

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Иркутский государственный университет»

На правах рукописи
УДК 524.1

Иванова Анна Леонидовна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ
УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ $10^{16} \div 10^{18}$ ЭВ

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск 2015

Работа выполнена на кафедре теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ИГУ»).

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор Николай Николаевич Калмыков, главный научный сотрудник лаборатории наземной гамма-астрономии отдела космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва;

доктор физико-математических наук, Николай Михайлович Буднев, декан физического факультета ФГБОУ ВПО «ИГУ», г. Иркутск.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Сергей Вадимович Троицкий, ведущий научный сотрудник отдела теоретической физики федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерных исследований Российской академии наук», г. Москва;

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Михаил Иванович Правдин, ведущий научный сотрудник лаборатории широких атмосферных ливней федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет», г. Барнаул.

Защита диссертации состоится “__”_____ 2015 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д501.001.77 на базе МГУ имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-ый корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М. В. Ломоносова, а также по адресам в интернете: _____.

Автореферат разослан “__”_____ 2015 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д501.001.77,
доктор физ.-мат. наук, профессор

_____ С. И. Страхова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы:

Космические лучи являются уникальным природным источником частиц высоких и сверхвысоких энергий и позволяют получать информацию как о микромире – природе и взаимодействиях элементарных частиц и ядер, так и о крупномасштабных процессах, происходящих не только в нашей Галактике, но и за ее пределами.

Несмотря на то, что с момента открытия первичных космических лучей (ПКЛ) прошло более 100 лет, вопросы, связанные с этим явлением, не теряют своей актуальности. Постоянно уточняются и углубляются наши представления о составе ПКЛ, происхождении, механизмах распространения в межзвездной и межпланетной средах, характере ядерных взаимодействий, в которых они участвуют.

Прямые методы измерений потоков ПКЛ высоких энергий (измерения на спутниках [1]: эксперименты “Протон [2-4], Сокол [5,6], PAMELA [7], AMS-01 [8,9], AMS-02 [10,11], баллонные эксперименты [1]: JACEE [12-15], RANJOB [16, 17], ATIC Collaboration [18] и др. [1]) позволили изучить массовый состав космических лучей и энергетические спектры различных компонент до энергий приблизительно 10^{14} эВ. В эксперименте Протон-4 была получена рекордная точка в спектре всех частиц, соответствующая 2 ПэВ. Предполагается, что новые эксперименты на спутниках (см., например, проект INCA [19]) смогут в будущем измерить состав и энергетический спектр ПКЛ в области «колена» ($10^{15} - 10^{16}$ эВ). Прямые измерения наиболее надежны [20], но они реализуемы только при относительно невысоких энергиях (в настоящее время не выше 10^{15} эВ), где поток космических лучей достаточно велик и можно детектировать частицы установленными на спутники детекторами за пределами атмосферы. При энергиях свыше 10^{15} эВ поток КЛ становится настолько малым, что единственный способ исследования космических лучей -

регистрация широких атмосферных ливней (ШАЛ) с помощью системы синхронно работающих детекторов, размещенных на большой площади [20]. Эти детекторы регистрируют те или иные вторичные частицы и излучения ШАЛ, порожденных первичной космической частицей при попадании в атмосферу. Однако, при восстановлении энергии, массы и направления первичной частицы по данным об измеренных параметрах ШАЛ следует помнить, что связь между характеристиками первичной частицы и ШАЛ носит вероятностный характер.

При прохождении космических лучей через атмосферу Земли в результате ядерных и электромагнитных взаимодействий происходит каскадное рождение элементарных частиц – развивается широкий атмосферный ливень. На малых расстояниях от оси ливня частицы ШАЛ образуют диск. Радиус этого диска определяется кулоновским рассеянием ливневых частиц в атмосфере, а разброс в длинах траекторий частиц, приходящих в данную точку, приводит к возникновению толщины диска, растущей с удалением от оси ливня. В процессе развития ливня в атмосфере число вторичных частиц увеличивается до глубины, где средняя энергия вторичных частиц равняется критической энергии. Ниже этого уровня число частиц уменьшается приблизительно по экспоненте. Глубина атмосферы, на которой в каскаде достигается наибольшее число заряженных частиц, называется глубиной максимума ливня X_{\max} . В ходе развития каскада образуются компоненты ШАЛ – адронная, электронно-фотонная, мюонная, нейтринная, а также генерируются оптические (черенковское и флуоресцентное) и радио излучения. Наиболее многочисленными среди заряженных частиц ШАЛ являются электроны и позитроны. При энергии ШАЛ около 1 ПэВ число электронов на уровне моря $\approx 10^5$ – 10^6 . Количество мюонов составляет примерно 10% от числа электронов. Число гамма-квантов примерно в два раза превышает число электронов, а адроны составляют около 1% от полного числа частиц в

ШАЛ. Именно вторичные частицы ШАЛ, а также излучения, создаваемые заряженными частицами ливня, и используются для исследования ПКЛ высоких, сверхвысоких и предельно высоких энергий. Размеры ливня зависят от энергии первичной частицы. Для первичной частицы с энергией $E_0 > 10^{16}$ эВ характерный поперечный размер ливня на поверхности Земли достигает нескольких сотен метров, а число составляющих его вторичных частиц, в основном электронов и гамма-квантов, – более 10^7 .

Для реализации метода ШАЛ требуются детекторы большой площади, рассчитанные на длительную экспозицию, что обусловлено малостью потока ПКЛ сверхвысоких энергий. Наиболее распространённый путь – это строительство наземных установок площадью от долей до тысяч квадратных километров, которые могут эксплуатироваться длительное время. Несмотря на интенсивное изучение, природа космических лучей сверхвысоких энергий до сих пор до конца не ясна, и является предметом исследования многих современных экспериментов, таких как AUGER[21], ЯкуШАЛ[22], Тунка-133[23,24], KASCADE [25], KASCADE-Grande [26], ICE TOP[27] и др.

Другая особенность изучения ПКЛ сверхвысоких энергий связана с необходимостью опираться на данные модельных расчётов при интерпретации экспериментальных данных. Современные ускорительные эксперименты заканчиваются на эквивалентной лабораторной энергии $\approx 10^{17}$ эВ [28], тогда как наблюдаются ПКЛ со значительно более высокими энергиями, так что имеется необходимость вести моделирование ШАЛ, порожденных ПКЛ с энергиями до 10^{21} эВ.

Особый интерес представляет изучение космических лучей в энергетическом диапазоне $10^{16} - 10^{18}$ эВ. До энергий начальной части этого диапазона, согласно современным представлениям, космические лучи могут ускоряться в оболочках сверхновых. Существуют серьезные аргументы в пользу того, что при более высоких энергиях в этом

диапазоне происходит переход от галактических к внегалактическим космическим лучам [20]. Однако, несмотря на то, что изучение именно этого энергетического диапазона имеет существенное значение для понимания происхождения и распространения космических лучей в нашей Галактике, наблюдается недостаток экспериментальной информации о ПКЛ с энергией $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Это связано с тем, что «плотные» экспериментальные установки при малых расстояниях между детекторными пунктами имеют слишком маленькую площадь для набора достаточной статистики, а гигантские установки в большинстве (обсерватория AUGER, TA, HiRes, AGASA) имеют существенно более высокий энергетический порог.

Для регистрации ШАЛ при энергиях $10^{16} - 10^{18}$ эВ требуются установки с площадью не менее 1 км^2 и расстоянием между детекторами не более 100 м. Для увеличения количества и качества информации о регистрируемом ШАЛ перспективным представляется регистрация установкой не одной, а нескольких компонент ливня, например, черенковского излучения, его мюонной и электронной составляющих.

Установка Тунка-133 [23], расположенная в Тункинской долине (республика Бурятия) в 50 км от озера Байкал, включает в себя в настоящее время 175 оптических детекторов, регистрирующих черенковское излучение ШАЛ. Все детекторы сгруппированы в 25 кластеров, по 7 детекторов в каждом. Шесть детекторов одного кластера расположены в вершинах правильного шестиугольника, один в центре. Расстояние между детекторами 85 метров. Строительство центральной части установки, включающей в себя 19 кластеров, распределенных на площади около квадратного километра, было завершено в 2009 году. В 2010-2012 годах развернуто дополнительно 6 внешних кластеров, так что площадь установки Тунка-133 выросла до 3-х квадратных километров.

В 2013 году в рамках создания гамма-обсерватории TAIGA [24] (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy) в Тункинском астрофизическом центре коллективного пользования ИГУ началось строительство сцинтилляционной установки Tunka-Grande. Сцинтилляционная установка будет вести регистрацию ШАЛ совместно с установками Тунка-133 и Tunka-Rex (Tunka- Radio extension) [29]. Это позволит значительно увеличить число регистрируемых событий, улучшить точность измерения параметров ШАЛ, получить более надежные сведения о массовом составе ПКЛ, расширить энергетический диапазон в область сверхвысоких энергий и провести абсолютную энергетическую калибровку черенковской установки Тунка-133. Таким образом, дополнение установок Тунка-133 и Tunka-Rex сцинтилляционными детекторами мюонов и электронов позволит получать качественно новые экспериментальные данные о космических лучах в области энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ [23].

Впоследствии установка Tunka-Grande станет частью комплекса для измерения заряженной компоненты ШАЛ в составе гамма-обсерватории TAIGA, и будет, том числе, использоваться для исследования потоков гамма-квантов сверхвысоких энергий при совместной работе с другими установками: Тунка-133, Tunka-Rex, TAIGA-HiSCORE (прототип установки – Tunka-HiSCORE) и TAIGA-IACT [24]. В этих исследованиях также будут использоваться результаты, полученные в данной диссертации.

Цель диссертационной работы:

Цель диссертационной работы заключается в исследовании возможностей и разработке способов изучения первичных космических лучей в области энергий $10^{16} \div 10^{18}$ эВ с помощью сцинтилляционной установки Tunka-Grande. Для этого было необходимо:

Применительно к условиям конкретного эксперимента произвести расчет пространственного распределения заряженной и мюонной компонент ШАЛ, корреляции числа электронов и числа мюонов с энергией первичной частицы, на основе результатов моделирования развития ШАЛ в атмосфере методом Монте-Карло.

Разработать программное обеспечение для моделирования процесса регистрации заряженной компоненты ШАЛ с помощью установки Tunka-Grande и выполнить с его помощью расчеты, необходимые для выбора ее геометрических размеров и конструкции детекторов, оптимальных с точки зрения достижения максимально возможной эффективности регистрации ливней, в частности, определить целесообразность размещения сцинтилляционных детекторов у внешних кластеров установки Тунка-133, а также оценить энергетический порог и другие характеристики установки Tunka-Grande.

Создать методики обработки данных, получаемых с помощью установки Tunka-Grande, и разработать мультикомпонентный метод восстановления энергетического спектра и массового состава ПКЛ по этим экспериментальным данным.

Научная новизна работы:

К числу новых результатов следует отнести создание методики моделирования и обработки данных сцинтилляционного комплекса Tunka-Grande, построенного в Тункинской долине. В программы заложены расчетные зависимости между полным числом заряженных частиц ШАЛ, полным числом мюонов в ливне и энергией первичной частицы, зависимости флуктуаций числа заряженных частиц и числа мюонов от энергии первичной частицы, полученные из анализа результатов моделирования в программном пакете Aires [30] для условий Тункинской долины.

В диссертации впервые:

Разработан мультикомпонентный метод восстановления параметров ШАЛ на основе экспериментальных данных, получаемых с помощью системы детекторов установки Tunka-Grande, регистрирующих мюонную и электрон-фотонную компоненты ШАЛ. Проведено моделирование эксперимента Tunka-Grande, позволившее выяснить качество работы различных процедур восстановления параметров первичной частицы и отладить окончательный вариант программы.

Разработана методика измерения электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ с помощью детекторов заряженных частиц и мюонных детекторов большой площади, позволяющая независимо от калориметрической черенковской установки Тунка-133 восстанавливать исходные параметры ШАЛ и вызвавшей его первичной частицы с хорошей точностью.

Используя полученные с помощью разработанного пакета программ результаты, проведена оценка эффективности, энергетического порога и ряда других параметров установки Tunka-Grande. Показано, что при попадании оси ливня в пределы сцинтилляционной установки пороговая энергия установки, соответствующая эффективности регистрации 90%, равна $8 \cdot 10^{15}$ эВ, при энергии 10^{16} эВ эффективность составляет 95%, а при энергии $3 \cdot 10^{16}$ эВ доходит до 99%.

Показано, что погрешность восстановления по данным установки Tunka-Grande числа электронов ШАЛ составляет 17% при энергии 10^{15} эВ, а при энергии 10^{16} эВ уменьшается до 10%. Начиная с энергии 10^{16} эВ точность восстановления числа мюонов 25%, ошибка определения направления прихода первичной частицы оказывается не больше 1.4° . Погрешность в определении положения оси ливня составляет 17м при энергии 10^{16} эВ, а при энергии $3 \cdot 10^{16}$ эВ не превышает 10 м.

Проведен анализ возможности восстановления энергетического спектра ПКЛ по данным новой установки. Показано, что показатель энергетического спектра может быть восстановлен с погрешностью порядка 0.01, и лишь в области энергий более 10^{17} эВ, где нельзя рассчитывать на получение большой статистики за разумное время работы (3 года), погрешность доходит до 0.05. Показано также, что возможные нерегулярности в спектре на масштабе $\Delta(\lg E)$ порядка 0.2 могут быть адекватно воспроизведены установкой.

Проведен анализ возможности восстановления массового состава ПКЛ по данным новой установки и показано, что достигнутые точности в определении числа электронов и мюонов позволяют вести анализ массового состава стандартными методами. Дополнительное привлечение к анализу данных черенковской части установки о глубине максимума ливня даёт возможность значительно (вплоть до порядка) повысить вероятность выделения различных групп ядер.

Научная и практическая значимость работы:

Результаты диссертационной работы важны для изучения первичного космического излучения. Они имеют большое значение для целого ряда практических приложений, включая задачи совместного анализа данных с установок, использующих детекторы различного типа, экспериментальной отработки методов исследования ПКЛ путем регистрации радиоизлучения ШАЛ, абсолютной энергетической калибровки черенковских установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, выработки триггера для радио-установки Tunka-Rex [29].

Разработанное программное обеспечение будет использовано при регистрации мюонов и электронов ШАЛ в Тункинском эксперименте.

Моделирование эксперимента позволило определить оптимальную геометрическую конфигурацию установки Tunka-Grande, позволяющую достигнуть высокую эффективность регистрации ливней.

Качество представленной методики реконструкции событий (при $E_0 > 10^{16}$ эВ точность восстановления энергии первичной частицы не хуже 15%) позволяет использовать восстановленные таким образом значения энергии первичной частицы для проведения постоянного мониторинга точности абсолютной энергетической калибровки черенковских установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE путем сравнения результатов, получаемых разными методами на установках Тунка-133, TAIGA-HiSCORE и Tunka-Grande.

На защиту выносятся:

1. Метод моделирования процесса регистрации ШАЛ сцинтилляционными детекторами установки Tunka-Grande и методика восстановления параметров ливней и характеристик ПКЛ по данным, полученным с ее помощью.
2. Оценка эффективности регистрации ШАЛ при попадании оси ливня в пределы сцинтилляционной установки, энергетического разрешения, радиуса эффективной регистрации ливней установки Tunka-Grande.
3. Точность и качество восстановления основных параметров ШАЛ (направления прихода и положения оси ливня, полного числа заряженных частиц и полного числа мюонов), полученных при использовании разработанной методики обработки событий.
4. Результаты восстановления энергетического спектра ПКЛ по смоделированным данным в области энергий 10^{16} - 10^{18} эВ при использовании разработанной методики обработки событий.
5. Возможность анализа массового состава ПКЛ по данным установки Tunka-Grande.

Вклад автора:

Автор принимала участие на всех этапах создания сцинтилляционной установки в Тункинской долине.

При непосредственном участии автора разработан пакет программ, позволяющий оценить не только характеристики новой установки, но и качество разработанной методики восстановления исходных параметров ШАЛ. Создана программа моделирования отклика сцинтилляционных детекторов установки Tunka-Grande. Разработано программное обеспечение, позволяющее обрабатывать как «искусственные» события ШАЛ, так и реальные экспериментальные данные. Автором проведен анализ возможности восстановления особенностей в энергетическом спектре ПКЛ при помощи разработанных ей программ и алгоритмов.

На основе данных пакета программ Aires автором выполнен расчёт средних ФПР мюонов в диапазоне первичных энергий $10^{16} \div 10^{18}$ эВ в рамках модели QGSJET [31], и проведен их анализ, получены расчетные зависимости между полным числом заряженных частиц в ливне и полным числом мюонов ШАЛ от энергии первичной частицы. Существенная часть публикаций по теме диссертации подготовлена и написана автором.

Апробация работы:

Результаты диссертации докладывались на V Всероссийской молодежной конференции «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» (г. Москва, 2013г), международной научной конференции «The 40th COSPAR SCIENTIFIC ASSEMBLY» (г. Москва, 2 – 9 августа 2014 г), «33-ей Всероссийской конференции по космическим лучам» (г. Дубна, 11 – 15 августа 2014г), международной байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде», г. Иркутск, 14 – 18 сентября 2015г.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 14 научных статей в международных журналах индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, из которых 3 научные статьи

опубликованы в реферируемых российских журналах, рекомендованных ВАК.

Структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Содержит 41 рисунок и 7 таблиц; список литературы включает 110 наименований. Объем диссертации 114 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, определяется цель работы и изложена структура диссертации. Определен личный вклад автора в работу, кратко изложены основные результаты, новизна, практическая и научная ценность работы.

В **первой главе** дан обзор литературы по основным экспериментам, ведущим исследования ПКЛ в области высоких и сверхвысоких энергий методом ШАЛ. Наибольшее внимание уделено методикам регистрации и восстановления экспериментальных данных. Первыми экспериментами по изучению космического излучения в области энергий выше 10^{18} эВ стали американская установка Volcano Ranch[32], английская установка Haverah Park[33], австралийская установка SUGAR[34], AKENO и её продолжение Akeno Giant Air Shower Array (AGASA)[35, 36] в Японии, американский эксперимент Fly's Eye [37] и его преемник HiRes [38]. К действующим гигантским установкам относятся Якутская установка ЯкуШАЛ [22] (Россия), установка Pierre Auger Observatory (Auger) [21] в Аргентине, и Telescope Array (TA) в США [39]. Существенный вклад в изучение КЛ в энергетическом диапазоне 10^{16} – 10^{18} эВ внесли такие установки, как черенковская установка Тунка-133[23, 24], сцинтилляционная установка KASCADE-Grande [26], сцинтилляционная установка ШАЛ МГУ[40], в ближайшее время появятся результаты работы ледовой черенковской установки IceTop[41].

В диссертационной работе рассмотрены основные принципы работы перечисленных установок, описаны используемые на них методики восстановления параметров ШАЛ и реконструкции энергетического спектра ПКЛ.

Во **второй главе** приведено описание установки Tunka-133[23, 42], предназначенной для регистрации широких атмосферных ливней с энергией 10^{15} – 10^{18} эВ, описаны системы отбора установки. Рассмотрены перспективы создания гамма-обсерватории TAIGA[24] в рамках проекта «Гамма-астрономия мульти-ТэВных энергий и происхождение Галактических космических лучей», приведено краткое описание установок, которые в будущем войдут в её состав. Подробно описан сцинтилляционный комплекс Tunka-Grande, развертывание которого началось в Тункинской долине в 2013 году. Первая очередь сцинтилляционного комплекса будет включать в себя 19 станций, размещённых на территории черенковской установки Тунка-133 в круге с радиусом ~ 400 м. Каждая из этих станций установки Tunka-Grande расположена на расстоянии не более 30 метров от центров внутренних кластеров черенковской установки Тунка-133 и включает в себя наземный детектор электронов на базе 12 сцинтилляционных счетчиков общей площадью 8 м^2 , ранее работавших в составе установки KASCADE-Grande, и подземный детектор мюонов общей площадью 5 м^2 , состоящий из 8 таких же счетчиков расположенных в бетонном контейнере под слоем грунта толщиной не менее 1.5 м.

Рисунок 1 демонстрирует схему расположения сцинтилляционных станций на площади установки Тунка-133. На рисунке 2 приведена схема сцинтилляционной станции.

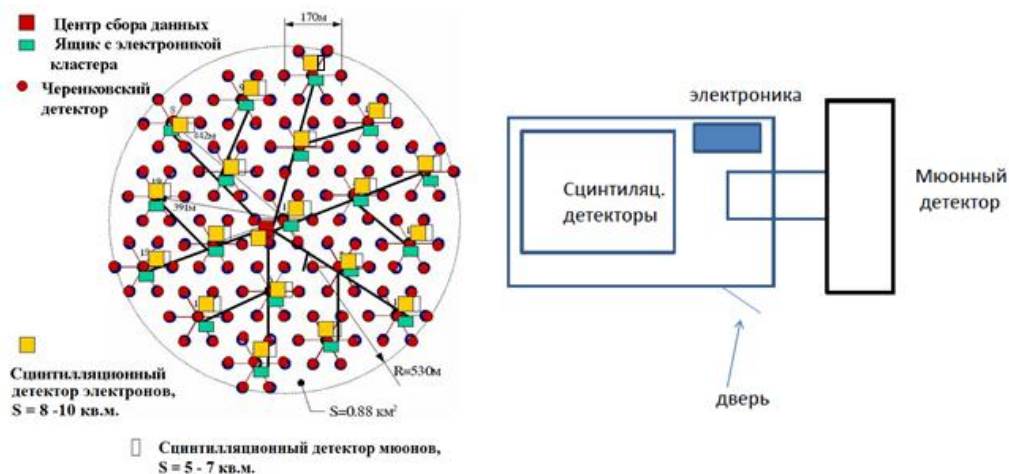


Рис.1 Схема расположения сцинтилляционных детекторов

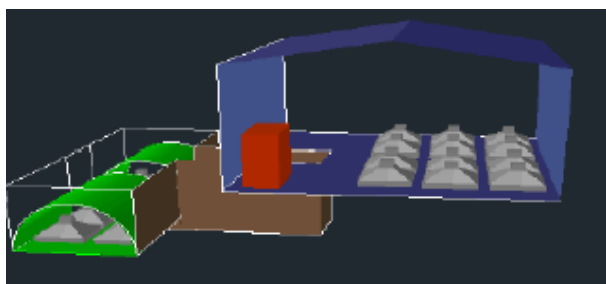


Рис. 2. Схема сцинтилляционной станции

Электроника сцинтилляционных станций подобна электронике установки Тунка-133 и расположена в легких контейнерах, в которых находятся наземные счетчики частиц. Дополнительным является наличие в каждой станции 2-х шестиканальных аналоговых сумматоров сигналов с детектора электронов. Первая половина счетчиков электронного детектора подключена к первому сумматору, вторая - ко второму. Таким образом, станции могут передавать информацию как о поступлении «внешнего» триггерного сигнала от ближайшего кластера установки Тунка-133, так и о поступлении сигнала от «локального» триггера детектора электронов. Условие выработки «локального» триггера детектора электронов – наличие сигнала от релятивисткой частицы на выходе каждого сумматора в пределах 100 нс. Порог срабатывания каждого отдельного

сцинтилляционного счетчика - 1 релятивистская частица. Мюонный детектор считается сработавшим при срабатывании не менее одного из составляющих его счетчиков с порогом 1 релятивистская частица.

Летом 2013 г. был произведен первый запуск центрального наземного детектора электронов. В 2014 году полностью закончены работы по монтажу остальных 18 наземных детекторов электронов и 7 подземных детекторов мюонов. В настоящее время работает 7 станций наблюдения из внутренней части Tunka-Grande площадью 0.2 км². В таком составе установка Tunka-Grande совместно с установками Тунка-133 и Tunka-Rex вела регистрацию событий ШАЛ в течение весеннего сезона 2015г. К осени 2015 года планируется закончить работы по монтажу подземных мюонных детекторов и ввести в эксплуатацию 12 внешних станций наблюдения.

В третьей главе обосновывается необходимость математического моделирования ШАЛ и приводится описание программного пакета Aires [30], предназначенного для изучения эволюции и свойств широких атмосферных ливней. Представлены полученные в результате анализа данных Aires зависимости полного числа электронов $N_e(E_0)$ и полного числа мюонов $N_\mu(E_0)$ от энергии первичных частиц в предположении чисто протонного и чисто железного состава КЛ для трех значений зенитного угла θ (0° , 30° , 45°). При усреднении по всем зенитным углам в предположении равной доли протонов и ядер железа в ПКЛ зависимости $N_e(E_0)$ и $N_\mu(E_0)$ принимают следующий вид:

$$N_e(E_0) \sim (E_0/1 \text{ ПэВ})^{1.14}, \sigma(N_e/\langle N_e \rangle) = 0.37 \quad (1)$$

$$N_\mu(E_0) \sim (E_0/1 \text{ ПэВ})^{0.96}, \sigma(N_\mu/\langle N_\mu \rangle) = 0.2. \quad (2)$$

Стандартные ошибки в определении значений степени в указанных формулах не превосходят 0.005.

Получена зависимость флуктуаций полного числа электронов ШАЛ от энергии первичной частицы. Величина среднего квадратического отклонения полного числа электронов падает с ростом энергии первичных частиц и аппроксимируется функцией вида:

$$\sigma(N_e/\langle N_e \rangle) \sim \sigma_0(E_0/1 \text{ ПэВ})^{-\beta}, \quad (3)$$

где β меняется в пределах от 0.01 для ливней от первичного железа, пришедших под углом в 45° , до 0.1 для вертикальных ливней образованных первичными протонами.

Описана процедура оценки пробегов поглощения электронов и мюонов ШАЛ по результатам моделирования в программе AIRES. Представлены построенные по данным AIRES средние функции пространственного распределения мюонов в ШАЛ для разных зенитных углов (0° , 30° , 45°), энергий ($\lg(E_0(\text{эВ})/1 \text{ эВ}) = 16, 16.3, 16.7, 17, 17.3, 17.7$) и сортов ядер (p, Fe). В качестве аппроксимирующей функции выбрана функция Грейзена[43] с фиксированными параметрами $a = 0.61$ и $R_0 = 180 \text{ м.}$:

$$f(r) = C_{norm} \cdot \left(\frac{r}{R_0}\right)^{-a} \cdot \left(1 + \frac{r}{R_0}\right)^{-b}. \quad (4)$$

В **четвёртой главе** представлено программное обеспечение, разработанное для моделирования работы установки Tunka-Grande и описана процедура «регистрации» события ШАЛ. При моделировании работы сцинтилляционного комплекса энергия первичной частицы разыгрывалась по спектру с изломом при энергии $2 \cdot 10^{15}$. Заложенный дифференциальный энергетический спектр ПКЛ имеет вид $I(E_0) \sim E_0^{-(\gamma+1)}$. Показатель $\gamma = 1.5$ при $E_0 \leq 2 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$ и $\gamma = 2$ после излома. Выбранное положение излома в энергетическом спектре ПКЛ соответствует данным большинства моделей, объясняющих эту особенность спектра ПКЛ, а также результатам экспериментальных исследований [44]. Существующие экспериментальные данные показывают, что в действительности при

энергии $> 10^{16}$ эВ энергетический спектр имеет более сложную структуру [45]. Однако на первом этапе разработки программного обеспечения достаточным было использование такого упрощенного вида энергетического спектра ПКЛ. Кроме того, рассматривались и более сложные формы спектра – спектр с двумя изломами ($\gamma_1 = 1.5$, $E_1 = 3 \cdot 10^{15}$ эВ, $\gamma_2 = 2$, $E_2 = 7 \cdot 10^{17}$ эВ, $\gamma_3 = 2.3$) и особенностью параболического вида в области $1.2 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{17}$ эВ, и аналитическая аппроксимация экспериментального спектра, полученного на установке Тунка-133 ($\gamma_1 = 1.5$, $E_1 = 3 \cdot 10^{15}$ эВ, $\gamma_2 = 2$, $E_2 = 8 \cdot 10^{15}$ эВ, $\gamma_3 = 2.3$, $E_3 = 2 \cdot 10^{16}$ эВ, $\gamma_4 = 2$, $E_4 = 2 \cdot 10^{17}$ эВ, $\gamma_5 = 2.33$).

Азимутальный угол первичной частицы разыгрывался равномерно от 0 до 360 градусов, а в качестве распределения по зенитному углу θ использовалось эмпирическое соотношение $W(\theta) \sim \cos^n \theta$, где $n = 8$. Положение оси ливня в плоскости установки разыгрывалось равномерно по площади.

Полное число электронов и мюонов в каждом индивидуальном ливне разыгрывалось по логарифмически нормальному распределению, параметры которого определялись так, чтобы имело место соответствие со средним значением и средним квадратичным отклонением для электронов и мюонов [46]. При этом учитывались расчетные пробеги поглощения полного числа электронов и мюонов, не противоречащие данным [47].

В качестве функции пространственного распределения (ФПР) электронов использовалась эмпирическая функция [48], аналогичная известной аппроксимации Нишимуры-Каматы-Грейзена [43], но с параметром возраста, зависящим от расстояния:

$$\rho_e(r) = N_e \cdot C_{\text{norm}} \cdot \left(\frac{r}{R_m}\right)^{s(r)-2} \cdot \left(1 + \frac{r}{R_m}\right)^{s(r)-4.5}, \quad (4.11)$$

где $R_m = 80$ м, $s(r) = s^* + \alpha(r)$, параметр s^* разыгрывает по распределению Гаусса от минимального значения 0.3 до максимального 1.8, со средним значением 1.1 и средним квадратичным отклонением 0.1. Зависимость $\alpha(r)$ приведена на рис.3. ФПР мюонов описывалась функцией Грейзена [43], параметры которой определялись по данным расчетов, связаны с возрастом ШАЛ и растут по мере развития ливня в атмосфере.

Далее моделировались плотности электронов и мюонов в ШАЛ в детекторах установки и, с учётом пуассоновских флуктуаций согласно [49], определялось число частиц, попавших в эти детекторы. Затем разыгрывались задержки времени прихода частиц относительно плоского фронта ШАЛ с учётом крутизны фронта. Предполагалась точность измерения времени 10 нс. В качестве задержки, характеризующей детектор электронов в целом, выбиралась минимальная. Событие ШАЛ считалось «зарегистрированным», если в пределах заданного временного окна происходила выработка локального триггера хотя бы в 3 сцинтилляционных станциях.

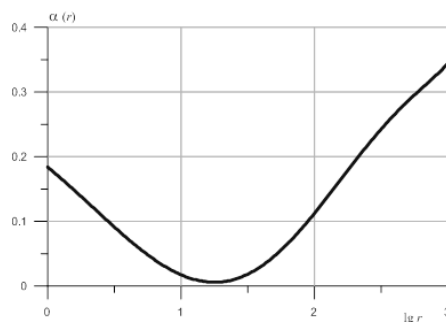


Рис.3. Зависимость $\alpha(r)$.

По итогам моделирования формировались файлы выходных данных о зарегистрированных событиях ШАЛ, которые, впоследствии, восстанавливались с помощью программы обработки событий.

В **главе 5** представлена разработанная программа восстановления экспериментальных данных Tunka-Grande, описаны основные этапы восстановления событий ШАЛ на примере обработки данных

моделирования. Приведены результаты восстановления смоделированных событий, позволяющие оценить средние характеристики, в том числе, и отражающие качество самого моделирования. Программа восстановления включает в себя: а) восстановление основных параметров ШАЛ: направления прихода, положения оси в плоскости установки, полного числа заряженных частиц, полного числа мюонов с энергией >0.5 ГэВ, а также плотности заряженных частиц на расстоянии 300 м. от оси ШАЛ; б) восстановление энергии первичной частицы; в) сопоставление исходных распределений по E_0 , N_e , N_μ , ρ_{300} , θ , φ и полученных в результате обработки; г) оценку ошибок определения параметров в зависимости от энергии первичной частицы и построение спектров по E_0 , N_e , N_μ , ρ_{300} , с использованием восстановленных параметров ШАЛ и сравнение их с исходными спектрами.

На первом этапе восстановления событий по данным детекторов электронов вычислялось направление прихода ливня. Для этого находились три пункта регистрации с наибольшим зарегистрированным числом частиц и решалась система трех уравнений, связывающих времена прихода частиц в отобранные детекторы с направлением оси ШАЛ. Затем вычислялись положение оси ШАЛ в плоскости установки, полное число электронов N_e и мюонов N_μ . При этом использовался метод максимума функции правдоподобия. По полному числу электронов определялось E_0 по формуле связи между E_0 и N_e . Найденное значение E_0 считалось восстановленным значением энергии первичной частицы. Для получения необходимой статистики было разыграно и обработано $5 \cdot 10^6$ «зарегистрированных» событий.

Общая информация по результатам обработки ливней с положением оси внутри площади сцинтилляционной установки, для которых восстановлены все исходные параметры представлена в таблице 1.

Средние ошибки восстановления, характеризующие качество разработанной методики обработки данных представлены в таблице 2.

Табл. 1

Средние значения и средние квадратические отклонения параметров ШАЛ

Параметр	Восстановленные ливни			Исходные ливни		
	Среднее значение	σ	Число событий	Среднее значение	σ	Число событий
E_0 (эВ)	$6 \cdot 10^{15}$	1.878	1338259	$5 \cdot 10^{15}$	2.128	1338259
N_e	$7.8 \cdot 10^5$	2.545	1338259	$7.6 \cdot 10^{15}$	2.990	1338259
N_μ	$2.2 \cdot 10^5$	1.341	164980	$2.2 \cdot 10^5$	1.421	164980
θ°	17.18	8.598	1338259	17.05	8.478	1338259
φ°	179.88	103.922	1338259	179.97	103.921	1338259
s	1.15	0.222	1338259	1.13	0.095	1338259

Табл. 2

Средние ошибки восстановления параметров ШАЛ, «сгенерированных» первичными протонами и ядрами железа с энергией $16 < \lg E_0 < 18$

Ошибка	среднее значение	Среднеквадратическая ошибка ошибки	Число событий
dE_0/E_0	0.152	0.32	1338259
dN_e/N_e	0.104	0.26	1338259
$d\rho_{300}/\rho_{300}$	0.070	0.19	1338259
dN_μ/N_μ	0.254	0.35	164980
ΔR (м)	17.12	0.2	1338259
$\Delta\theta\varphi$ (градусы)	1.370	0.02	1338259
Δs	0.011	0.006	1338259

Средний угол $\Delta\theta\varphi$ – есть усредненный по событиям плоский угол между заданным направлением прихода и восстановленным.

Восстановленный по смоделированным данным энергетический спектр ПКЛ представлен на рисунке 4, *а*, *б*, *в*. В качестве аналитического энергетического спектра ПКЛ на рис. 4, *а* был выбран степенной энергетический спектр $I(E_0) \sim E_0^{-(\gamma+1)}$ с одним изломом. Начиная с энергии 10^{16} эВ показатель степени заложенного спектра составляет $\gamma = 2$, показатель степени восстановленного спектра - $\gamma = 2,001$. На рис. 4, *б* – степенной спектр с двумя изломами и особенностью параболического вида. В интервале энергий $10^{16} - 1.2 \cdot 10^{17}$ эВ γ заложенного спектра составляет 2, γ восстановленного спектра 2.003. После особенности при энергиях $2 \cdot 10^{17} - 7 \cdot 10^{17}$ эВ показатель степени заложенного спектра составляет $\gamma = 2$, показатель степени восстановленного спектра - $\gamma = 1.976$. При энергиях выше $7 \cdot 10^{17}$ эВ показатель степени заложенного спектра – $\gamma = 2.3$, γ восстановленного спектра - 2.339. На рис. 4, *в* – аппроксимация экспериментального энергетического спектра ПКЛ, полученного по данным 3-х зимних сезонов измерений на установке Тунка-133. Для получения данного экспериментального спектра были отобраны ливни с положением оси в центральной части установки ($R < 450$ м) и зенитным углом прихода не более 45° градусов [50]. Число отобранных событий ШАЛ с энергией более $6 \cdot 10^{15}$ эВ составило 170000, 60000 из которых с энергией $> 10^{16}$ эВ, 600 – с энергией $> 10^{17}$ эВ. При энергиях $10^{16} - 2 \cdot 10^{16}$ эВ показатель степени заложенного спектра - $\gamma = 2.23$, показатель степени восстановленного спектра $\gamma = 2.228$. При энергиях $2 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$ эВ для заложенного спектра γ составляет 2, для восстановленного спектра - $\gamma = 1.998$. При энергиях выше $7 \cdot 10^{17}$ эВ γ заложенного спектра – 2.33, γ восстановленного спектра - 2.334. Из рис.4,*а*, *б*, *в* видно, что сцинтилляционный комплекс позволит регистрировать а затем восстанавливать с достаточной точностью различные особенности в спектре ПКЛ начиная с энергии 10^{16} эВ.

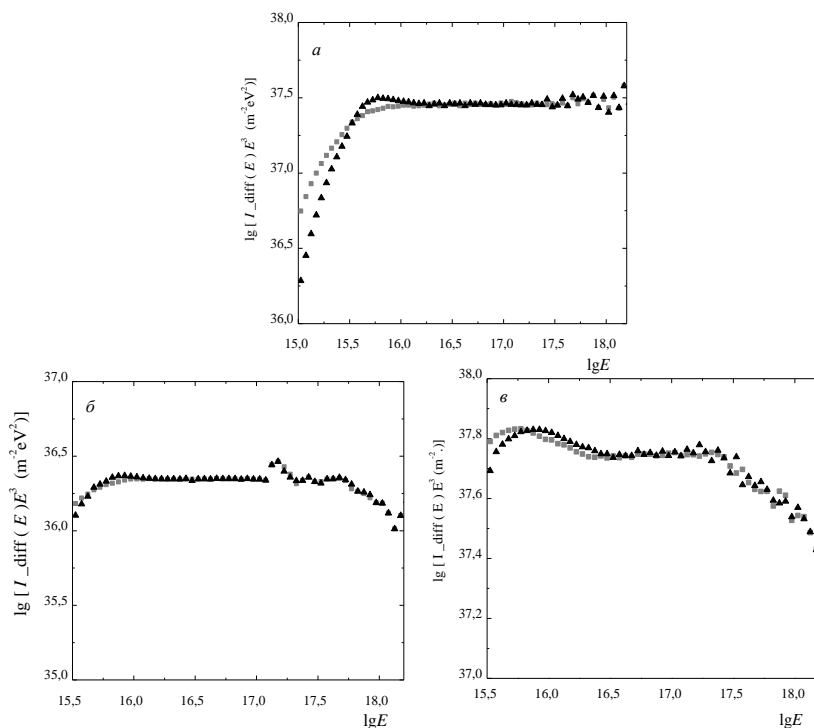


Рис.4, *а*, *б*, *в* Восстановленный в программе обработки событий дифференциальный энергетический спектр (черные треугольники) и спектр, построенный по смоделированным событиям, для которых выполнено условие срабатывания установки (серые квадраты).

Стандартные ошибки в определении значений γ при энергиях до 10^{17} эВ не превышают 0.01, при энергиях выше 10^{17} эВ - не более 0.05.

Таким образом, сцинтилляционная установка чувствительна к изменению поведения энергетического спектра КЛ в области высоких и сверхвысоких энергий.

Совместная работа установок Tunka-Grande и Тунка-133 позволит получить более точные данные о массовом составе ПКЛ. В диссертации представлен анализ возможности восстановления массового состава ПКЛ по данным новой установки и показано, что достигнутые точности в определении числа электронов и мюонов позволяют вести анализ массового состава стандартными методами. Дополнительное привлечение к анализу данных черенковской части установки о глубине максимума

ливня даёт возможность значительно (вплоть до порядка) повысить вероятность выделения различных групп ядер. И хотя приведенные в работе оценки являются модельно зависимыми, принципиальная ценность изучения массового состава ПКЛ при одновременной регистрации трёх компонент ШАЛ (черенковское излучение, заряженная и мюонная компоненты) представляется несомненной.

Моделирование работы эксперимента в «реальных условиях» и обработка «зарегистрированных» событий ШАЛ дают возможность получить информацию, не только отражающую качество моделирования, но и позволяющую оценить характеристики сцинтилляционного комплекса. Это позволяет учесть и свести к минимуму влияние эксперимента на искажение восстанавливаемых параметров и их распределений в ходе последующей обработки реальных событий. В частности, можно определить энергетический порог измерений и эффективную площадь установки, точность определения положения оси ливня и другие параметры, знание которых позволит оптимизировать работу эксперимента. Энергетический порог регистрации, начиная с которого установка начинает эффективно регистрировать ШАЛ на площади 0.5 км^2 составляет 10^{16} эВ (см. рис.5).

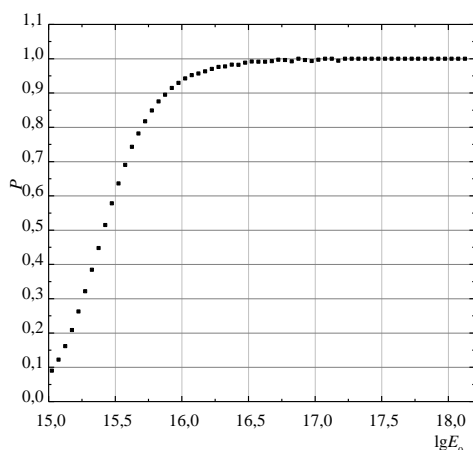


Рис. 5 Вероятность регистрации ШАЛ на площади установки.

При энергии первичных частиц $E_0 = 10^{17}$ эВ установка ведёт эффективную регистрацию событий на площади 2 км^2 .

При энергии первичной частицы $E_0 \geq 10^{16}$ эВ ошибка в определении положения оси по данной методике составляет не более 18м, при $E_0 \geq 5 \cdot 10^{16}$ эВ - не более 10м. (см. рис. 6).

Таким образом, можно сказать, что разработанное программное обеспечение позволяет восстанавливать координаты ливней с достаточной точностью до 10 м начиная с энергии $3 \cdot 10^{16}$ эВ.

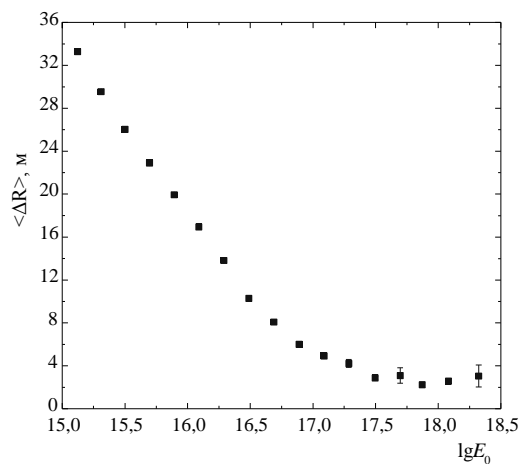


Рис. 6 Абсолютная ошибка восстановления положения оси ШАЛ в зависимости от энергии первичной частицы

При обработке 3,5 млн. событий с энергией $E_0 \geq 10^{15}$ эВ, из которых 150000 с $E_0 \geq 10^{16}$ эВ и 2000 с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ, получено, что при $E_0 \geq 10^{15}$ эВ энергетическое разрешение установки составляет 29%, при $E_0 \geq 3 \cdot 10^{15}$ эВ – 18%, а начиная с пороговой энергии регистрации ($E_0 \geq 10^{16}$ эВ) энергетическое разрешение установки достигает 15% (рис. 7, а, б).

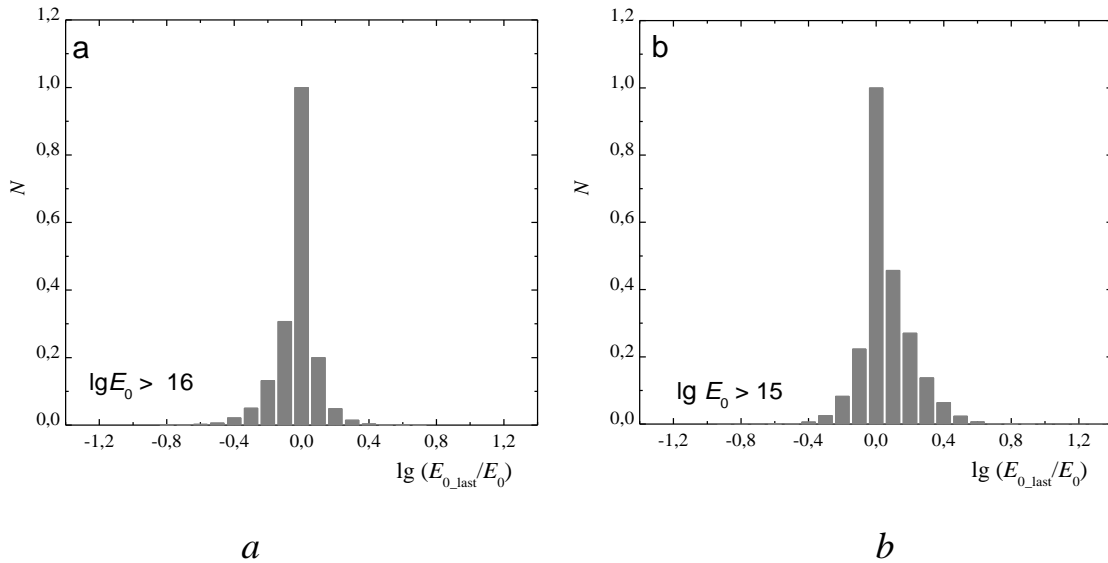


Рис. 7, *a*, *b* Энергетическое разрешение сцинтилляционной установки при данном методе обработки данных.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы работы:

При непосредственном участии автора разработаны алгоритмы и создана программа математического моделирования сцинтилляционного эксперимента, позволяющая оценить возможные погрешности получаемых результатов.

На основе детальных расчетов автором разработана методика восстановления энергии первичной частицы по числу заряженных частиц в ливне.

При непосредственном участии автора разработано программное обеспечение для обработки экспериментальных данных, с целью восстановления основных параметров ШАЛ, в котором известные методы восстановления параметров ливней по заряженным частицам адаптированы к условиям данного эксперимента.

Впервые автором найдены значения рабочих характеристик новой установки Tunka-Grande, при которых достигается высокая эффективность регистрации ливней, проведена оценка погрешностей в его работе. Определена оптимальная геометрическая конфигурация установки Tunka-

Grande. Получены характеристики сцинтилляционного комплекса и проведена оценка погрешностей в его работе. Проанализирована точность восстановления параметров ШАЛ и энергетического спектра КЛ по данным Tunka-Grande. Оценены перспективы совместной работы черенковской установки и сцинтилляционного комплекса в рамках исследования массового состава КЛ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Н.М. Буднев, А.Л. Иванова, Н.Н. Калмыков, Л.А. Кузьмичев, В.П. Сулаков, Ю.А. Фомин. Моделирование сцинтилляционного эксперимента Тунка-133 // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2014. №4. с.80-85
2. Н.М. Буднев, А.Л. Иванова, Н.Н. Калмыков, Л.А. Кузьмичев, В.П. Сулаков, Ю.А. Фомин. Эксперимент TUNKA-GRANDE: сцинтилляционная часть гамма-обсерватории TAIGA. // Известия РАН. Серия физическая. 2015. т. 79. №3. с.430-431.
3. Н.М. Буднев, А.Л. Иванова, Н.Н. Калмыков, Л.А. Кузьмичев, В.П. Сулаков, Ю.А. Фомин. Возможности сцинтилляционного эксперимента Tunka-Grande в изучении массового состава первичных космических лучей // Вестн. Моск. ун-та. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 2. с. 80-84.
4. M. Kunnas, S.F. Berezhnev, N. M. Budnev, M. B ker , O. B. Chvalaev et al. The hardware of the HiSCORE gamma-ray and cosmic ray Cherenkov detector// AIP Conf.Proc. 2012. Vol. 1505, p. 825-828
5. M. Tluczykont, M. Br ckner, N. Budnev, M. B ker , O. Chvalaev et al. HiSCORE: The hundred-i square-km cosmic ORigin explorer// AIP Conf.Proc. 2012. Vol. 1505, p. 821-824
6. S.F. Berezhnev, D. Besson, , N. M. Budnev, M. Br ckner, M. B ker et al. The Tunka - Multi-component EAS detector for high energy cosmic ray studies// Nucl.Instrum.Meth. A. 2013, vol. 732, p. 281-285

7. M. Kunas, M. Brückner, N. Budnev, M. Bükler , O. Chvalaev et al. Hardware and first results of TUNKA-HiSCORE// Nucl.Instrum.Meth. A. 2014, vol. 742, p. 269-270
8. M. Tluczykont, D. Hampf, U. Einhaus, D. Horns, M. Brückner et al. The HiSCORE experiment and its potential for gamma-ray astronomy// J.Phys.Conf.Ser. 2013, vol. 409, no. 1, p. 012120
9. N.M. Budnev, I.I. Astapov, A.G. Bogdanov, V. Boreyko, M. Bükler et al. TAIGA the Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy - present status and perspectives// JINST. 2014, vol 9, C09021
- 10.S. Epimakhov, M. Brückner, N. Budnev, D. Bogorodskii, O. Chvalaev et al. Amplitude calibration with the HiSCORE-9 array// J.Phys.Conf.Ser. 2015, vol. 632, no. 1, p. 012007
- 11.N. Budnev, I. Astapov, N. Barbashina, A. Bogdanov D. Bogorodskii, et al. The Tunka detector complex: from cosmic-ray to gamma-ray astronomy// J.Phys.Conf.Ser. 2015, vol. 632, no. 1, p. 012034
- 12.M. Kunas, I. Astapov, N. Barbashina, S. Beregnev, A. Bogdanov et al. Simulation of the hybrid Tunka Advanced International Gamma-ray and Cosmic ray Astrophysics (TAIGA)// J.Phys.Conf.Ser. 2015, vol. 632, no. 1, p. 012040
- 13.Porelli, D. Bogorodskii, M. Brückner, N. Budnev, O. Chvalaev et al. Timing calibration and directional reconstruction for Tunka-HiSCORE// J.Phys.Conf.Ser. 2015, vol. 632, no. 1, p. 012041
- 14.M. Tluczykont, I. Astapov, N. Barbashina, S. Beregnev, A. Bogdanov et al. Towards gamma-ray astronomy with timing arrays// J.Phys.Conf.Ser. 2015, vol. 632, no. 1, p. 012042
- 15.Berezhnev S. F., Besson D., M. Brückner, N. Budnev, O. Chvalaev et al. The Tunka experiment: status 2013//33rd Int. Cosmic Ray Conf., RIO DE JANEIRO , Brazil – 2013, №0418

16. А.Л. Иванова. Моделирование сцинтилляционного эксперимента Тунка-133//33-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, 11-15 августа 2014г.): Тезисы докладов. 2014, с. 18

Список литературы

1. <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites>
2. Григоров Н.Л., Нестеров В.Е., Раппопорт И.Д., Савенко И.А., Скуридин Г.А. Изучение частиц космических лучей высоких энергий на ИСЗ “Протон”. Доклад на XVIII Международном астрономическом конгрессе, Белград, 1967.
3. Григоров Н.Л., Мурзин В.С., Раппопорт И.Д. Метод измерения энергии частиц в области выше 10^9 эВ. ЖЭТФ, 1958, т.34, №2, с.506–507.
4. Акимов В.В., Григоров Н.Л., Губин Ю.В., Нестеров В.Е., Раппопорт И.Д., Савенко И.А. Энергетический спектр первичных космических лучей в диапазоне $10^{11} \div 10^{15}$ эВ по данным измерений на ИСЗ “Протон-4”. Известия АН СССР, сер.физ., 1971, т.35, с.2434–2438.
5. Иваненко И.П., Раппопорт И.Д., Шестопёров В.Я., Басина Ю.В., Вакулов П.В. и др. Энергетический спектр и зарядовый состав первичных космических лучей с энергией свыше 2 ТэВ. Письма в ЖЭТФ, 1988, т.48, вып.9, с.468–471.
6. Иваненко И.П., Раппопорт И.Д., Шестопёров В.Я., Басина Ю.В., Вакулов П.В. и др. Энергетический спектр частиц первичных космических лучей при энергиях 1–100 ТэВ по данным прибора “Сокол”. Письма в ЖЭТФ, 1989, т.49, с.192–194.
7. pamela.roma2.infn.it/index.php
8. <http://ams.nasa.gov>
9. Aguilar M. et al. Cosmic-ray positron fraction measurement from 1 to 30-GeV with AMS-01. Phys.Lett.B 646, 2007, 145-154

- 10.http://ams.nasa.gov/Documents/AMS_Publications/NASA%20JUNE-2014C.pdf
- 11.Aguilar M. et al. First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV . Physical Review Letters PRL 110, 2013, 141102
- 12.Asakimori K, Burnett T.H., Cherry M. et al.(JACEE collaboration), Energy spectra of protons and Helium nuclei above 5 TeV/nucleon. Proc. of 22rd ICRC, Dublin, 1991, v.2, p.97-100.
- 13.Asakimori K., Burnett T.H., Cherry M. et al. Cosmic Ray Composition and Spectra: (2) Helium and $Z > 2$. Proc. of 23rd ICRC, Calgary, 1993, v.2, p.25-29.
- 14.Asakimori K., Burnett T.H., Tominaga T. et al. Energy Spectra and Elemental Composition of Nuclei above 100 TeV from Series of JACEE Balloon Flight. (JACEE collaboration), Proc. of 24rd ICRC, Roma, 1995, v.2, p.707-710.
- 15.Cherry M.L. for JACEE collaboration. Cosmic Ray Proton and Helium Spectra – Results from JACEE. Proc. of 25rd ICRC, Durban, 1997, v.4, p.1-4.
- 16.Apanasenko A.V., Fujii M, Hareyama M. et al. Proton and Helium spectra obtained by the first RANJOB-campaign. Proc. of 25rd ICRC, Durban, 1997, v.4, p.137-140.
- 17.Apanasenko A.V., Fujii M., Hareyama M. et al. Heavy component spectra obtained by the first RANJOB-campaign. Proc. of 25rd ICRC, Durban, 1997, v.4, p.141-144.
- 18.Panov A. D. et al., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 2009, v.73, p. 564-567. Energy Spectra of Abundant Nuclei of Primary Cosmic Rays from the Data of ATIC-2 Experiment: Final Results . (А.Д. Панов, Изв. РАН. Сер. Физ. 73, 602 (2009)).
- 19.http://www.inr.ac.ru/~muhamed/INCA_PROJECTrus.pdf

20. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Роганова Т.М.. Галактические космические лучи. // НИИЯФ МГУ.
<http://www.kosmofizika.ru/abmn/kalmikov/cosrays.htm>.
21. Matthiae G. on behalf of the Pierre Auger Collaboration, “New results from the Auger Observatory”, Invited talk at NO-VE IV International Workshop on “Neutrino Oscillations in Venice” arXiv:0807.1024v1 [astro-ph] (2008)
22. Рубцов Г.И. Якутская комплексная установка для регистрации широких атмосферных ливней. // <http://www.inr.ac.ru/a/history/8/shal.pdf>.
23. Berezhnev_S., Budnev N.M., Ivanova A. L. et al // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2013, v.732, p. 281–285.
doi.org/10.1016/j.nima.2013.05.180
24. Budnev N.M. et al. TAIGA the Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy - present status and perspectives. // JINST.- 2014.-9- C09021
25. Antoni T. et al., KASCADE Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A 513 (2003) 490.
26. Apel W. D., Arteaga J. C. et al .The KASCADE-Grande Experiment. // Nucl. Instr. and Meth. - A620 (2010). – p.202-215
27. IceCube Collaboration: M.G. Aartsen et al. Measurement of the cosmic ray energy spectrum with IceTop-73. Physical Review D88 (2013) 042004, 28 August 2013; e-print archive arXiv:1307.3795 [astro-ph.HE]
28. <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>
29. Hiller R., Budnev N.M. et al. Status and First Results of Tunka-rx, an Experiment for the Radio Detection of Air Showers. // Phys.Procedia.- 2015.- 61.-pp. 708-713
30. <http://www.fisica.inpl.edu.ar/auger/aires/doc/UsersManual.pdf>
31. Kalmykov, N. N., and Ostapchenko, S. S. Phys. At. Nucl., 1993, v.56, p.346
32. Linsley J. Proc. 8th ICCR, Jaipur, 4, p.77-79, (1963).
33. D.M. Edge et al., J. Phys. A, 6, p 1612-1634 (1973).

34. A. A. Wanson. 1st European Symp. Cosmic Rays, Lodz, 3, (1968).
35. Chiba N., et al. Akeno giant air shower array (AGASA) covering 100-km² area // Nucl. Instrum. Meth. - 1992 - A311, p.338-349; <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>.
36. K. Shinozaki, M. Teshima for AGASA Collaboration, Nucl. Phys. B (Procc. Suppl.) 136, 18-27 (2004).
37. D.J. Bird, S.C. Corbato, H. U. Dai et al. // Astrophys. J. 424, 491-502 (1994)
38. D. Bergman for the HiRes Colaboration, Phys. Rev. Lett., 100:101101, (2008).
39. H. Tokuno, Y. Tameda et al. New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array exmentperiment. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A.-2012.-676.-p.54-65
40. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Khristiansen G.B., Kulikov G.V., Nazarov V.I., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I., Solovjeva V.I., Sulakov V.P., Trubitsyn A.V. and Vishnevskaya E.A.. Nuclear composition of primary cosmic rays in the 'knee' region according MSU EAS array data. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1996, v.22, p.1839-1849.
41. Aartsen M. G. et al. Measurement of the Cosmic Ray Energy Spectrum with IceTop-73. Physical Review D 88, 042004 (2013), arXiv:1307.3795 DOI:10.1103/PhysRevD.88.042004
42. Berezhnev S. F., Besson D., Budnev N.,..., Ivanova A. et al. // Proc. 33th ICRC, Rio de Janeiro, Brazil 2013, 0418.
43. Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2014, №4, с.80
44. Грейзен К. // Физика космических лучей / Под ред. Дж. Вильсона. – М.: Иностр. лит., 1958. 30, с.7 – 141.
45. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., et al. // Proc. 16th European Cosmic Ray Symposium, Madrid. 1998. p. 261 - 264.
46. Berezhnev S F, Besson D, Budnev N M et al (Tunka 133 col) // Proc. of 32

ICRC (Beijing) 2011, vol 7 (Beijung:scientific), p. 208-211.

47.Калмыков Н.Н. // ЯФ. 1969. 10, № 1, с. 121-129

48.Зотов М.Ю., Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2009. № 6, с. 365 – 408

49.Калмыков Н. , Куликов Г., Сулаков В., Фомин Ю. // Известия РАН. Серия физическая. 2013. **77**. № 5, с. 70–72

50.Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. - М.: Наука. 1976. 320 с.

51.Kuzmichev L.A., Sveshnikova L.G., Korosteleva E.E. et al.// Journal of Physics: Conference Series. 2013. 409. №1, с.012062 (<http://iopscience.iop.org/1742-6596/409/1/012062>)