

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Монхоев Роман Дмитриевич

Сцинтилляционная установка Tunka-Grande для исследования
космического излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ:
создание и результаты

Специальность 1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных
частиц, физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет, НИИ прикладной физики.

Научный руководитель: **Кузьмичев Леонид Александрович**,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Рябов Владимир Алексеевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, заместитель директора по научной работе;

Петков Валерий Борисович,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБУН Институт ядерных исследований РАН, заведующий филиалом БНО;

Шульженко Иван Андреевич,
кандидат физико-математических наук,
ФГАОУ ВО Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, НОЦ НЕВОД, старший научный сотрудник.

Защита состоится 08 декабря 2023 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.2/2706>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

E-mail (диссертационного совета): galan_lidiya@mail.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.2
кандидат физ.-мат. наук



Галанина Лидия Ивановна

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности. Исследование космических лучей (КЛ) представляет большой интерес с точки зрения понимания механизмов и природы их происхождения, что является одной из важнейших задач современной астрофизики. Регистрация излучения с энергией выше 10^{15} эВ осуществляется при помощи единственно возможного на сегодня метода, основанного на свойстве КЛ порождать каскады вторичных частиц в земной атмосфере, так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ). В своей основе ШАЛ содержит электрон-фотонную, адронную, мюонную и нейтринную компоненты, а также является источником черенковского, ионизационного и радиочастотного излучений. Все эти составляющие, за исключением нейтрино, могут быть непосредственно зарегистрированы наземными установками, а их восстановленные характеристики использованы для определения свойств КЛ.

В настоящее время значительный интерес вызывает детальное изучение энергетического спектра, массового состава и анизотропии КЛ в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ. По современным представлениям именно в этой области осуществляется предполагаемый переход от галактических к внегалактическим источникам КЛ [1–3] и наблюдаются расхождения в данных разных экспериментов. Поиск космического гамма-излучения в том же интервале энергий определяет еще одно важное направление исследований [4; 5]. Заряженные КЛ испытывают влияние межзвездных и межгалактических магнитных полей, что приводит к искажению траекторий частиц и потере информации о месте их возникновения. Поскольку гамма-кванты являются электрически нейтральными, то, во-первых, они могут быть использованы в качестве указателя на источники КЛ, вблизи которых образовались. Во-вторых, диффузное гамма-излучение, не связанное с разрешаемыми локальными объектами, предсказывается теорией [6–8] и также представляет интерес с точки зрения изучения природы КЛ. С другой стороны, поток астрофизических фотонов может служить указанием на состоятельность некоторых моделей «новой физики» связанных, например, с аксионами и аксионоподобными частицами [9], распадом частиц сверхтяжелой темной материи [10; 11], нарушением Лоренц-инвариантности [12]. Первые экспериментальные работы по поиску гамма-квантов были начаты более полувека назад [13–15], но по до сих пор не обнаружено фотонов от локальных источников с энергией более $1.6 \cdot 10^{15}$ эВ [16; 17] и диффузного излучения в области выше 10^{15} эВ [18].

В течение трех последних десятилетий на полигоне Тункинского астрофизического центра коллективного пользования ИГУ (ТАЦКП), расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 км от озера Байкал, проводятся исследования в области физики КЛ [19], а в последние годы и гамма-астрономии [20]. За период с 1993 по 2012

гг на территории полигона было создано несколько наземных установок, нацеленных на регистрацию черенковского излучения ШАЛ. При этом наиболее значимой из них, с точки зрения изучения диапазона энергий 10^{16} — 10^{18} эВ, является действующая установка Тунка-133 [21]. К одному из главных результатов работы этой установки относится доказательство более сложной формы энергетического спектра КЛ, чем предполагалось ранее [22; 23]. Тем не менее для понимания природы КЛ необходимы более надежные и точные экспериментальные данные как об их энергетическом спектре, так и о массовом составе, в особенности при энергии выше 10^{17} эВ. Для увеличения числа детектируемых событий и повышения информативности получаемых данных в период с 2013 по 2016 гг в дополнение к установке Тунка-133 была развернута сцинтилляционная установка Tunka-Grande, ориентированная на регистрацию электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ.

Целью данной работы является создание и ввод в эксплуатацию сцинтилляционной установки Tunka-Grande, а также восстановление энергетического спектра КЛ и поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ по экспериментальным данным установки Tunka-Grande, полученным за первые 5 сезонов измерений.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Определить требования к физическим и техническим параметрам установки Tunka-Grande.
2. Разработать и реализовать проект установки Tunka-Grande.
3. Развернуть и ввести в эксплуатацию аппаратно-программный комплекс установки Tunka-Grande.
4. Разработать и внедрить методику амплитудной калибровки сцинтилляционных счетчиков установки Tunka-Grande.
5. Произвести на начальном этапе тестовые, а впоследствии полноценные сеансы набора экспериментальных данных в режиме как совместных с установкой Тунка-133, так и независимых от нее наблюдений.
6. По экспериментальным данным установки Tunka-Grande реконструировать параметры ШАЛ.
7. Провести анализ совместных событий установок Тунка-133 и Tunka-Grande с целью оценки точности реконструкции параметров ШАЛ, выбора критериев отбора событий и определения методики восстановления энергии КЛ.
8. На основе результатов реконструкции параметров ШАЛ и КЛ восстановить дифференциальный энергетический спектр КЛ и провести поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ.

Объект и предмет исследования. Объектом диссертационного исследования выступает поток космического излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Предметом исследования является сцинтилляционная установка Tunka-Grande и экспериментальные данные, полученные за первые 5 лет ее работы.

Научная новизна:

1. Создана и введена в эксплуатацию установка Tunka-Grande для исследования энергетического спектра, массового состава и анизотропии КЛ, а также поиска диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ.
2. Реализован гибридный подход к изучению КЛ в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ, заключающийся в одновременной регистрации черенковского излучения, электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ при совместной работе установок Tunka-133 и Tunka-Grande.
3. Проведены сеансы наблюдений и сформирован банк экспериментальных данных установки Tunka-Grande за первые 5 лет ее работы.
4. Впервые для установки Tunka-Grande по экспериментальным данным оценена точность реконструкции параметров ШАЛ и определена методика восстановления энергии КЛ.
5. Впервые по экспериментальным данным установки Tunka-Grande восстановлен дифференциальный энергетический спектр КЛ и получен верхний предел на поток диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Созданная установка Tunka-Grande и разработанный гибридный подход обладают большим потенциалом при исследовании энергетического спектра, массового состава и анизотропии КЛ, а также поиска диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Во-первых, сцинтилляционная установка круглосуточно работает в режиме набора данных практически в течение всего календарного года и имеет площадь ~ 0.5 км². Во-вторых, проведение совместных с установкой Tunka-133 сеансов наблюдений обеспечивает увеличение точности определения характеристик КЛ, позволяет проводить кросс-калибровки и открывает новые возможности в исследовании массового состава КЛ [24]. В-третьих, параметры ШАЛ, которые могут быть реконструированы по экспериментальным данным установки Tunka-Grande (полное число электронов и мюонов), весьма чувствительны к сорту первичных ядер и эффективны для выделения гамма-квантов из фона заряженных КЛ.

2. Разработанные методики и накопленный опыт могут быть использованы для создания новых экспериментов в области физики КЛ и гамма-астрономии. В настоящее время результаты диссертационного исследования используются при создании сцинтилляционной установки TAIGA-Muon [20].
3. Восстановленный дифференциальный энергетический спектр КЛ и полученное ограничение на поток гамма-квантов в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ по экспериментальным данным установки Tunka-Grande могут быть использованы для подтверждения, развития или исключения существующих астрофизических моделей.

Методология и методы исследования:

1. Детекторами электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ установки Tunka-Grande являются сцинтилляционные счетчики, которые ранее успешно использовались на установках EAS-TOP [25] и KASCADE-Grande [26], а в настоящее время применяются для целей установки НЕВОД-ШАЛ [27].
2. Конфигурация, структура и программно-аппаратный комплекс установки Tunka-Grande разработаны на базе опыта работы установки Тунка-133, а также при помощи компьютерного моделирования ШАЛ методом Монте-Карло в программном пакете AIRES (AIRshower Extended Simulations) [28–30].
3. Конструкция пунктов регистрации установки Tunka-Grande разработана на основе типовой проектной документации серий ИС-01-04 «Унифицированные сборные железобетонные каналы» и 3.006.1-2.87 «Сборные железобетонные каналы и тоннели из лотковых элементов».
4. Методика амплитудной калибровки сцинтилляционных счетчиков установки Tunka-Grande основана, во-первых, на измерении их отклика при регистрации одиночных атмосферных мюонов, во-вторых, на использовании наносекундного импульсного источника света [31], разработанного для целей установки Тунка-133.
5. Применяемая в диссертационном исследовании процедура реконструкции параметров ШАЛ основана на базе опыта работы установки ШАЛ-МГУ [32].
6. Методика оценки точности реконструкции параметров ШАЛ и восстановления энергии КЛ основаны на анализе совместных событий установок Тунка-133 и Tunka-Grande.
7. Методика поиска диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ основана на компьютерном моделировании ШАЛ и последующей симуляции отклика сцинтилляционных счетчиков методом Монте-Карло при помощи программных пакетов CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KASCADE, версия 7.7401) [33] и Geant4 (версия 10.04) [34].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сцинтилляционная установка Tunka-Grande работает в режиме набора экспериментальных данных с 2016 г для исследования энергетического спектра, массового состава и анизотропии КЛ, а также поиска диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ методом регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ.
2. Амплитудная калибровка сцинтилляционных счетчиков установки Tunka-Grande обеспечивает единый энергетический порог регистрации детекторов и переход от измеряемых параметров сигналов к числу частиц.
3. Точность реконструкции параметров ШАЛ по экспериментальным данным установки Tunka-Grande, таких как направление прихода оси ливня и ее положение в плоскости детекторов, не превышает 2.3° и 26 м соответственно. Энергетическое разрешение установки не хуже 36%.
4. Дифференциальный энергетический спектр КЛ, восстановленный по экспериментальным данным установки Tunka-Grande в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ, подтверждает сложную структуру спектра в области предполагаемого перехода от галактических к внегалактическим КЛ.
5. Верхний предел на поток диффузного гамма-излучения, полученный по экспериментальным данным установки Tunka-Grande в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ, не противоречит аналогичным результатам других экспериментов.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена, во-первых, конфигурацией, структурой и программно-аппаратным комплексом установки Tunka-Grande, которые были разработаны на основе компьютерного моделирования ШАЛ методом Монте-Карло в программном пакете AIRES и с учетом опыта создания и эксплуатации установки Тунка-133, во-вторых, настройкой, непрерывным контролем параметров эксперимента при его проведении, а также проверкой повторяемости результатов, в-третьих, их согласием с мировыми данными.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались непосредственно автором на 34 Всероссийской конференции по космическим лучам (г. Дубна, 2016 г), Международной конференции «Instrumentation for Colliding Beam Physics» (г. Новосибирск, 2017 г), Международной молодежной научной школе конференции «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, 2018 г), 26 Европейском симпозиуме по космическим лучам и 35 Всероссийской конференции по космическим лучам (г. Барнаул, 2018 г), Международной конференции

ФизикА.СПб (г. Санкт-Петербург, 2020 — 2022 гг), 37 Всероссийской конференции по космическим лучам (г. Москва, 2022 г), научном семинаре НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (г. Москва, 2023 г).

Личный вклад. Автором выполнен основной объем работ на всех этапах создания и ввода в эксплуатацию установки Tunka-Grande. Представленные в диссертации методики и результаты получены автором самостоятельно, либо при его ключевом участии.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 изданиях, 1 из которых издано в журнале, рекомендованном ВАК, 8 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 136 страниц, включая 69 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 163 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность создания скинтилляционной установки Tunka-Grande, формулируются цель, задачи, объект и предмет диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, основные защищаемые положения представляемой работы. Также аргументируется достоверность полученных результатов, определяется личный вклад автора, приводится перечень основных публикаций и структура диссертации.

Первая глава посвящена актуальному на момент написания работы состоянию исследований КЛ в области энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Материалы главы опубликованы в работах [A1—A3].

В разделах 1.1 и 1.2 приводится обзор наземных установок, формирующих основной массив данных в рассматриваемом энергетическом диапазоне. В разделе 1.3 сравниваются результаты этих экспериментов, а именно: дифференциальный энергетический спектр КЛ, зависимость среднего логарифма атомной массы $\langle \ln A \rangle$ от энергии первичных частиц и ограничения на интегральный поток космического гамма-излучения. Показано, что в настоящее время исследования в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ нельзя считать завершенными и для понимания природы КЛ требуются более надежные и точные экспериментальные данные. Это приводит к необходимости создания новых или модернизации существующих установок, а также развития методик детектирования КЛ и обработки экспериментальных данных.

Вторая глава посвящена описанию процесса создания и устройства установки Tunka-Grande. Материалы главы опубликованы в работах [A1—A9].

Сегодня, в соответствии с изначальным проектом, установка Tunka-Grande представляет собой массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций и расположенных на площади ~ 0.5 км². Каждая станция состоит из двух частей: наземной и подземной. Первая включает в себя 12 счетчиков общей площадью 7.68 м² и предусматривает 3 динамических диапазона регистрации потока заряженных частиц ШАЛ плотностью до ~ 20 , 200 и 12000 частица/м² соответственно. Вторая содержит 8 счетчиков общей площадью 5.12 м², расположена под слоем грунта ~ 1.5 м и предназначена для выделения мюонной компоненты ШАЛ. Плотность регистрируемых частиц в этом случае лежит в интервале от ~ 1 до 50 частица/м². Пороговая энергия для вертикальных мюонов ~ 0.5 ГэВ. Обе части находятся в непосредственной близости друг от друга и на расстоянии не более 30 м от центра ближайшего кластера установки Тунка-133 (см. рисунок 1).

Сцинтилляционный счетчик состоит из светособирающего дюралюминиевого кожуха толщиной 1 мм в виде усеченной пирамиды, внутренняя поверхность которого покрыта тонким диффузно-отражающим слоем белой эмали. Внутри кожуха размещаются пластмассовый сцинтиллятор NE102A, выполненный в форме пластины размером $800 \cdot 800 \cdot 40$ мм³, и на расстоянии ~ 30 см от него фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) PHOTONIS XP-3462. На двух центральных счетчиках каждой станции для расширения ее динамического диапазона регистрации сигналов располагаются дополнительные ФЭУ с коэффициентом усиления в ~ 10 раз меньшим по сравнению со стандартным.

Программно-аппаратный комплекс установки Tunka-Grande построен на базе программно-аппаратного комплекса установки Тунка-133 и позволяет проводить непрерывную оцифровку аналоговых сигналов от сцинтилляционных счетчиков, осуществлять их отбор согласно предварительно установленному триггерному условию, присваивать временные метки и порядковые номера зарегистрированным событиям. Частота дискретизации и разрядность используемого типа аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 200 МГц и 12 бит соответственно. Величина входных напряжений системы сбора данных лежит в диапазоне от ~ -3 В до $+3$ В. Временная синхронизация станций осуществляется с точностью 10 нс. Условие регистрации событий зависит от режима работы установки: «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» или «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР». В первом случае срабатывание отдельно взятой станции происходит при наличии триггерного сигнала от ближайшего кластера установки Тунка-133. Такой подход позволяет осуществить одновременное детектирование заряженной компоненты и черенковского излучения ШАЛ. Сеансы наблюдений при

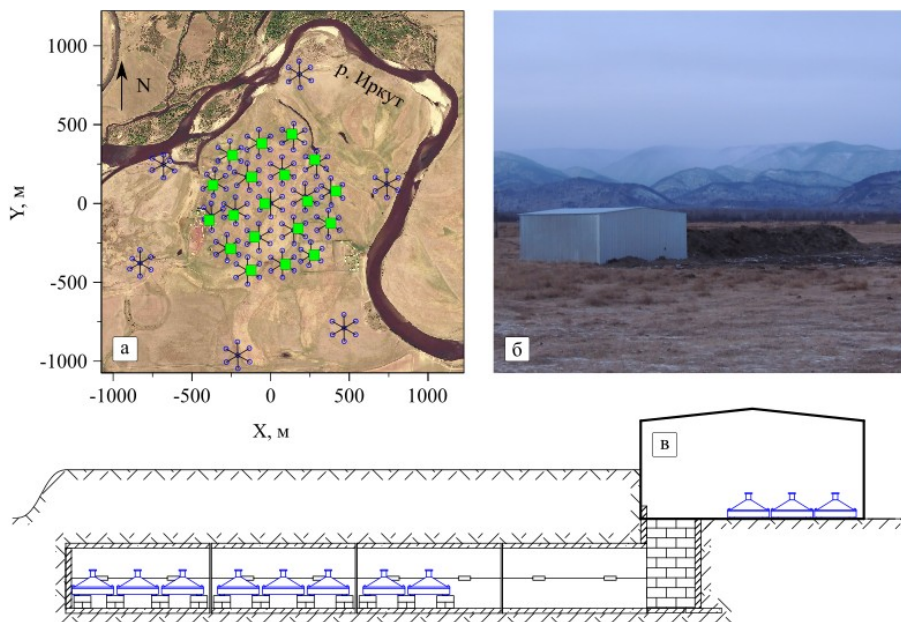


Рис. 1 — Установка Tunka-Grande: а — расположение станций относительно оптических детекторов установки Тунка-133 (зеленые квадраты — станции, синие кольца — оптические детекторы, черными линиями выделены 25 кластеров установки Тунка-133), б — внешний вид станции, в — схематичное изображение станции.

этом могут проводиться только в ясные и безлунные ночи. В остальное время используется режим «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР», в котором каждая станция является независимой с точки зрения набора экспериментальных данных. Условие регистрации событий при этом основано на том, что 12 счетчиков наземной части станции разделены на две половины. Выработка триггера происходит при наличии сигнала от каждой из групп счетчиков, соответствующего прохождению одной заряженной релятивистской частицы, во временном окне 500 нс.

Третья глава посвящена вводу в эксплуатацию установки Tunka-Grande. Материалы главы опубликованы в работе [A2].

В разделах 3.1 и 3.2 приводятся описание измеряемых параметров регистрируемых событий и результаты измерения передаточной характеристики системы сбора данных. В разделе 3.3 представлены два метода амплитудной калибровки сцинтилляционных счетчиков. Калибровка счетчиков наземных (в случае первого и второго динамических диапазонов регистрации сигналов) и подземных частей станций заключается в наборе дифференциальных амплитудных распределений для каждого из 380

детекторов при регистрации одиночных атмосферных мюонов. Наиболее вероятное значение амплитуды импульсов A при помощи регулировки напряжения питания ФЭУ устанавливается в единый для всех счетчиков код АЦП и принимается за эквивалент одной заряженной частицы ШАЛ. На рисунке 2 показан пример такого распределения, имеющий характерный вид распределения Ландау [35]. Аппроксимация слева выполнена экспоненциальной функцией с параметрами C и λ (зеленый цвет), справа — функцией Мюллера [36] с параметрами C, μ и σ (синий цвет).

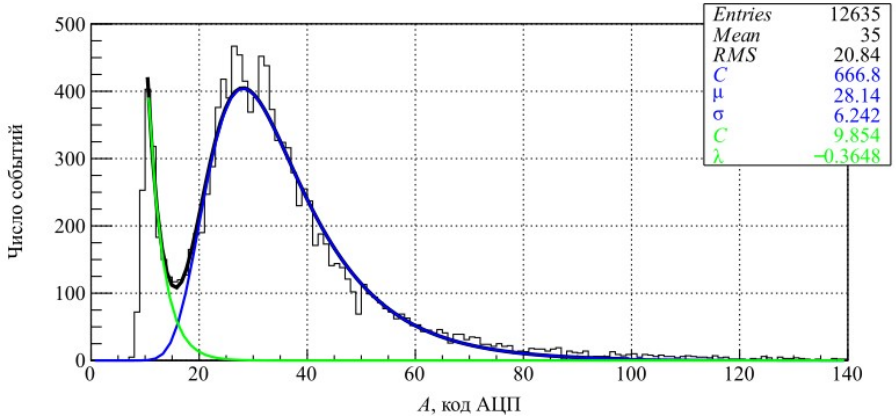


Рис. 2 — Пример дифференциального амплитудного распределения для сцинтилляционного счетчика.

Калибровка счетчиков третьего диапазона (центральные счетчики в наземной части каждой станции с дополнительными ФЭУ с коэффициентом усиления в ~ 10 раз меньшим по сравнению со стандартным) осуществляется при помощи наносекундного импульсного источника света. Процедура состоит в том, что световые импульсы передаются во внутреннее пространство детектора по волоконно-оптическому кабелю. Частота их следования и мощность засветки задаются внешними генератором сигналов и источником питания. Кабель внутри счетчика направлен вертикально вниз, параллельно ФЭУ, и на фотокатод каждого из них поступают отраженные от стенок кожуха фотоны. На первом этапе калибровки производится набор данных, по которому строятся дифференциальные амплитудные распределения для второго и третьего динамических диапазонов и определяются их средние значения. Далее при помощи регулировки питания ФЭУ среднее значение для третьего диапазона устанавливается на уровне в ~ 10 раз меньшим относительно среднего значения второго диапазона.

На рисунке 3 показан пример спектра плотностей ШАЛ, полученный по экспериментальным данным наземной части отдельно взятой станции в

режиме работы «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» после проведения амплитудной калибровки счетчиков. События отобраны с условием дополнительной регистрации ШАЛ не менее чем одной соседней станцией. Время наблюдения составляет ~ 220 часов. Указанные на рисунке динамические диапазоны разбиты на две группы и соответствуют двум половинам счетчиков. В качестве измеряемого параметра зарегистрированных событий используется площадь импульса Q . Из рисунка 3 следует, что применяемые методы амплитудной калибровки и конфигурация динамических диапазонов являются весьма эффективными для задач установки Tunka-Grande.

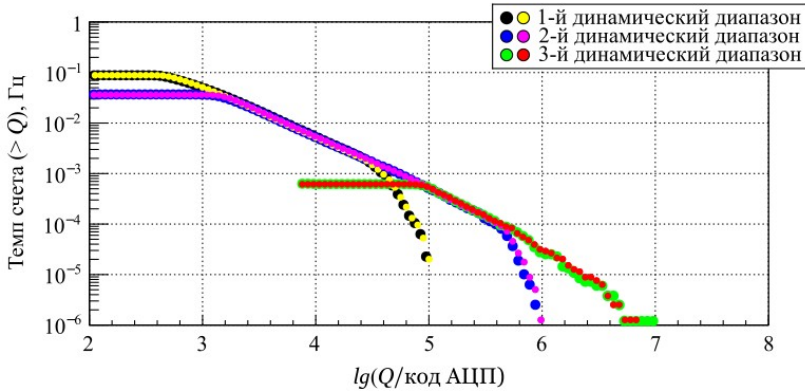


Рис. 3 — Пример спектра плотностей ШАЛ по экспериментальным данным наземной части отдельно взятой станции.

В разделах 3.4, 3.5 и 3.6 представлены результаты тестирования аппаратно-программного комплекса установки Tunka-Grande, а именно: определены ограничения на темп счета станций (количество зарегистрированных событий за единицу времени), установлены оптимальные условия их работы и приведена экспериментальная оценка точности временной синхронизации установки. Максимальный темп счета станций зависит от их удаленности относительно центра сбора данных, единого для всех установок ТАЦКП, и обусловлен характеристиками используемой аппаратуры. Оптимальный темп счета, при котором количество теряемых событий со станций в режиме работы «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» не превышает 5—10%, составляет ~ 10 Гц. В режиме «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» темп счета станций определяется темпом счета кластеров установки Тунка-133 и составляет величину ~ 0.1 Гц. При таком потоке событий потеря данных из-за эффекта мертвого времени аппаратуры меньше 5%. Результатом проведения тестирования системы временной синхронизации установки Tunka-Grande является подтверждение того, что синхронизация станций осуществляется с заявленной точностью 10 нс.

В разделе 3.7. приведено описание процедуры проведения сеансов набора экспериментальных данных. Сеансы наблюдений на постоянной основе проводятся с 2016 г. Одним из технических недостатков установки Tunka-Grande является отсутствие молниезащиты станций. В климатических условиях Тункинской долины грозовая активность приходится на период с мая по сентябрь, в связи с чем установка работает с октября по апрель. В указанный временной диапазон наблюдения проводятся круглосуточно в режиме «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» или «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР».

Четвертая глава посвящена реконструкции параметров ШАЛ и КЛ по экспериментальным данным установки Tunka-Grande, а также анализу совместных событий установок Тунка-133 и Tunka-Grande. Материалы главы опубликованы в работах [A2–A4; A6].

В разделе 4.1, 4.2 и 4.3 приведено описание основных этапов процедуры реконструкции параметров ШАЛ. Рассматриваемая процедура была разработана на этапах проектирования и создания установки Tunka-Grande на базе успешного опыта работы установки ШАЛ-МГУ. В настоящее время без значимых изменений она применяется для всех зарегистрированных событий. При этом восстанавливаются следующие параметры ШАЛ:

1. Координаты положения оси ШАЛ в плоскости установки x и y ;
2. Зенитный и азимутальный углы прихода оси ШАЛ θ и φ ;
3. Полное число частиц электрон-фотонной компоненты ШАЛ N_E ;
4. Полное число частиц мюонной компоненты ШАЛ N_M ;
5. Параметр возраста ШАЛ s ;
6. Плотность частиц на расстоянии 200 м от оси ШАЛ ρ_{200} .

Раздел 4.4 включает в себя оценку точности реконструкции параметров ШАЛ, методику реконструкции энергии КЛ и определение оптимальных критериев отбора ШАЛ на основе анализа совместных с установкой Тунка-133 событий. Основная идея этого анализа заключается в том, что установка Тунка-133 изначально обладает более высокой, экспериментально подтвержденной точностью восстановления параметров ШАЛ и КЛ [22]. За период 2016 — 2017 гг был проведен поиск совместных событий, параметры которых были определены и удовлетворяют двум основным критериям, а именно: зенитный угол прихода оси ШАЛ лежит в области $0 — 35^\circ$ и ее положение находится в пределах круга радиусом 350 м относительно центра установок. Эти условия на данный момент являются оптимальными для установки Tunka-Grande с точки зрения точности реконструкции параметров ШАЛ. Дополнительный критерий был введен на энергию КЛ. Так, рассматривались события с энергией первичных частиц выше 10^{16} эВ. Выбор такого порога основан на модельных расчетах, которые показали, что для установки Tunka-Grande эффективность регистрации ШАЛ от первичных частиц с указанным значением энергии

составляет $\sim 95\%$ [29; 30]. С учетом выдвинутых требований за ~ 475 часов совместной работы установок было выделено 6226 событий.

Точность восстановления направления прихода оси ШАЛ была определена через величину ψ_{68} . Этот параметр представляет собой значение в распределении угла ψ , меньше которого находится 68% искомых событий:

$$\psi = \arccos \left(\frac{\alpha_G \cdot \alpha_T + \beta_G \cdot \beta_T + \gamma_G \cdot \gamma_T}{\sqrt{\alpha_G^2 + \beta_G^2 + \gamma_G^2} \cdot \sqrt{\alpha_T^2 + \beta_T^2 + \gamma_T^2}} \right), \quad (1)$$

где индексы T и G принадлежат параметрам ШАЛ, восстановленным по данным установок Тунка-133 и Tunka-Grande соответственно, α , β и γ — направляющие косинусы:

$$\alpha = \sin \theta \cdot \cos \varphi, \quad (2a)$$

$$\beta = \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad (2б)$$

$$\gamma = \cos \theta. \quad (2в)$$

Точность реконструкции положения оси ШАЛ, по аналогии с направлением ее прихода, была определена через параметр R_{68} из распределения расстояний R :

$$R = \sqrt{(x_G - x_T)^2 + (y_G - y_T)^2}. \quad (3)$$

На рисунках 4 и 5 показаны распределения по параметрам ψ и R , аппроксимированные функцией Рэля [37]. Также указаны интегральные значения параметров ψ_{68} и R_{68} в зависимости от количества сработавших станций. Из приведенных рисунков следует, что точность восстановления направления прихода оси ШАЛ и ее положения в плоскости станций по данным установки Tunka-Grande не превышает 2.3° и 26 м соответственно. При этом значение параметра R_{68} значительно уменьшается с увеличением числа сработавших станций.

Для определения энергии КЛ были апробированы две методики. В первом случае оценка энергии проводилась через число частиц электрон-фотонной компоненты ШАЛ N_E . Полученные результаты показали, что реконструируемые значения энергии КЛ сильно зависят от формы используемой функции пространственного распределения частиц (ФПР) и ее флуктуаций. В связи с чем, по аналогии с установкой Тунка-133, была применена вторая методика, заключающаяся в использовании плотности частиц на расстоянии 200 м от оси ШАЛ ρ_{200} . На рисунке 6, во-первых, показана экспериментальная зависимость энергии E_T , восстановленной по данным установки Тунка-133, от параметра ρ_{200} , восстановленного по данным установки Tunka-Grande. Аппроксимация реализована степенной функцией с параметрами p_0 и p_1 . Во-вторых, приведено распределение логарифмической разницы энергии $lg(\Delta E) = lg(E_G/\text{эВ}) - lg(E_T/\text{эВ})$, аппроксимированной функцией Гаусса с параметрами C , μ и σ .

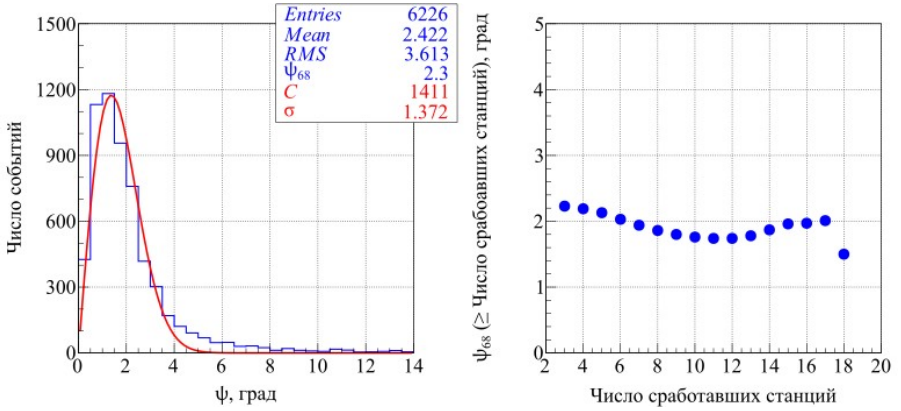


Рис. 4 — Распределение по углу ψ (слева) и интегральные значения параметра ψ_{68} в зависимости от количества сработавших станций (справа).

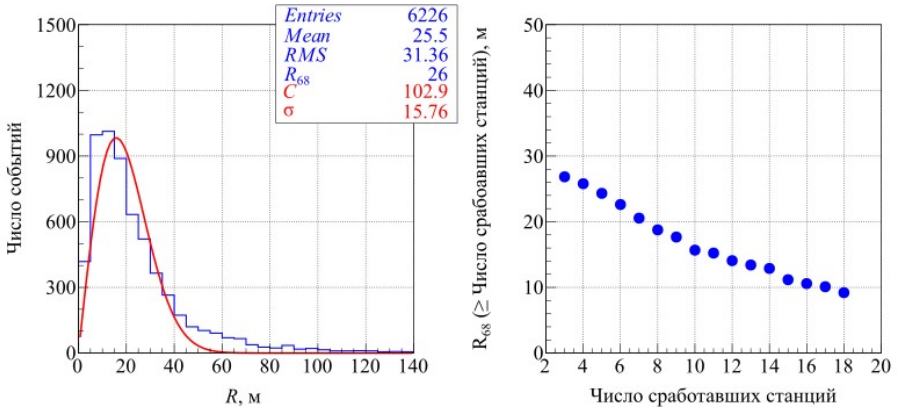


Рис. 5 — Распределение по расстоянию R (слева) и интегральные значения параметра R_{68} в зависимости от количества сработавших станций (справа).

Исходя из рисунка 6, для определения энергии КЛ по данным установки Tunka-Grande было предложено следующее выражение:

$$\lg(E/\text{эВ}) = \lg(\rho_{200}/\text{частица} \cdot \text{м}^{-2}) \cdot 0.84 + 15.99. \quad (4)$$

Энергетическое разрешение в случае использования формулы (4) не хуже 36%.

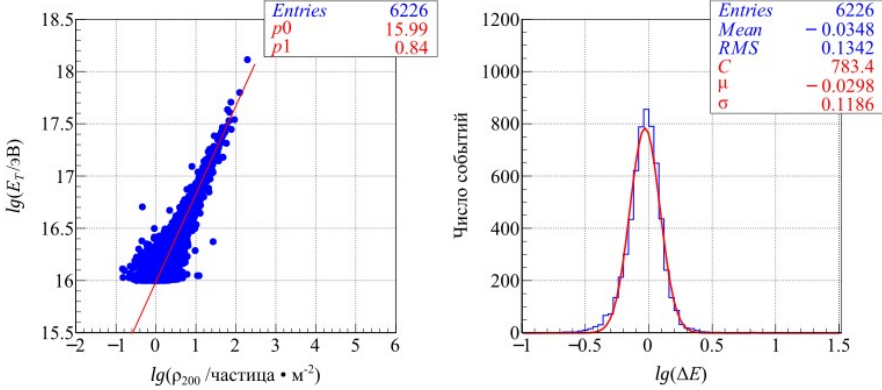


Рис. 6 — Зависимость энергии КЛ от параметра ρ_{200} (слева) и распределение по $lg(\Delta E)$ (справа).

Пятая глава посвящена восстановлению дифференциального энергетического спектра КЛ и поиску диффузного гамма-излучения по экспериментальным данным установки Tunka-Grande, полученным за период 2017 — 2021 гг. Материалы главы опубликованы в работах [A1—A3; A8; A9].

При построении энергетического спектра КЛ использовались данные, накопленные за ~ 8900 часов наблюдений. При этом было отобрано ~ 240000 ШАЛ, из них ~ 2000 ливней с энергией первичных частиц выше 10^{17} эВ. Восстановленный спектр КЛ и его сравнение с результатами других экспериментов представлены на рисунках 7 и 8. Из рисунка 7 следует, что спектр определен в интервале энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ и имеет достаточно сложную форму, которую возможно описать степенным законом с тремя различными спектральными индексами γ . До и после энергии $\sim 2 \cdot 10^{16}$ эВ $\gamma_1 \approx 3.18 \pm 0.01$ и $\gamma_2 \approx 3.0 \pm 0.01$ соответственно, в области выше 10^{17} эВ $\gamma_3 \approx 3.26 \pm 0.03$. На рисунке 8 видно, что полученный спектр не противоречит измерениям других экспериментов. Все приведенные результаты демонстрируют статистически обеспеченные особенности в области $\sim 2 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} эВ. И если второй излом может быть связан с переходом от галактических к внегалактическим КЛ, то первый в настоящее время не имеет однозначного астрофизического объяснения. Существующие различия в интенсивности потока КЛ на рисунке 8, вероятно, связаны со систематическими ошибками измерения энергии первичных частиц.

С целью поиска диффузного гамма-излучения по данным установки Tunka-Grande был проведен анализ обедненных мюонами ШАЛ. Для оценки эффективности регистрации и выделения кандидатов в фотонные ШАЛ в два этапа было реализовано компьютерное моделирование установки методом Монте-Карло. На первом шаге генерировались ШАЛ, на втором

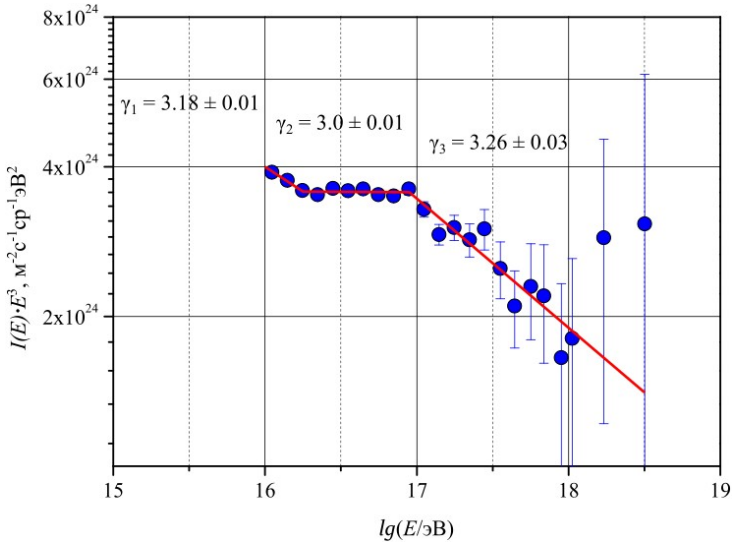


Рис. 7 — Дифференциальный энергетический спектр КЛ, восстановленный по экспериментальным данным установки Tunka-Grande.

определялся отклик сцинтилляционных счетчиков при прохождении через них частиц искусственных ливней. Для решения этих задач в качестве программного обеспечения были выбраны пакеты CORSIKA (версия 7.7401) и Geant4 (версия 10.04). ШАЛ генерировались для первичных гамма-квантов, протонов и ядер железа в диапазоне энергий $16.5 \leq \lg(E/\text{эВ}) \leq 17.5$ и интервале зенитных углов $0 - 35^\circ$. Спектр всех первичных частиц был разыгран по степенному закону с единым спектральным индексом $\gamma = 3$. Взаимодействия адронов при низких энергиях (до 80 ГэВ) рассчитывались с помощью модели GHEISHA [42], при высоких (выше 80 ГэВ) — с использованием модели QGSJET-II-04 [43]. Симуляция электромагнитных взаимодействий производилась с применением модели EGS4 [44]. Итоговое количество событий в созданном банке искусственных данных составило ~ 4600 ливней на каждый тип первичной частицы. С помощью программного пакета Geant4 была задана полная геометрия станций, максимально приближенная к реальности.

Для поиска кандидатов в фотонные ШАЛ был определен критерий их отбора. За эквивалент числа мюонов N_{sum} было принято суммарное энерговыделение в подземных частях сработавших станций в каждом событии, отнесенное к наиболее вероятному энерговыделению, которое, в свою очередь, соответствует прохождению одиночного вертикального мюона через сцинтилляционный счетчик (см. рисунок 2). Следует отметить, что

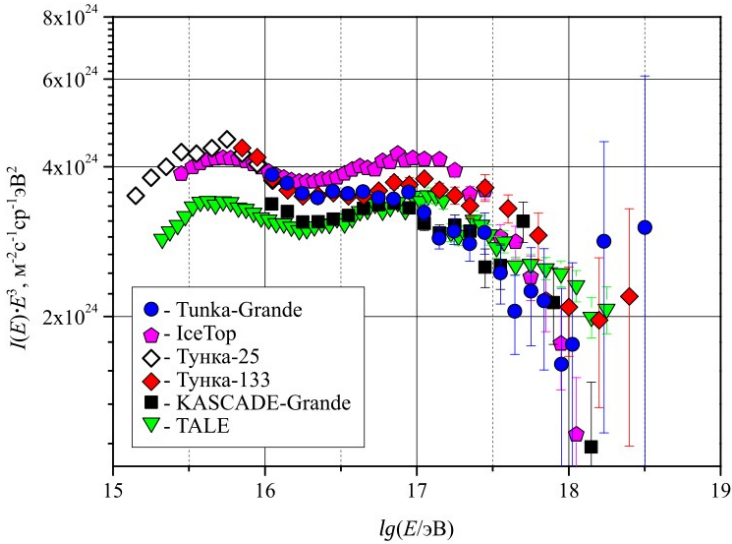


Рис. 8 — Сравнение дифференциальных энергетических спектров КЛ, восстановленных по экспериментальным данным установок Tunka-Grande, Tунка-25 [38], Tунка-133 [23], IceTop (SIBYLL 2.1) [39], KASCADE-Grande (QGSJET-II) [40] и TALE (QGSJET-II-03) [41].

параметр N_{sum} может принимать дробные значения вследствие флуктуаций энергетических потерь частиц ШАЛ. При вычислении числа мюонов также было введено условие на удаленность станций на расстояние более 70 м относительно положения оси ливня. Данное условие связано с результатами модельных расчетов, которые показывают, что вблизи оси весомую часть в суммарное энерговыделение подземных счетчиков вносят высокоэнергичные частицы электрон-фотонной и адронной компонент ливня. На рисунке 9 представлена зависимость числа N_{sum} , полученная как из искусственно сгенерированных, так и из экспериментальных данных, от параметра ρ_{200} . Безмюонные ШАЛ на графике соответствуют $lg(N_{sum}) = -1$ и $lg(N_{sum}) = -1.15$. На приведенном рисунке также показан результат аппроксимации событий от первичных гамма-квантов степенной функцией с параметрами p_0 и p_1 .

Из рисунка 9 следует, что смоделированные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются между собой. Функция с параметрами $p_0 = -0.3021$ и $p_1 = 1.09$ была выбрана в качестве критерия отбора кандидатов в фотонные ШАЛ, поскольку позволяет исключить из рассмотрения искусственные события от первичных протонов и ядер железа. В таком подходе эффективность выделения ливней от гамма-квантов практически при любом значении параметра ρ_{200} составляет $\sim 50\%$.

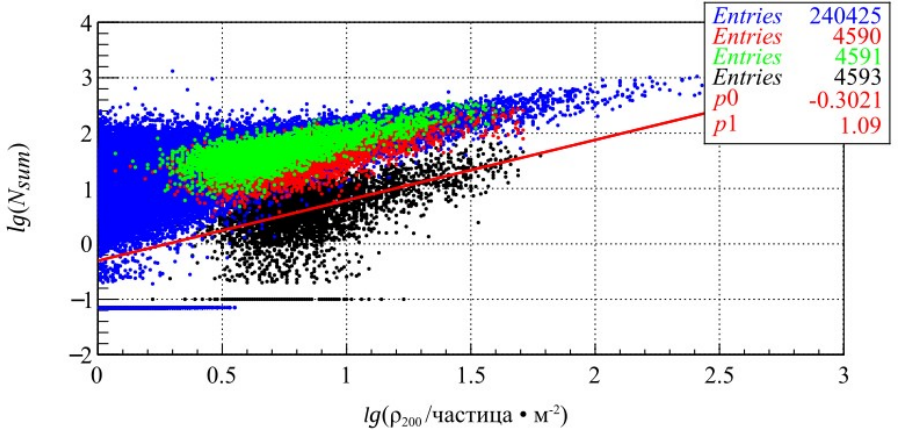


Рис. 9 — Зависимость числа N_{sum} от параметра ρ_{200} . Синим цветом выделены экспериментальные данные, красным, зеленым и черным — события от искусственных ШАЛ, инициированных протонами, ядрами железа и гамма-квантами соответственно.

Поиск кандидатов в фотонные ШАЛ проводился в четырех областях значений параметра ρ_{200} : $lg(\rho_{200}/\text{частица} \cdot \text{м}^{-2}) > 0.75$, > 1 , > 1.25 , > 1.5 . При выбранных критериях в экспериментальных данных не было обнаружено событий от первичных гамма-квантов, поэтому был оценен верхний предел на их интегральный поток F_γ , в том числе относительно интегрального потока КЛ F_{CR} . Расчеты проводились на основе выражения, использованного при аналогичных измерениях в экспериментах CASAMIA [45] и KASCADE-Grande [46]:

$$\frac{F_\gamma}{F_{CR}} < \frac{N_{90}}{N_{tot} \cdot \varepsilon_\gamma} \left(\frac{E_{CR}}{E_\gamma} \right)^{-\beta}, \quad (5)$$

где $N_{90} = 2.44$ — верхний предел на число первичных гамма-квантов при использовании стандартного метода Фельдмана-Казинса [47] на уровне достоверности (С.Л.) 90%, N_{tot} — общее количество зарегистрированных событий, $\varepsilon_\gamma \approx 0.5$ — эффективность отбора кандидатов в фотонные ШАЛ, E_γ и E_{CR} — средняя энергия гамма-квантов и КЛ, $\beta = 2$ — спектральный индекс интегрального потока КЛ.

Для определения средней энергии гамма-квантов из модельных расчетов, по аналогии с рисунком 6, было получено следующее выражение:

$$lg(E_\gamma/\text{эВ}) = lg(\rho_{200}/\text{частица} \cdot \text{м}^{-2}) \cdot 0.92 + 15.84. \quad (6)$$

Результаты исследования, в том числе их сравнение с измерениями других экспериментов, представлены в таблице 1 и на рисунке 10. Из приведенного рисунка следует, что полученные верхние пределы по порядку

величины находятся на одном уровне с аналогичными измерениями экспериментов KASCADE-Grande, ШАЛ-МГУ и Pierre Auger Observatory.

Таблица 1 — Результат поиска диффузного гамма-излучения по экспериментальным данным установки Tunka-Grande. Интегральный поток F_γ нормирован на $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$.

$lg(\rho_{200})$	N_{tot}	$lg(E_{CR}/\text{эВ})$	$lg(E_\gamma/\text{эВ})$	F_γ/F_{CR}	$F_\gamma \cdot 10^{-13}$
> 0.75	12548	16.62	16.53	< 0.00026	< 3.84
> 1	4584	16.83	16.76	< 0.00077	< 3.84
> 1.25	1565	17.04	16.99	< 0.0025	< 3.84
> 1.5	551	17.25	17.22	< 0.0077	< 3.84

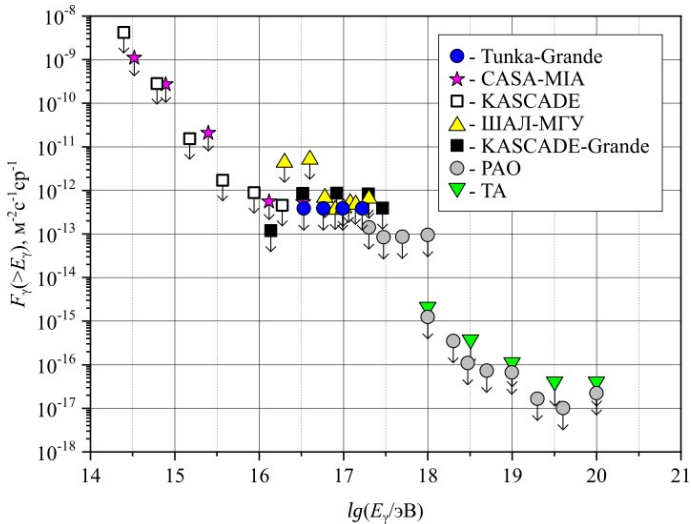


Рис. 10 — Ограничение на интегральный поток диффузного гамма-излучения по экспериментальным данным установки Tunka-Grande (90% C.L., QGSJET-II-04) и его сравнение с аналогичными измерениями экспериментов CASA-MIA (90% C.L.) [45], KASCADE (90% C.L., QGSJET-II-02) [46], ШАЛ-МГУ (90% C.L., QGSJET-II-04) [48], KASCADE-Grande (90% C.L., QGSJET-II-02) [46], Pierre Auger Observatory (95% C.L., EPOS LHS) [49] и Telescope Array (95% C.L., QGSJET-II-03) [50].

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Работа установки Тунка-133 показала высокую эффективность заложенных в нее физических идей и используемых технических решений. Инфраструктура действующей черенковской установки,

- накопленный опыт при ее создании и эксплуатации позволили за короткий период и с минимально возможными затратами развернуть сцинтилляционную установку Tunka-Grande и реализовать гибридный подход для детального изучения КЛ в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Аппаратно-программный комплекс установки Tunka-Grande разработан с учетом требования стабильной работы в климатических условиях Тункинской долины, обладает широким функционалом, отвечает всем современным требованиям и предусматривает возможность расширения и модернизации.
2. Разработаны и внедрены методики амплитудной калибровки сцинтилляционных счетчиков установки Tunka-Grande, обеспечивающие единый энергетический порог регистрации станций и переход от измеряемых параметров сигналов к числу частиц ШАЛ.
 3. По результатам проведения тестирования, настройки и отладки программно-аппаратного комплекса установки Tunka-Grande определены оптимальные условия для проведения сеансов наблюдений, при которых получаемые экспериментальные данные достоверны, а потери информации из-за технических аспектов минимальны.
 4. Сформирован банк экспериментальных данных установки Tunka-Grande за первые 5 лет ее работы, на основе которых реконструированы параметры ШАЛ и КЛ.
 5. При анализе совместных с установкой Тунка-133 событий показано, что оптимальными критериями отбора ШАЛ являются следующие условия: зенитный угол прихода оси ШАЛ в интервале $0 - 35^\circ$ и ее положение в круге радиусом 350 м относительно центра установки. В этом случае ошибка определения направления прихода оси ливня и ее положения в плоскости станций по экспериментальным данным установки Tunka-Grande не превышает 2.3° и 26 м соответственно.
 6. Предложенный параметр ρ_{200} для определения энергии КЛ достаточно хорошо коррелирует с энергией, восстановленной по данным установки Тунка-133, и слабо, по сравнению с параметром N_E , зависит от формы ФПР частиц и ее флуктуаций. Энергетическое разрешение в этом случае не хуже 36%.
 7. По экспериментальным данным установки Tunka-Grande, полученным за первые 5 сезонов измерений, восстановлен дифференциальный энергетический спектр КЛ и определен верхний предел на поток диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Результаты не противоречат аналогичным измерениям других экспериментов и подтверждают сложную структуру энергетического спектра в этом диапазоне энергий.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК

- A1. *Монхоев, Р. Д.* Сцинтилляционные эксперименты в составе экспериментального комплекса TAIGA / Р. Д. Монхоев // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. — 2023. — № 2. — С. 2320202. — (импакт-фактор РИНЦ 2021 — 0.074).

В изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

- A2. *Монхоев, Р. Д.* Сцинтилляционная установка Tunka-Grande: статус, результаты и планы / Р. Д. Монхоев // Письма в ЭЧАЯ. — 2023. — Т. 20, № 5. — С. 1117–1136. — (SJR 2022 — 0.267).
- A3. Основные результаты эксперимента Tunka-Grande / Р. Д. Монхоев [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 954–961. — (SJR 2022 — 0.211).
- A4. Установка Tunka-Grande — статус и перспективы / Р. Д. Монхоев [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. — 2017. — Т. 81, № 4. — С. 504–506. — (SJR 2022 — 0.211).
- A5. The Tunka-Grande experiment / R. D. Monkhoev [et al.] // JINST. — 2017. — Vol. 12, no. 6. — P. C06019. — (SJR 2022 — 0.65).
- A6. Поиск диффузного гамма-излучения по данным установки Tunka-Grande / Р. Д. Монхоев [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. — 2019. — Т. 83, № 8. — С. 1057–1060. — (SJR 2022 — 0.211).
- A7. Tunka-Grande and TAIGA-Muon scintillation arrays: status and prospects / R. Monkhoev [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2020. — Vol. 1697, no. 1. — P. 012026. — (SJR 2022 — 0.183).
- A8. Geant4 simulation of the Tunka-Grande experiment / R. Monkhoev [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2021. — Vol. 2103, no. 1. — P. 012001. — (SJR 2022 — 0.183).
- A9. *Monkhoev, R. D.* Method for gamma-hadron separation according to the experimental data of The Tunka-Grande array / R. D. Monkhoev // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. — 2023. — Vol. 16, no. 1.2. — P. 480–484. — (SJR 2022 — 0.128).

Список литературы

1. *Blasi, P.* Origin of very high- and ultra-high-energy cosmic rays / P. Blasi // Comptes Rendus Physique. — 2014. — Vol. 15. — P. 329–338.

2. *Drury, L. O.* Origin of Cosmic Rays / L. O. Drury // *Astropart. Phys.* — 2012. — Vol. 39/40. — P. 52—60.
3. *Птушкин, В. С.* Происхождение космических лучей / В. С. Птушкин // *Усп. физ. наук.* — 2010. — Т. 180, № 9. — С. 1000—1004.
4. *Гинзбург, В. Л.* Некоторые проблемы гамма-астрономии / В. Л. Гинзбург, В. А. Догель // *Усп. физ. наук.* — 1989. — Т. 158, № 5. — С. 3—58.
5. *Lee, S.* On the propagation of extragalactic high-energy cosmic and gamma-rays / S. Lee // *Phys. Rev. D.* — 1998. — Vol. 58. — P. 043004.
6. *Sigl, G.* On the origin of highest energy cosmic rays / G. Sigl, D. N. Schramm, P. Bhattacharjee // *Astropart. Phys.* — 1994. — Vol. 2. — P. 401—414.
7. Diffuse radiation from cosmic ray interactions in the galaxy / V. S. Berezhinsky [et al.] // *Astropart. Phys.* — 1993. — Vol. 1. — P. 281—288.
8. Cosmology With 100-Tev gamma-ray Telescopes / F. Halzen [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 1990. — Vol. 41. — P. 342—346.
9. *Fairbairn, M.* Photon-axion mixing and ultra-high-energy cosmic rays from BL Lac type objects — Shining light through the Universe / M. Fairbairn, T. Rashba, S. V. Troitsky // *Phys. Rev. D.* — 2011. — Vol. 84. — P. 125019.
10. *Kalashov, O. K.* Constraining heavy decaying dark matter with the high energy gamma-ray limits / O. K. Kalashov, M. Y. Kuznetsov // *Phys. Rev. D.* — 2016. — Vol. 94, no. 6. — P. 063535.
11. Diffuse Flux of Ultra-high-energy Photons from Cosmic-Ray Interactions in the Disk of the Galaxy and Implications for the Search for Decaying Super-heavy Dark Matter / C. Bérat [et al.] // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 929, no. 1. — P. 55.
12. *Galaverni, M.* Lorentz Violation in the Photon Sector and Ultra-High Energy Cosmic Rays / M. Galaverni, G. Sigl // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 100. — P. 021102.
13. *Гинзбург, В. Л.* Астрофизические аспекты исследования космических лучей (Первые 75 лет и перспективы на будущее) / В. Л. Гинзбург // *Усп. физ. наук.* — 1988. — Т. 155, № 6. — С. 185—218.
14. *Hillas, A. M.* Evolution of ground-based gamma-ray astronomy from the early days to the Cherenkov Telescope Arrays / A. M. Hillas // *Astropart. Phys.* — 2013. — Vol. 43. — P. 19—43.
15. Cherenkov gamma-ray telescopes: Past, present, future. The ALEGRO project / A. M. Bykov [et al.] // *Tech. Phys.* — 2017. — Vol. 62, no. 6. — P. 819—836.

16. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources / Z. Cao [et al.] // Nature. — 2021. — Vol. 594, no. 7861. — P. 33—36.
17. Peta-electron volt gamma-ray emission from the Crab Nebula / Z. Cao [et al.] // Science. — 2021. — Vol. 373, no. 6553. — P. 425—430.
18. First Detection of sub-PeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Disk: Evidence for Ubiquitous Galactic Cosmic Rays beyond PeV Energies / M. Amenomori [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Vol. 126, no. 14. — P. 141101.
19. Cosmic-Ray Research at the TAIGA Astrophysical Facility: Results and Plans / I. I. Astapov [et al.] // JETP. — 2022. — Vol. 134, no. 4. — P. 469—478.
20. The TAIGA Experiment: From Cosmic Ray Physics to Gamma Astronomy in the Tunka Valley / N. M. Budnev [et al.] // Phys. Part. Nucl. — 2018. — Vol. 49, no. 4. — P. 589—598.
21. The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: Status of 2011 / S. Berezhnev [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2012. — Vol. 692. — P. 98—105.
22. The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array / N. M. Budnev [et al.] // Astropart. Phys. — 2020. — Vol. 117. — P. 102406.
23. Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays According to the Data of the TAIGA Astrophysical Complex / V. V. Prosin [et al.] // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. — 2023. — Vol. 87, no. 7. — P. 1043—1045.
24. *Atrashkevich, V. B.* Method for studying the chemical composition of the primary cosmic radiation at and above 10^{17} eV / V. B. Atrashkevich, N. N. Kalmykov, G. B. Khristiansen // JETP Letters. — 1981. — Vol. 33. — P. 225—227.
25. UHE cosmic ray event reconstruction by the electromagnetic detector of EAS-TOP / M. Aglietta [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 1993. — Vol. 336. — P. 310—321.
26. The KASCADE-Grande experiment / W. D. Apel [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2010. — Vol. 620, no. 2. — P. 202—216.
27. Cluster type EAS array of the NEVOD experimental complex / M. B. Amelchakov [et al.] // JINST. — 2017. — Vol. 12, no. 06. — P. C06033.
28. *Sciutto, S. J.* The AIRES system for air shower simulations: An Update / S. J. Sciutto // 27th International Cosmic Ray Conference. — 06/2001.
29. Моделирование сцинтилляционного эксперимента Тунка-133 / Н. М. Буднев [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. — 2014. — № 4. — С. 80.

30. Возможности сцинтилляционного эксперимента Tunka-Grande в изучении массового состава первичных космических лучей / Н. М. Буднев [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. — 2015. — № 2. — С. 80.
31. A LED flasher for TUNKA experiment / B. K. Lubsandorzhev [et al.] // 30th International Cosmic Ray Conference. Vol. 5. — 2007. — P. 1117—1120.
32. New EAS Array at Moscow State University for Studying the E. A. Showers with Energies of up to 10^{18} eV / S. N. Vernov [et al.] // 16th Intern. Cosmic Ray Conf. — 1979. — Vol. 8. — P. 129—134.
33. Towards a Next Generation of CORSIKA: A Framework for the Simulation of Particle Cascades in Astroparticle Physics / R. Engel [et al.] // Comput. Softw. Big Sci. — 2019. — Vol. 3, no. 1. — P. 2.
34. Recent developments in Geant4 / J. Allison [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2016. — Vol. 835. — P. 186—225.
35. *Landau, L.* On the energy loss of fast particles by ionization / L. Landau // J. Phys. (USSR). — 1944. — Vol. 8. — P. 201—205.
36. *Moyal, J. E.* Theory of ionization fluctuations / J. E. Moyal // Phil. Mag. Ser. 7. — 1955. — Vol. 46, no. 374. — P. 263—280.
37. *Rayleigh, L.* XII. On the resultant of a large number of vibrations of the same pitch and of arbitrary phase / L. Rayleigh // Philosophical Magazine Series 1. — 1880. — Vol. 10. — P. 73—78.
38. Tunka-25 Air Shower Cherenkov array: The main results / N. Budnev [et al.] // Astropart. Phys. — 2013. — Vol. 50—52. — P. 18—25.
39. Cosmic ray spectrum and composition from PeV to EeV using 3 years of data from IceTop and IceCube / M. G. Aartsen [et al.] // Phys. Rev. D. — 2019. — Vol. 100, no. 8. — P. 082002.
40. The spectrum of high-energy cosmic rays measured with KASCADE-Grande / W. D. Apel [et al.] // Astropart. Phys. — 2012. — Vol. 36. — P. 183—194.
41. The Cosmic-Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE detector in monocular mode / R. U. Abbasi [et al.] // Astrophys. J. — 2018. — Vol. 865, no. 1. — P. 74.
42. *Heck, D.* Low energy hadronic interaction models / D. Heck // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. — 2006. — Vol. 151. — P. 127—134.
43. *Ostapchenko, S.* QGSJET-II: physics, recent improvements, and results for air showers / S. Ostapchenko // EPJ Web Conf. — 2013. — Vol. 52. — P. 02001.

44. *Nelson, W. R.* The Egs4 Code System / W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers. — 1985. — Dec.
45. Limits on the isotropic diffuse flux of ultrahigh-energy gamma radiation / M. C. Chantell [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 1997. — Vol. 79. — P. 1805–1808.
46. KASCADE-Grande Limits on the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Flux between 100 TeV and 1 EeV / W. Apel [et al.] // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 848. — P. 1.
47. *Feldman, G. J.* A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals / G. J. Feldman, R. D. Cousins // *Phys. Rev. D.* — 1998. — Vol. 57. — P. 3873–3889.
48. Constraints on the flux of $\sim 10^{16}$ - $10^{17.5}$ eV cosmic photons from the EAS-MSU muon data / Y. A. Fomin [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 95, no. 12. — P. 123011.
49. A search for ultra-high-energy photons at the Pierre Auger Observatory exploiting air-shower universality / P. Abreu [et al.] // *PoS.* — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 373.
50. Constraints on the diffuse photon flux with energies above 10^{18} eV using the surface detector of the Telescope Array experiment / R. U. Abbasi [et al.] // *Astropart. Phys.* — 2019. — Vol. 110. — P. 8–14.