЦП установки. БЭКДС состоит из: сумматора-мультиплексора, суммирующего сигналы с четырех стандартных ФЭУ счетчиков каждой ДС; модуля ввода-вывода РЕТ-7019 для управления сумматором-мультиплексором и измерения температуры внутри корпусов ДС и ЛП; двух плат амплитудного анализа для оцифровки сигналов с ФЭУ счетчиков кластера с частотой дискретизации 200 МГц; контроллера для управления платами амплитудного анализа, отбора событий и передачи информации в ЦП; кросс-платы VME; крейта для размещения элементов БЭКДС. Платы амплитудного анализа и контроллер выполнены на базе ПЛИС Xilinx семейства Spartan-6. В уличных условиях электроника ЛП кластера размещается внутри телекоммуникационного шкафа с внутренними размерами $600 \times 600 \times 800 \text{ мм}^3$.

В состав центрального пункта управления, синхронизации, сбора и обработки данных входят: система сбора и обработки данных (ССОД); система глобальной временной синхронизации (СГВС); коммуникационный узел, обеспечивающий сетевое соединение как между электронным

оборудованием ЦП, так и между ЦП и электронными блоками ЛП кластеров; хранилище экспериментальных и мониторинговых данных.

Система сбора и обработки данных ЦП установки осуществляет передачу команд управления и настроек в БЭКДС кластеров, а также прием экспериментальных, мониторинговых данных и служебной информации от БЭКДС. ССОД состоит из ЭВМ, на которой запущено необходимое программное обеспечение, и набора модулей синхронизации и управления (МСУ) кластерами.

Задачей системы СГВС является обеспечение синхронной работы кластеров установки и привязка регистрируемых событий к мировому времени. В состав СГВС входят: модуль глобальной временной синхронизации (МГВС), антенна GPS/ГЛОНАСС Trimble Acutime GG и управляющая ЭВМ системы, на которой запущено необходимое ПО для работы с модулем МГВС и антенной. Точность синхронизации времени в локальных часах модулей МСУ и БЭКДС кластеров – 10 нс.

Программный комплекс установки (рис. 6) состоит из нескольких частей: ПО системы глобальной временной синхронизации; ПО системы сбора и обработки данных; программ для управления СМ БЭКДС локальных пунктов, приема информации о температуре в ЛП и ДС, измерения времени прохождения сигналов по волоконно-оптическим кабелям.

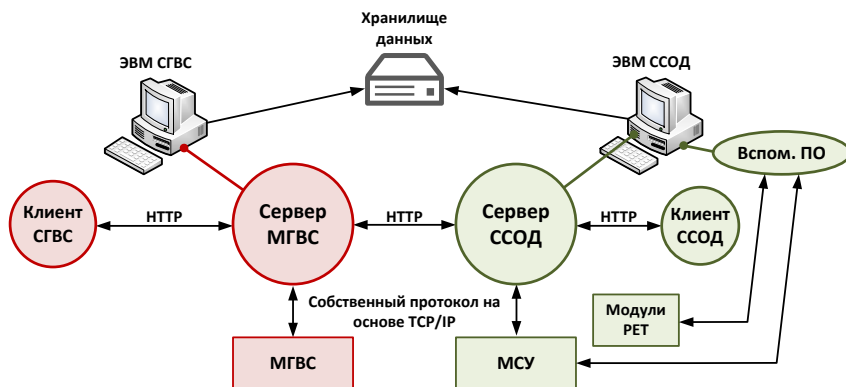


Рис. 6. Структура программного комплекса установки.

В 2014-2016 гг. была создана и введена в эксплуатацию первая очередь установки НЕВОД-ШАЛ, включающая 6 кластеров, размещенных на площади 10^4 м².

В главе 3 приведены описания алгоритмов и методы обработки данных отдельных кластеров установки, определения различных рабочих

параметров кластеров. Описаны методы реконструкции различных параметров широких атмосферных ливней по данным кластеров, а также метод объединения их срабатываний в события ШАЛ на установке.

Информационные пакеты от локальных пунктов, поступающие в ЦП установки при регистрации кластерами событий ШАЛ, содержат 8 разверток АЦП измерительных каналов и время регистрации события по локальным часам БЭКДС. В ходе обработки разверток с измерительных каналов БЭКДС в зарегистрированном кластере события для каждого сигнала определяются следующие параметры: положение нулевой линии АЦП измерительного канала (пьедестал); амплитуда и заряд сигнала; время срабатывания измерительного канала относительно нулевой ячейки буфера памяти АЦП; длительность сигнала, а также длительности его переднего и заднего фронтов.

По данным отдельных кластеров определяются их различные мониторинговые параметры: темпы счета кластеров и их ДС; положения и среднеквадратичные отклонения пьедесталов измерительных каналов БЭКДС; задержки срабатывания станций кластеров при регистрации ШАЛ; положения мюонных пиков ДС (рис. 7); коэффициенты сшивки между откликами ДС и их дополнительных ФЭУ.

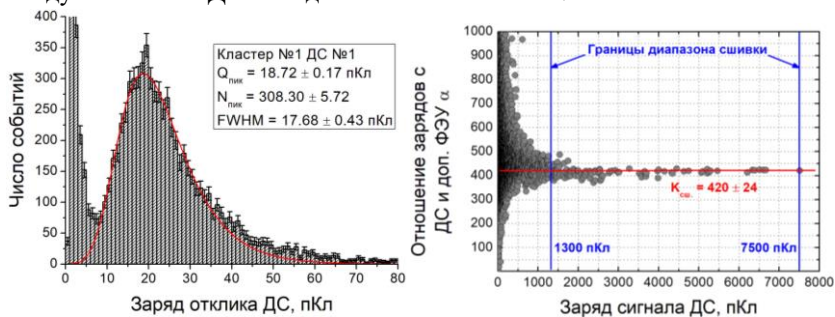


Рис. 7. Зарядовые спектры отклика ДС кластера (слева) и зависимость отношения зарядов сигналов с ДС № 2.2 и ее дополнительного ФЭУ от заряда отклика станции (справа).

Все перечисленные выше параметры используются для оценки стабильности работы кластеров и качества полученных данных. Положения мюонных пиков, задержки срабатывания и коэффициенты сшивки детектирующих станций используются в дальнейшем при реконструкции характеристик ШАЛ, регистрируемых отдельными кластерами и установкой в целом.

Для реконструкции направления прихода ШАЛ могут быть применены два метода:

- классический, в котором все сработавшие в событии детектирующие станции установки рассматриваются как единый массив;
- кластерный, в котором по относительным временам срабатывания ДС отдельных кластеров реконструируются k «кластерных» направлений прихода ливней, а результирующее направление прихода ШАЛ в событии является суперпозицией «кластерных» направлений.

Для сравнения двух описанных выше методов по откликам установки НЕВОД-ШАЛ при регистрации моделированных ливней была проведена реконструкция направлений их прихода с использованием кластерного и классического подходов. Моделирование проводилось для «плоской» (все ДС установки расположены на одном уровне) и «разноуровневой» (ДС расположены на разных уровнях в соответствии с реальными координатами) конфигураций установки.

Сравнение результатов реконструкции направлений моделированных ШАЛ с помощью классического и кластерного подходов для двух конфигураций установки показало, что:

- при расположении ДС установки в одной плоскости классический подход к реконструкции направления ШАЛ дает лучшую точность определения зенитных углов по сравнению с кластерным;
- кластерный подход к реконструкции направления ШАЛ имеет одинаковую точность для обеих конфигураций установки;
- при разноуровневом расположении ДС установки алгоритм реконструкции направления прихода ливня классическим методом сильно усложняется из-за необходимости введения дополнительных поправок во времена срабатывания станций, которые, в свою очередь, зависят от направления прихода ШАЛ.

Поэтому кластерный подход к реконструкции направления прихода ливня является наиболее удобным для установки НЕВОД-ШАЛ.

На рис. 8 представлены распределения по косинусу зенитного угла и азимутальному углу реконструированных направлений ШАЛ, зарегистрированных отдельным кластером. Распределение по азимутальному углу близко к равномерному. Распределение по косинусу зенитного угла аппроксимировано функцией $N(\theta) = N_0 \cdot \cos^q \theta$. Экспериментальное распределение хорошо согласуется с ожидаемой степенной зависимостью, а значение показателя степени косинуса, полученное при аппроксимации

распределения до зенитного угла 60° , составляет ≈ 8.6 . При больших зенитных углах наблюдается вклад ливней, образованных мюонами.

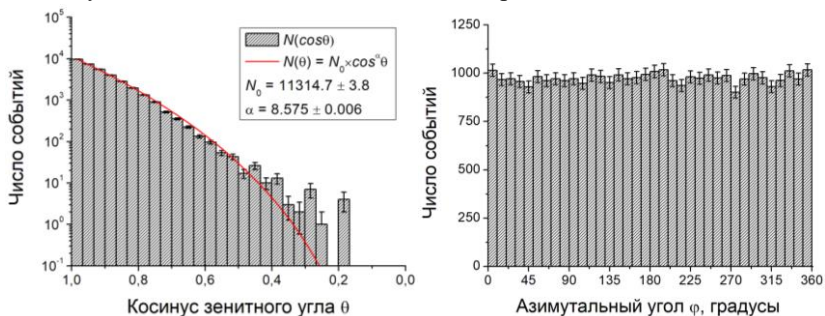


Рис. 8. Распределения ШАЛ, зарегистрированных кластером, по косинусу зенитного угла и азимутальному углу направлений прихода.

Процедура объединения данных отдельных кластеров в события ШАЛ на установке включает несколько этапов: построение временного ряда срабатываний кластеров; анализ временного ряда и поиск совместных (совпадающих в пределах заданного временного окна) срабатываний кластеров; сбор информации об отобранных срабатываниях кластеров и формирование базы зарегистрированных установкой событий ШАЛ.

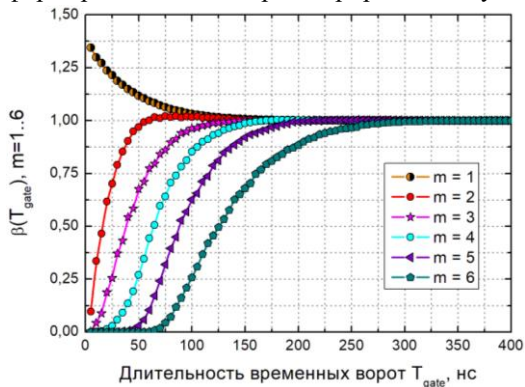


Рис. 9. Зависимость числа отбираемых событий с кратностью срабатывания кластеров m от ширины временного окна.

длительности ворот 400 нс от ширины временного окна (рис. 9). Оптимальная длительность ворот отбора совместных срабатываний кластеров соответствует величине, при которой зависимость для максимально возможной кратности 6 становится ≈ 1 , и составляет ≈ 350 нс.

Для определения оптимальной длительности ворот отбора совместных срабатываний кластеров и их объединения в события ШАЛ на установке рассматривалась зависимость отношений числа отбираемых событий с кратностью срабатывания кластеров от 1 до 6 к числу событий с соответствующей кратностью при

В главе 4 приведены результаты совместной работы установки НЕВОД-ШАЛ и других детекторов экспериментального комплекса НЕВОД. Представлены результаты анализа угловых распределений ШАЛ, зарегистрированных установкой, спектра ШАЛ по числу частиц и темпа счета событий. Описаны методы отбора совместных событий в НЕВОД-ШАЛ и других детекторах экспериментального комплекса. Определено угловое разрешение кластера и ливневой установки.

В 2016 – 2017 гг. был проведен ряд тестовых и методических серий измерений, в ходе которых осуществлялась настройка кластеров, определение их рабочих параметров и реконструкция регистрируемых событий, наладка системы глобальной временной синхронизации, отладка и оптимизация программного обеспечения системы сбора и обработки данных. В конце 2017 г. была запущена экспериментальная серия измерений, в которой первая очередь установки НЕВОД-ШАЛ начала работу в составе экспериментального комплекса.

По результатам регистрации ШАЛ установкой было показано хорошее согласие угловых распределений ливней, спектра ШАЛ по числу регистрируемых частиц и поведения темпа счета событий с ожидаемыми распределениями и зависимостями. В частности, показатель степени косинуса зенитного угла равен ~ 8.8 , распределение по азимутальному углу близко к равномерному. Барометрический коэффициент для событий ШАЛ составляет $-1.08 \text{ \%}/\text{мм рт. ст.}$. На рис. 10 показаны распределения по интервалам логарифма суммарного числа частиц, полученные: по данным стандартных ФЭУ ДС (пятиугольные точки); по данным дополнительных ФЭУ ДС (треугольные точки); по откликам дополнительных ФЭУ, приведенным к полной площади ДС (круглые точки). Показатели степени γ , полученные при аппроксимации распределений по данным стандартных ФЭУ (на участке от 150 до 4000 частиц) и по дополнительным ФЭУ (> 50 частиц) степенной зависимостью, составляют ~ 1.33 и 1.39 , соответственно, а наклоны распределений при переходе от разбиения по интервалам логарифма к линейному масштабу составляют ~ 2.33 и 2.39 . Распределение ШАЛ по суммарному числу частиц, зарегистрированных в установке, полученное по откликам дополнительных ФЭУ, приведенным к полной площади ДС, в диапазоне от 150 до 4000 частиц хорошо согласуется с распределением, построенным по данным стандартных ФЭУ детектирующих станций, что свидетельствует о корректности процедур калибровки.

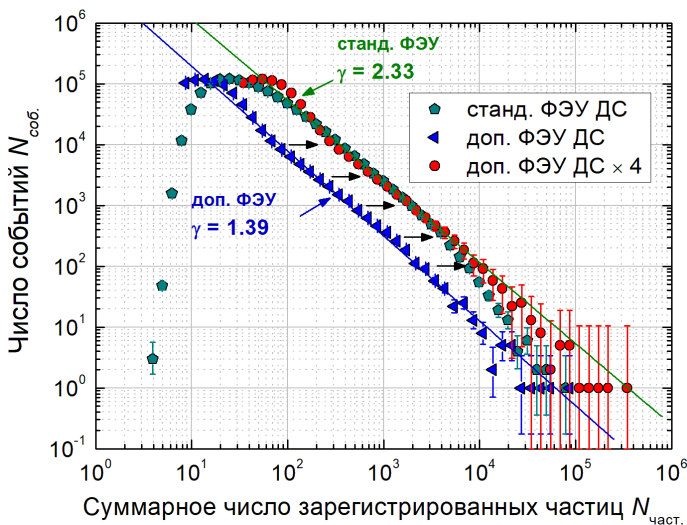


Рис. 10. Распределения широких атмосферных ливней по интервалам логарифма суммарного числа частиц, зарегистрированных установкой НЕВОД-ШАЛ в событии.

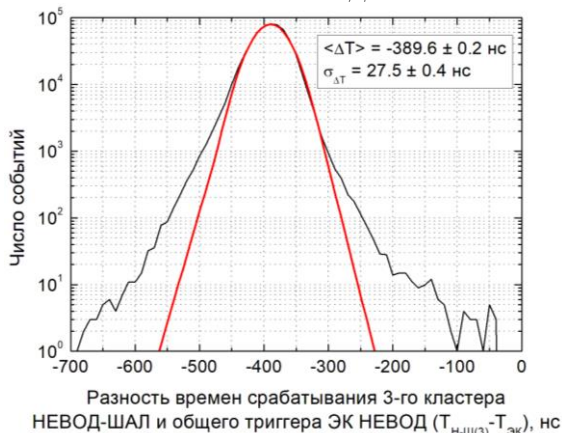


Рис. 11. Распределение разностей времен срабатывания кластера №3 НЕВОД-ШАЛ и общего триггера ЭК НЕВОД.

новленного на крыше здания ЭК НЕВОД; для детекторов ЭК НЕВОД – все события по любому из возможных триггеров детекторов комплекса, попадающие внутрь временных ворот от -770 до 0 нс относительно мо-

Для определения условий поиска совместных событий в установке НЕВОД-ШАЛ и детекторах ЭК НЕВОД рассматривались события следующих типов: для НЕВОД-ШАЛ – события с кратностью срабатывания кластеров не менее трех при обязательном срабатывании кластера №3, уста-

мента срабатывания кластера №3 НЕВОД-ШАЛ. Распределение разностей времени срабатывания кластера №3 НЕВОД-ШАЛ и триггера ЭК НЕВОД приведено на рис. 11. Отрицательные значения разностей времен срабатывания указывают на то, что триггер в кластере НЕВОД-ШАЛ вырабатывается раньше, чем в триггерной системе ЭК НЕВОД. Средняя задержка выработки триггера ЭК НЕВОД относительно момента срабатывания кластера НЕВОД-ШАЛ составляет ≈ 390 нс, среднеквадратичный разброс задержек – 27.5 нс. Согласно данному распределению, для поиска совместных событий в установке и ЭК НЕВОД необходимо использовать ворота шириной 275 нс, смещенные на 390 нс относительно момента срабатывания кластера №3 НЕВОД-ШАЛ. С учетом средних времен между соседними событиями в НЕВОД-ШАЛ (2.1 с) и ЭК НЕВОД (50 мс), вероятность ошибочного определения события как совместного не превышает 6×10^{-3} .

На рис. 12 представлен пример совместного события в установке НЕВОД-ШАЛ, в детекторах НЕВОД, ДЕКОР и в системе калибровочных телескопов (СКТ).

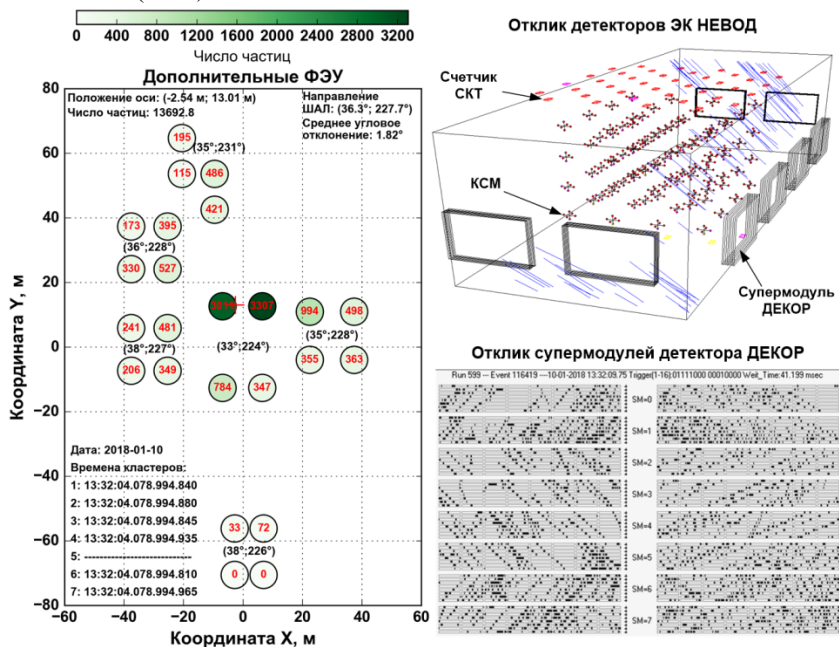


Рис. 12. Совместное событие в установке НЕВОД-ШАЛ и детекторах экспериментального комплекса НЕВОД.

В левой части рисунка представлена визуализация события в НЕВОД-ШАЛ с реконструкцией по откликам дополнительных ФЭУ ДС. По осям рисунка отложены координаты расположения станций. Сами ДС обозначены кругами. Тон круга соответствует числу частиц электронно-фотонной компоненты ШАЛ, зарегистрированных данной ДС. Представлена соответствующая шкала. Число зарегистрированных частиц также указано цифрой. Крест указывает положение оси ШАЛ. Для каждого сработавшего кластера указаны реконструированные по его данным значения зенитного и азимутального углов направления прихода ливня. Указаны времена срабатывания кластеров в событии, результирующее направление ШАЛ, координаты положения оси ливня и суммарное число частиц, зарегистрированных установкой.

В правой части рисунка приводятся результаты геометрической реконструкции отклика детекторов ЭК НЕВОД и супермодулей детектора ДЕКОР в этом же событии. Сверху представлена трехмерная картина отклика детекторов НЕВОД и СКТ. Крестиками изображены сработавшие квазисферические оптические модули детектора НЕВОД, кружками – сработавшие ФЭУ. Прямоугольниками указаны сработавшие сцинтилляционные счетчики установки СКТ. Линии соответствуют трекам мюонов, реконструированным по откликам супермодулей ДЕКОР. Отклик супермодулей ДЕКОР (X- и Y-проекции) представлен снизу.

В данном событии, согласно результатам реконструкции, в супермодулях ДЕКОР было зарегистрировано 86 треков мюонов, пришедших под зенитным и азимутальным углами 37.05° и 227.24° , соответственно. Направление прихода ливня было реконструировано во всех кластерах НЕВОД-ШАЛ. Значения углов θ и ϕ , восстановленные установкой НЕВОД-ШАЛ (36.3° и 227.7° , соответственно), согласуются с реконструированным в детекторе ДЕКОР направлением треков мюонов.

Для определения углового разрешения установки отбирались совместные события, в которых детектором ДЕКОР были зарегистрированы группы мюонов класса Gr3All. К классу Gr3All относятся события ЭК НЕВОД, в которых как минимум в трех супермодулях ДЕКОР, экранированных от электронно-фотонной компоненты ШАЛ водным объемом детектора НЕВОД, наблюдается не менее трех параллельных треков мюонов с азимутальными углами прихода в интервалах (105° ; 165°) и (195° ; 255°). Распределения числа событий в единице телесного угла по интервалам углового отклонения направления в НЕВОД-ШАЛ от направления в ЭК НЕВОД представлены на рис. 13.

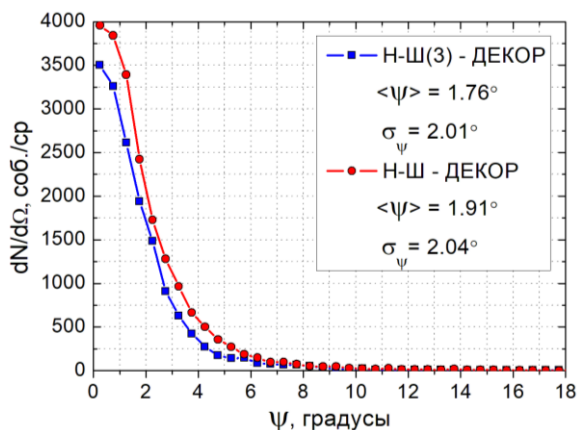


Рис. 13. Распределения по угловым отклонениям направлений ШАЛ, восстановленных НЕВОД-ШАЛ и кластером №3, от направления треков мюонов в детекторе ДЕКОР.

новкой, и ее кластером №3, отклоняется от направления группы мюонов на значение менее 3.75° .

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1) Впервые в мире создана установка ШАЛ из полностью независимых друг от друга кластеров, расположенных на разных высотах:

- площадь установки $\sim 10^4 \text{ м}^2$;
- количество кластеров – 6;
- количество детектирующих станций – 24 (96 сцинтилляционных счетчиков);
- точность временной привязки срабатываний детектирующих станций в кластере – 3 нс;
- угловое разрешение отдельного кластера – 2° ;
- динамический диапазон кластера – от 1 до 25000 частиц, что обеспечивает измерение энергии ШАЛ до 10^{17} эВ.

2) Разработана и создана технологическая линия стандов для индивидуального и поточного исследования характеристик ФЭУ и световых выхода сцинтилляционных пластин, настройки сцинтилляционных счетчиков и детектирующих станций, калибровки сумматоров-мультиплексоров и АЦП измерительных каналов.

Согласно распределениям плотностей событий по угловым отклонениям, угловые разрешения установки и кластера относительно детектора ДЕКОР, оцененные как ширины данных распределений на половине высоты, составляют $\sim 2^\circ$. При этом в 90 % случаев направление ШАЛ, восстановленное и уста-

3) Детально исследованы характеристики 240 фотоумножителей Philips XR3462 и 192 сцинтилляционных пластин сцинтилляционных счетчиков, а также проведена калибровка 6 сумматоров-мультиплексов и 48 АЦП измерительных каналов блоков электроники кластеров детектирующих станций. Протестированы и настроены 96 сцинтилляционных счетчиков, из которых сформировано 24 детектирующие станции.

4) Разработаны алгоритмы и комплекс программного обеспечения для: мониторинга рабочих параметров кластеров, важных для реконструкции параметров регистрируемых ШАЛ (мюонные пики и относительные задержки срабатывания детектирующих станций) и контроля стабильности кластеров и установки (пьедесталы и темпы счета событий ШАЛ); управления системами сбора и обработки данных, глобальной временной синхронизации, технологическими системами установки; обработки данных и реконструкции регистрируемых кластерами событий; объединения данных отдельных кластеров в события ШАЛ и их графического представления.

5) По результатам регистрации ШАЛ на установке показано, что:

- угловое распределение зарегистрированных ШАЛ характеризуется зависимостью \cos^{θ} с показателем степени 8.6, что согласуется с ожидаемым значением;

- показатель спектра широких атмосферных ливней по числу регистрируемых частиц (2.3÷2.4) согласуется со значением, полученным на установке ШАЛ-МГУ (2.5);

- барометрический коэффициент для событий ШАЛ составляет около -1%/мм рт. ст., что согласуется с ожидаемым значением для данного уровня наблюдения.

6) По информации о ШАЛ, зарегистрированных в ходе совместной измерительной серии с другими детекторами экспериментального комплекса:

- определены условия поиска совместных событий в НЕВОД-ШАЛ и других детекторах ЭК НЕВОД: длительность временных ворот отбора – 275 нс, смещение относительно момента срабатывания кластера №3 НЕВОД-ШАЛ – 390 нс, вероятность ошибочного определения события как совместного – менее 6×10^{-3} ;

- показано согласие как топологий откликов разных установок, так и реконструируемых ими характеристик ШАЛ.

Созданная установка включена в режим постоянной эксплуатации в ЭК НЕВОД и позволит на порядок повысить точность оценки

энергетического спектра частиц ПКЛ методом спектров локальной плотности мюонов и провести его калибровку, а также значительно расширит возможности ЭК НЕВОД в мультикомпонентных исследованиях ШАЛ.

Разработанные методы реконструкции ШАЛ, технические решения и созданные аппаратно-программные средства будут использованы при дальнейшем расширении установки до $\sim 0.2 \times 10^6 \text{ м}^2$.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Shulzhenko I.A., Amelchakov M.B., Barbashina N.S., Bogdanov A.G., Chiavassa A., Kindin V.V., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Likiy O.I., Matveev S.Yu., Ovchinnikov V.V., Petrukhin A.A., Shestakov V.V., Shutenko V.V., Yashin I.I. Proposal of NEVOD-EAS shower array. (2013) Journal of Physics: Conference Series, 409 (1), art. no. 012098.
2. И.А. Шульженко, М.Б. Амельчаков, Н.С. Барбашина, А.Г. Богданов, В.В. Киндин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А. Кьявасса, О.И. Ликий, Дж. Маннокки, С.Ю. Матвеев, В.В. Овчинников, А.А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкоро, В.В. Шестаков, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Проект установки НЕВОД-ШАЛ для регистрации широких атмосферных ливней. Известия РАН. Серия физическая, 2013, том 77, № 5, с. 710–712.
3. Khokhlov S.S., Amelchakov M.B., Ampilogov N.V., Astapov I.I., Barbashina N.S., Bogdanov A.G., Chiavassa A., Kamlev N.N., Kindin V.V., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Kutovoy V.Yu., Likiy O.I., Marmocchi G., Ovchinnikov V.V., Petrukhin A.A., Saavedra O., Trincherо G., Shestakov V.V., Shulzhenko I.A., Shutenko V.V., Yashin I.I. Measuring system of the NEVOD-EAS array. (2015) Proceedings of Science, 30-July-2015, art. no. 660.
4. И.А. Шульженко, М.Б. Амельчаков, Н.В. Ампилогов, Н.С. Барбашина, А.Г. Богданов, Н.Н. Камлев, В.В. Киндин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А. Кьявасса, О.И. Ликий, Дж. Маннокки, В.В. Овчинников, А.А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкоро, С.С. Хохлов, В.В. Шестаков, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Статус эксперимента НЕВОД-ШАЛ. Известия РАН. Серия физическая, 2015, том 79, № 3, с. 423–426.
5. Yashin I.I., Amelchakov M.B., Ampilogov N.V., Barbashina N.S., Bogdanov A.G., Chiavassa A., Fomenko S.V., Kamlev N.N., Khokhlov S.S., Kindin V.V., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Kutovoy V.Yu., Likiy O.I., Mannocchi G., Ovchinnikov V.V., Petrukhin A.A., Saavedra O., Trincherо G., Shestakov V.V., Shulzhenko I.A., Shutenko V.V. EAS array of the NEVOD

Experimental Complex. (2015) Journal of Physics: Conference Series, 632 (1), art. no. 012029.

6. О.И. Ликий, Н.В. Ампилогов, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, Н.Н. Камлев, К.Г. Компаниец, Л.А. Кузьмичев, В.Ю. Кутовой, А. Chiavassa, А.А. Петрухин, А. Naungs, С.С. Хохлов, И.А. Шульженко, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Исследование характеристик сцинтилляционных детекторов установки НЕВОД-ШАЛ. Приборы и техника эксперимента, 2016, № 6, с. 5–13.

7. Shulzhenko I.A., Ampilogov N.V., Astapov I.I., Chiavassa A., Khokhlov S.S., Kompaniets K.G., Kutovoy V.Y., Likiy O.I., Yashin I.I. Detector station and registering system of the NEVOD-EAS array cluster. (2016) Journal of Physics: Conference Series, 675 (3), art. no. 032041.

8. Amelchakov M.B., Ampilogov N.V., Astapov I.I., Barbashina N.S., Bogdanov A.G., Chiavassa A., Gromushkin D.M., Khokhlov S.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Likiy O.I., Ovchinnikov V.V., Petrukhin A.A., Saavedra O., Shulzhenko I.A., Yashin I.I. Cluster type EAS array of the NEVOD experimental complex. (2017) Journal of Instrumentation, 12 (6), art. no. C06033.

9. Shulzhenko I.A., Amelchakov M.B., Barbashina N.S., Bogdanov A.G., Brovtsev D.S., Chiavassa A., Fomin N.E., Gromushkin D.M., Kamlev N.N., Khokhlov S.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Likiy O.I., Ovchinnikov V.V., Petrukhin A.A., Saavedra O., Shutenko V.V., Yashin I.I. Scintillation array of the Experimental Complex NEVOD for EAS investigations. (2017) EPJ Web of Conferences, 145, art. no. 07003.

10. И.А. Шульженко, М.Б. Амельчаков, Н.В. Ампилогов, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Г. Богданов, Н.Н. Камлев, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А. Кьявасса, О.И. Ликий, В.В. Овчинников, А.А. Петрухин, О. Сааведра, Н.Е. Фомин, С.С. Хохлов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Центральная часть установки НЕВОД-ШАЛ: первые результаты. Известия РАН. Серия физическая, 2017, том 81, № 4, с. 524–527.

11. Устройство для определения направления прихода широких атмосферных ливней: пат. 2549612 Рос. Федерация: МПК G01T 1/20 / И.И. Астапов, М.Б. Амельчаков, А.Г. Богданов, Д.М. Громушкин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, С.С. Хохлов, И.А. Шульженко, И.И. Яшин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". – № 2013157746/28; заявл. 25.12.2013; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12 (II ч.) . – 10 с.

Подписано в печать __.__.20__. Объем __ п.л. Тираж 100 экз. Заказ __

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31