

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Кузьмичев Леонид Александрович

Москва — 2023

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Обзор установок для исследования КЛ в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ	13
1.1 Завершенные эксперименты	14
1.1.1 ШАЛ-МГУ	14
1.1.2 KASCADE-Grande	15
1.2 Действующие и проектируемые установки	20
1.2.1 НЕВОД	20
1.2.2 Тянь-Шаньская высокогорная станция	24
1.2.3 TAIGA	26
1.2.4 IceTop	31
1.2.5 Telescope Array	33
1.2.6 Pierre Auger Observatory	35
1.2.7 LHAASO	38
1.2.8 GRANDproto300	40
1.2.9 SKA	41
1.3 Полученные результаты	41
Глава 2. Создание установки Tunka-Grande	45
2.1 Расположение станций и организация линий связи	45
2.2 Конструкция сцинтилляционного счетчика и станции	48
2.3 Программно-аппаратный комплекс	54
2.3.1 Система сбора данных	54
2.3.2 Система временной синхронизации	61
2.3.3 Система управления и мониторинга	63
2.4 Схема подключения сцинтилляционных счетчиков в станции	64
Глава 3. Ввод в эксплуатацию установки Tunka-Grande	66
3.1 Измеряемые параметры регистрируемых событий	66
3.2 Передаточная характеристика модуля измерения формы сигналов	68
3.3 Амплитудная калибровка сцинтилляционных счетчиков	70
3.3.1 Калибровка первого и второго динамических диапазонов	70

	Стр.
3.3.2 Калибровка третьего динамического диапазона	74
3.3.3 Спектр плотностей ШАЛ	75
3.4 Ограничение на темп счета станций	77
3.5 Условия выработки триггера станций	78
3.6 Временная синхронизация станций	83
3.7 Проведение сеансов наблюдений	83
Глава 4. Реконструкция параметров ШАЛ и КЛ по данным установки Tunka-Grande	85
4.1 Первый этап реконструкции параметров ШАЛ	85
4.1.1 Плотность зарегистрированных частиц ШАЛ	86
4.1.2 Направление прихода оси ШАЛ	88
4.1.3 Координаты положения оси ШАЛ	89
4.1.4 Число частиц электрон-фотонной компоненты ШАЛ	89
4.2 Второй этап реконструкции параметров ШАЛ	90
4.3 Третий этап реконструкции параметров ШАЛ	91
4.4 Совместные события установок Тунка-133 и Tunka-Grande	92
4.4.1 Сравнение значений восстановленных параметров ШАЛ	94
4.4.2 Методика реконструкции энергии КЛ	97
4.4.3 Оптимальные критерии отбора ШАЛ	98
Глава 5. Результаты за первые 5 лет работы установки Tunka-Grande	102
5.1 Общая информация по экспериментальным данным	102
5.2 Дифференциальный энергетический спектр КЛ	103
5.3 Ограничение на поток диффузного гамма-излучения	105
5.3.1 Моделирование установки Tunka-Grande	106
5.3.2 Методика поиска кандидатов в фотонные ШАЛ	108
5.3.3 Полученные результаты	111
Заключение	113
Список сокращений и условных обозначений	115
Список литературы	116

	Стр.
Приложение А. Координаты станций установки Tunka-Grande .	130
Приложение Б. Аппроксимирующие функции	131
Приложение В. Geant4-модель установки Tunka-Grande	132
Приложение Г. Условие на удаленность положения оси ШАЛ относительно станций установки Tunka-Grande .	133

Введение

Актуальность темы и степень ее разработанности. Отправной точкой в истории физики космических лучей (КЛ) принято считать серию баллонных экспериментов под руководством австрийского ученого В. Гесса, завершившуюся 7 августа 1912 г [1—3]. Использование в этих экспериментах воздушного шара и довольно простого прибора — электроскопа с целью измерения радиационного фона Земли на разных высотах дало по-настоящему интересные результаты. Анализ данных привел В. Гесса к выводу, что существует некое проникающее излучение, приходящее в атмосферу из космического пространства. Впоследствии этот вывод был неоднократно подтвержден, а само открытие в 1936 г отмечено Нобелевской премией. Здесь необходимо подчеркнуть, что достижению В. Гесса предшествовали многие, порой неоправданно забытые наблюдения других исследователей. В частности, измерения итальянца Д. Пачини, выполненные на год раньше, и его интерпретация полученных результатов также прямо указывали на наличие излучения внеземного происхождения [4—6]. С момента открытия КЛ прошло уже более 100 лет, но ответы на многие фундаментальные вопросы, связанные с их источниками, механизмами рождения и распространения, до сих пор не найдены. Понимание природы этих явлений позволит сделать большой шаг в изучении Вселенной, описании происходящих в ней процессов и свойств астрофизических объектов.

Термин «космические лучи» (в оригинале «cosmic rays») в широком обращении был введен американским физиком Р. Миллекеном в 1925 г [7; 8], и сегодня под этим понимается поток высокоэнергетических заряженных частиц, таких как протоны, α -частицы и более тяжелые ядра. В менее строгом смысле в данное определение также могут быть включены электроны, позитроны, нейтрино и гамма-кванты. Максимальная энергия экспериментально обнаруженных частиц космического излучения достигает значения $\sim 10^{20}$ эВ и, вероятно, обусловлена реакцией Грейзена-Зацепина-Кузьмина [9; 10]. Для регистрации и исследования КЛ используется множество принципов, экспериментальных методов и приборов. Прямые измерения, выполняемые на высотных баллонах или искусственных спутниках Земли, наиболее надежны и позволяют получать информацию об энергетическом спектре, элементном составе и анизотропии КЛ до энергии $\sim 10^{15}$ эВ. Ограничение связано с требова-

ниями на вес, размер и время работы аппаратуры, а также с тем, что плотность потока КЛ быстро падает с ростом энергии. Для изучения КЛ более высоких энергий используется способность космического излучения порождать каскады вторичных частиц в атмосфере, так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ) [11—13]. Впервые генетически связанные группы частиц наблюдались советским физиком Д. Скобельцыным в его опытах с камерой Вильсона в 1929 г [14; 15]. Наличие ливней, охватывающих площади в десятки тысяч квадратных метров на поверхности Земли, было экспериментально доказано в 1938 г французами П. Оже и Р. Мазе [16]. В своем составе ШАЛ содержит электрон-фотонную, адронную, мюонную и нейтринную компоненты и является источником черенковского, ионизационного и радиочастотного излучений. Сегодня эти составляющие могут быть непосредственно зарегистрированы наземными установками, а их восстановленные характеристики использованы для определения свойств КЛ. Как правило, наземные установки представляют собой массив синхронно работающих пунктов, состоящих из детектора или группы детекторов и размещенных на определенном расстоянии друг от друга. При этом тип детектора и расположение пунктов определяется методикой измерений и решаемыми физическими задачами в заданном энергетическом диапазоне КЛ. Следует также отметить, что для повышения качества исследований на многих установках применяется гибридный подход, при котором осуществляется одновременная регистрация сразу нескольких компонент ШАЛ.

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 [17—19] и наблюдаются расхождения в данных разных экспериментов. Поиск космического гамма-излучения в том же интервале энергий определяет еще одно важное направление исследований [20; 21]. 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 [22—24] 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 [25], распадом частиц сверхтяжелой темной материи [26; 27], нарушением Лоренц-инвариантности [28]. Первые экспериментальные работы по поиску гамма-квантов были начаты более полувека назад [29—31], но по до сих пор не обнаружено фотонов от локальных источников с энергией более $1.6 \cdot 10^{15}$ эВ [32; 33] и диффузного излучения выше 10^{15} эВ [34].

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 [35], а в последние годы и гамма-астрономии [36]. За период с 1993 по 2012 гг на территории полигона было создано несколько 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 [37]. К одному из главных результатов работы этой установки относится доказательство более сложной формы энергетического спектра КЛ, чем предполагалось ранее. Так, в работе [38] приведен спектр, восстановленный по экспериментальным данным семи сезонов измерений (общее время наблюдений ~ 2175 часов), и дано указание на наличие статистически обеспеченных особенностей (изменение наклона спектра) при энергии $\sim 2 \cdot 10^{16}$ и $3 \cdot 10^{17}$ эВ. При этом согласно повторной реконструкции параметров ШАЛ и КЛ в 2022 г, положение второго излома сместилось в сторону энергии 10^{17} эВ [39]. И если этот изгиб может быть связан с переходом от галактических к внегалактическим КЛ, то особенность при энергии $\sim 2 \cdot 10^{16}$ эВ в настоящее время не имеет однозначного астрофизического объяснения. 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 черенков-

ского 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 [40]. 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 [41].
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-TOР [42] и KASCADE-Grande [43], а в настоящее время применяются для целей установки НЕВОД-ШАЛ [44; 45].
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 AIREС (AIRshower Extended Simulations) [46—49].
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 [50], разработанного для целей установки Тунка-133.
5. Применяемая в диссертационном исследовании процедура реконструкции параметров ШАЛ основана на базе опыта работы установки ШАЛ-МГУ [51; 52].
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) [53] и Geant4 (версия 10.04) [54; 55].

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 AIREIS 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 [56] издано в журнале, рекомендованном ВАК, 8 [57—64] — 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.

Глава 1. Обзор установок для исследования КЛ в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ

Сегодня регистрация наземными установками компонент ШАЛ является единственно возможным способом для изучения КЛ с энергией выше 10^{15} эВ. Среди как завершенных, так и действующих экспериментов, благодаря которым сформирован основной массив данных в области высоких и сверхвысоких энергий КЛ, можно выделить следующие:

1. Область «колени Христиансена–Куликова» [65], диапазон энергий 10^{14} — 10^{16} эВ: ШАЛ-МГУ [51], EAS-TOPO [66], CASA-MIA [67], GAMMA [68], Тунка-25 [69], Ковер [70] и Андырчи [71], GRAPES-3 [72], Тянь-Шаньская высокогорная станция ФИАН [73], KASCADE [74], Tibet [75].
2. Предполагаемая область перехода от галактических к внегалактическим КЛ, диапазон энергий 10^{16} — 10^{18} эВ: Akeno [76], Haverá Park [77], SUGAR [78], ШАЛ-МГУ, GAMMA, KASCADE-Grande [43], Тунка-133 [37], IceTop [79], Якутская комплексная установка ШАЛ [80], Tibet.
3. Верхний край энергетического спектра, энергия выше 10^{18} эВ: Volcano Ranch [81], Haverá Park, SUGAR, Якутская комплексная установка ШАЛ, AGASA [82], Fly's Eye [83], HiRes [84], Telescope Array [85], Pierre Auger Observatory [86].

Несмотря на многолетнюю работу исследовательских групп, в настоящее время отсутствует согласованная картина в физике КЛ. Ожидается, что в ближайшие годы эта ситуация будет исправлена за счет дополнительного анализа экспериментальных данных завершенных экспериментов и получения качественно новых данных от действующих установок с учетом их развития. Глава посвящена актуальному на момент написания работы состоянию исследований в области физики КЛ и гамма-астрономии в диапазоне энергий 10^{16} — 10^{18} эВ. Материалы главы опубликованы в работах [56; 63; 64].

1.1 Завершенные эксперименты

В рамках настоящего раздела среди завершенных экспериментов, данные которых не потеряли своей актуальности и продолжают анализироваться исследовательскими группами, рассмотрены установки ШАЛ-МГУ и KASCADE-Grande.

1.1.1 ШАЛ-МГУ

Установка ШАЛ-МГУ была создана в 1950-х гг на территории Московского государственного университета (МГУ) с целью регистрации заряженной компоненты ШАЛ. Ее центральная часть располагалась в здании 20-го корпуса МГУ на высоте 190 м н.у.м. С момента создания установка была неоднократно модернизирована и за время ее работы были получены значимые результаты в широком диапазоне энергий. Одним из важнейших открытий является обнаружение излома в спектре КЛ при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ — «колени Христиансена–Куликова» [65]. С точки зрения исследования области перехода от галактических к внегалактическим источникам КЛ наибольший интерес представляет конфигурация установки и сеансы наблюдений 1982 — 1990 гг [51]. В этот период времени наземная часть установки ШАЛ-МГУ представляла собой 77 пунктов, в каждом из которых располагались 3 группы счетчиков Гейгера-Мюллера (общее количество ~ 10000 единиц) разной площади: 21 см², 100 см², 330 см². Дополнительно на территории университета также были размещены 29 сцинтилляционных счетчиков на основе пластикового сцинтиллятора в форме пластин размером $0.5 \cdot 1 \cdot 0.05$ м³ и фотоэлектронных умножителей ФЭУ-110. Счетчики Гейгера-Мюллера отвечали за измерение плотности заряженных частиц ШАЛ, сцинтилляционные детекторы — за определение направления прихода ШАЛ и формирование триггерного сигнала. При этом выработка локального триггера осуществлялась двумя независимыми системами: центральной и периферийной. Первая предназначалась для отбора ШАЛ с числом частиц $N < 2 \cdot 10^7$ и состояла из 7 счетчиков: один площадью 1 м² располагался в центре установки, а остальные 6 площадью 0.5 м² каждый раз-

мещались в вершинах правильного шестиугольника на расстоянии ~ 60 м от центрального. Задача периферийной системы состояла в регистрации ШАЛ с числом частиц $N > 10^7$. Система включала в себя 22 счетчика площадью по 0.5 м^2 , которые находились в тех же пунктах, что и счетчики Гейгера-Мюллера, и образовывали 13 четырехугольников со стороной $150 - 200$ м. Условие выработки триггера заключалось в срабатывании более двух детекторов во временном окне 500 нс для центральной системы и не менее четырех счетчиков в окне 6 мкс для периферийной системы. Общая площадь наземной части установки составляла $\sim 0.5 \text{ км}^2$. Выделение мюонной компоненты ШАЛ осуществлялось за счет четырех пунктов, расположенных под землей на глубине 40 м водного эквивалента, что соответствует пороговой энергии для вертикальных мюонов $\sim 10 \text{ ГэВ}$. Центральный детектор общей площадью 36.4 м^2 находился под центральным пунктом наземной части и содержал 1104 счетчика Гейгера-Мюллера. Остальные 3 детектора общей площадью по 18.2 м^2 состояли из 552 счетчиков каждый и располагались на расстояниях $150 - 300$ м от центра установки (см. рисунок 1.1).

Высокое качество установки ШАЛ-МГУ, ее конфигурация и длительный период работы позволил исследовать пространственные характеристики ШАЛ, определить энергетический спектр [87] и массовый состав КЛ [88–90] в интервале энергий $10^{15} - 5 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$. Банк экспериментальных данных за весь период наблюдений содержит более миллиона событий, анализ которых продолжается в настоящее время. К числу последних значимых результатов установки относится ограничение на поток диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $\sim 10^{16} - 5 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$ [91].

1.1.2 KASCADE-Grande

Установка KASCADE-Grande (KARlsruhe Shower Core and Array DEtector-Grande) [43] работала в период $2003 - 2009$ гг с целью изучения КЛ в области энергии $10^{16} - 10^{18} \text{ эВ}$. Установка входила в состав единого экспериментального комплекса, располагавшегося на территории научно-исследовательского центра Карлсруэ, Германия, на высоте 110 м н.у.м. Помимо KASCADE-Grande комплекс также включал в себя установки KASCADE, KASCADE-Piccolo и LOPES,

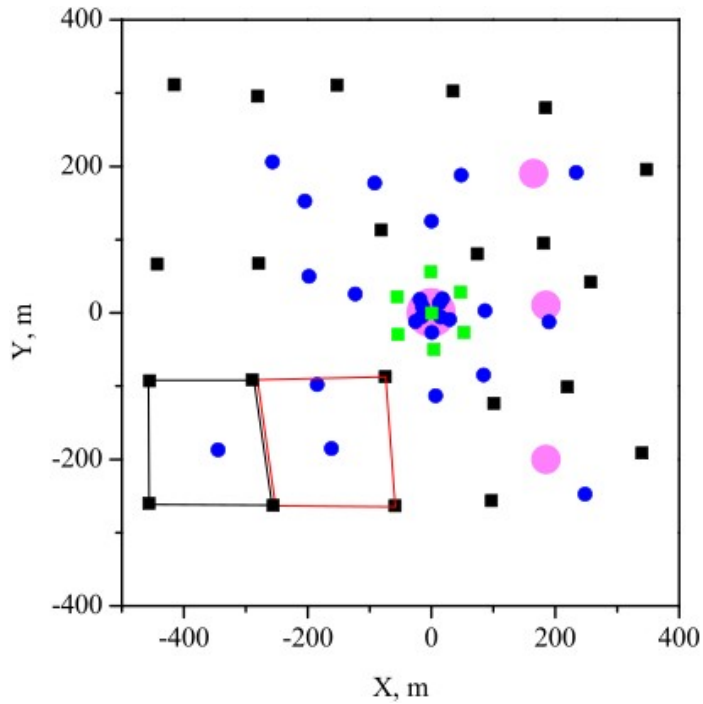


Рисунок 1.1 — Схематичное расположение установки ШАЛ-МГУ (слева) и фотография здания 20-го корпуса МГУ (справа). Синие кружки — пункты без сцинтилляционных счетчиков, зеленые и черные квадраты — пункты центральной и периферийной систем отбора событий соответственно, фиолетовые кружки — мюонные детекторы, черными и красными линиями выделены 2 из 13 четырехугольников периферийной системы.

центральный детектор, главным компонентом которого являлся адронный калориметр, и мюонный трековый детектор (см. рисунок 1.2).

Установка KASCADE-Grande представляла собой 37 станций площадью $\sim 10 \text{ м}^2$, в каждой из которых размещались 16 сцинтилляционных счетчиков для регистрации электрон-фотонной компоненты ШАЛ. Все станции были сгруппированы в 18 кластеров гексагонального типа. Выработка локального триггера осуществлялась при условии одновременного срабатывания четырех из семи станций в кластере. Общая площадь установки составляла $\sim 0.5 \text{ км}^2$. Сцинтилляционный счетчик включал в себя дюралюминиевый кожух в виде усеченной пирамиды, пластиковый сцинтиллятор NE102A в форме пластины размером $800 \cdot 800 \cdot 40 \text{ мм}^3$ и ФЭУ Photonis XP-3462. Необходимо отметить, что данные счетчики до 2000 г также успешно использовались на установке EAS-TOP [42], а после завершения эксперимента KASCADE-Grande в 2012 г были перевезены в Россию для создания установок Tunka-Grande и НЕВОД-ШАЛ [44; 45].

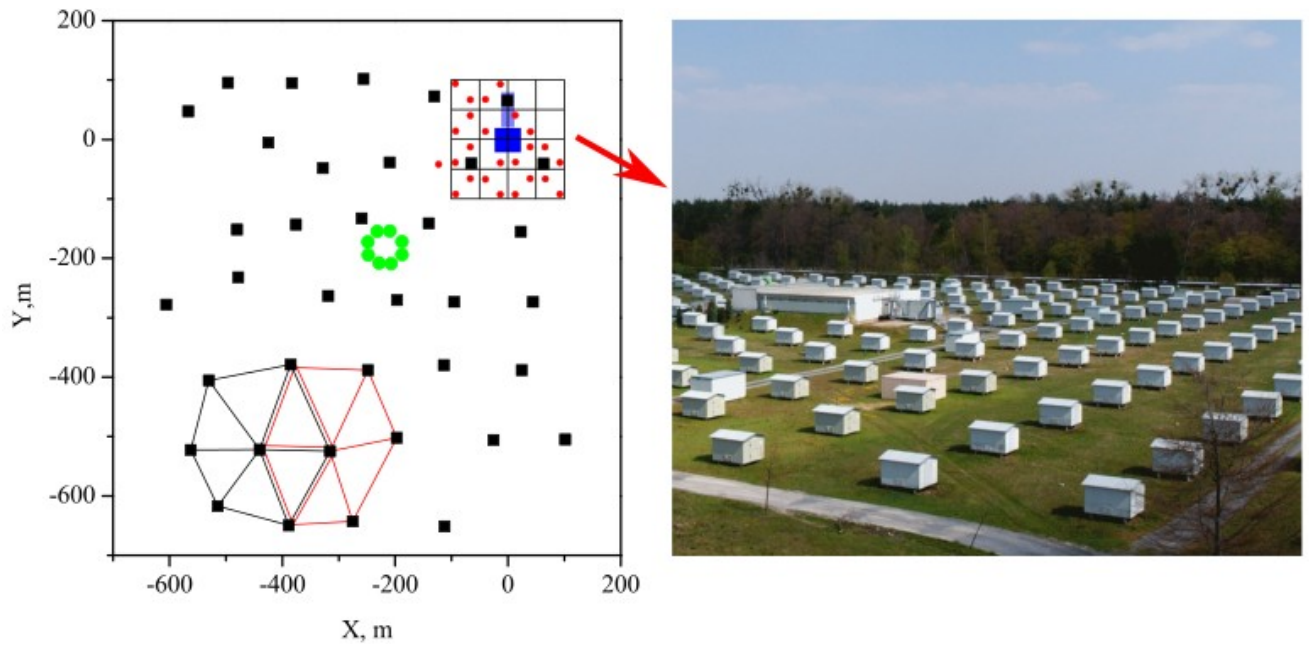


Рисунок 1.2 — Схематичное расположение экспериментального комплекса на территории научно-исследовательского центра Карлсруэ (слева) и фотография установки KASCADE (справа). Черные квадраты — станции установки KASCADE-Grande, зеленые кружки — станции установки KASCADE-Piccolo, квадратная сетка — расположение установки KASCADE, красные кружки — антенны установки LOPES, синий квадрат — центральный детектор, фиолетовый прямоугольник — мюонный трековый детектор, черными и красными линиями выделены 2 из 18 кластеров установки KASCADE-Grande.

Установка KASCADE [74] была создана в 1996 г с целью регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ при энергии первичных частиц в диапазоне $10^{14} - 10^{17}$ эВ. Установка состояла из 252 станций, равномерно размещенных на площади $4 \cdot 10^4$ м². Станции были сгруппированы в 16 независимо работающих кластеров: 4 центральных и 12 периферийных. Каждый центральный кластер был сформирован из 15 станций для регистрации электрон-фотонной компоненты ШАЛ и включал в себя 60 сцинтилляционных счетчиков в форме усеченного конуса. Внутри конуса находились ФЭУ ЕМІ 9822 или Valvo XR3462 и жидкий сцинтиллятор толщиной 5 см и площадью 0.785 м². Периферийные кластера состояли из 16 станций, которые помимо 32 счетчиков электрон-фотонной компоненты ШАЛ дополнительно были оснащены мюонными детекторами. Основа этих детекторов — пластиковый сцинтиллятор толщиной 3 см и общей площадью 3.24 м², переизлучатели и ФЭУ ЕМІ 9902 или

Valvo XR2081. В качестве поглотителя электрон-фотонной компоненты ШАЛ в станциях использовались пластины из свинца и железа толщиной 10 см и 4 см соответственно. Пороговая энергия для вертикальных мюонов составляла 230 МэВ. Выработка локального триггера установки происходила при детектировании ШАЛ не менее чем одним кластером. При этом для каждого центрального кластера триггерным условием являлось одновременное срабатывание 20 из 60 счетчиков электрон-фотонной компоненты ШАЛ, для каждого периферийного — срабатывание 10 из 32 счетчиков. Еще одним условием запуска установки являлся внешний триггерный сигнал от установки KASCADE-Grande, который в этом случае формировался при срабатывании всех станций в пределах одного кластера. На рисунке 1.3 показан внешний вид станций установок KASCADE и KASCADE-Grande.



Рисунок 1.3 — Внешний вид станций установок KASCADE-Grande (слева) и KASCADE (справа).

Установка KASCADE-Piccolo состояла из восьми станций, включающих в себя 12 сцинтилляционных счетчиков на основе пластиковых сцинтилляторов размером $300 \cdot 30 \cdot 3 \text{ см}^3$, переизлучателей и ФЭУ ЕМІ 9813КВ. Установка была создана для выработки и передачи триггерных сигналов установкам KASCADE и KASCADE-Grande с целью их совместного набора данных. Станции были разбиты на 4 пары, которые равноудаленно располагались по периметру квадрата со стороной 60 м. Условием выработки триггера служило одновременное срабатывание не менее двух станций.

Установка LOPES (LOfar PrototypE Station) [92] работала в период с 2003 по 2013 гг и предназначалась для изучения возможности исследования КЛ в области энергии $10^{17} - 10^{18}$ эВ методом регистрации радиоизлучения ШАЛ

в частотном диапазоне 40 — 80 МГц. Установка состояла из 30 антенн и за время эксплуатации неоднократно меняла свою конфигурацию (на рисунке 1.2 отображен последний из вариантов). Возможности установки не позволяли вырабатывать локальный триггер, поэтому для ее запуска использовались внешние триггерные сигналы от установок KASCADE и KASCADE-Grande.

Главная задача центрального детектора заключалась в детальном исследовании плотности частиц вблизи оси ШАЛ. Детектор размером $20 \cdot 16 \cdot 4.5$ м³ располагался в геометрическом центре установки KASCADE и включал в себя адронный калориметр [93], состоящий из 5-сантиметрового свинцового фильтра, девяти слоев железного поглотителя толщиной от 12 см до 36 см, 77-сантиметровой бетонной плиты, ~ 11000 ионизационных камер, массива сцинтилляционных счетчиков и мюонного детектора. Камеры размещались на девяти горизонтальных уровнях между слоями поглотителя. После третьего слоя с целью определения времени прибытия частиц и выработки локального триггера располагались 456 сцинтилляционных счетчиков на основе пластикового сцинтиллятора в виде двух пластин размером $47.5 \cdot 47.5 \cdot 3$ см³ каждая. Условие выработки триггера заключалось в срабатывании 8 из 456 счетчиков или наличие сигнала в одном детекторе, соответствующего прохождению 50 минимально ионизирующих частиц. Пороговая энергия для вертикальных мюонов составляла 490 МэВ. Под калориметром размещались 32 многопроволочных пропорциональных камеры, расположенных в 2 слоя, и 90 стримерных трубок для определения положения и углов прихода мюонов с энергией выше 2.4 ГэВ. Помимо этого, на поверхности для совместных измерений с установкой KASCADE и выработки триггера при регистрации электрон-фотонной компоненты ШАЛ был создан дополнительный кластер, включающий в себя 50 счетчиков, аналогичных счетчикам адронного калориметра. Условие формирования триггерного сигнала заключалось в детектировании ШАЛ 10 из 50 счетчиков.

Мюонный трековый детектор [94] находился к северу от центрального детектора под слоем бетона, железа и грунта. В туннеле размером $5.4 \cdot 2.4 \cdot 44$ м³ с помощью трех слоев стримерных трубок на площади 128 м² регистрировались мюоны с энергетическим порогом 0.8 ГэВ. Детектор работал в режиме как локального, так и внешнего триггера. В последнем случае источниками триггерных сигналов выступали установка KASCADE и кластер верхнего уровня центрального детектора.

30 марта 2009 г экспериментальный комплекс был официально закрыт. В настоящее время данные многолетних наблюдений находятся в открытом доступе благодаря проекту KCDC (KASCADE Cosmic-ray Data Centre) [95]. К главным результатам установок KASCADE и KASCADE-Grande следует отнести обнаружение особенностей в энергетическом спектре КЛ при энергиях $\sim 5 \cdot 10^{15}$, $2 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} эВ [96; 97], указание на утяжеление массового состава в области выше $\sim 5 \cdot 10^{15}$ эВ и на излом в спектре тяжелых элементов при энергии $\sim 8 \cdot 10^{16}$ эВ [96; 98]. Также по данным установок был получен верхний предел на поток диффузного гамма-излучения в интервале энергий $\sim 2 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$ эВ [99].

1.2 Действующие и проектируемые установки

К действующим и проектируемым установкам, рассмотренным в настоящей работе, относятся эксперименты НЕВОД, Тянь-Шаньская высокогорная станция ФИАН, TAIGA, IceTop, Telescope Array, Pierre Auger Observatory, LHAASO, GRANDproto300 и SKA.

1.2.1 НЕВОД

Экспериментальный комплекс НЕВОД [100] располагается на территории национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» на высоте 173 м н.у.м. и предназначен для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач. К его главным научным направлениям относится исследование КЛ в диапазоне энергий $10^{11} - 10^{19}$ эВ, а также мониторинг и прогнозирование состояния гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли методом мюонографии. Данный метод заключается в анализе потока мюонов, генерируемых первичным космическим излучением с энергией $10^9 - 10^{11}$ эВ. Основу эксперимента составляют черенковский водный детектор НЕВОД, система калибровочных телескопов и координатно-трековый детектор ДЕКОР. Дополнительно в состав комплекса также входят установки для регистрации

атмосферных нейтронов ПРИЗМА-32 и УРАН, ливневая установка НЕВОД-ШАЛ и мюонные годоскопы ТЕМП и УРАГАН.

Изначальная цель созданного в 1994 г черенковского водного детектора (ЧВД) НЕВОД (НЕйтринный ВОдный Детектор) заключалась в разработке методики и доказательстве возможности регистрации космических нейтрино на поверхности Земли в условиях высокого фона атмосферных мюонов. Успешная работа этого эксперимента уже в период 1995 — 1996 гг позволила выполнить поставленную задачу и надежно выделить 2 нейтринных события с энергией более 2 ГэВ [101]. Сегодня ЧВД НЕВОД используется в качестве калориметра для измерения энерговыделения групп мюонов, стволов ШАЛ и каскадов частиц, генерируемых одиночными мюонами (см. рисунок 1.4). Установка представляет собой резервуар размером $9 \cdot 26 \cdot 9 \text{ м}^3$ заполненный дистиллированной водой. Внутри водного объема располагается решетка из 91 квазисферического оптического модуля на основе фотоэлектронных умножителей ФЭУ-200. Модули объединены в вертикальные гирлянды по 3 или 4 единицы с пространственным шагом 2 м. Расстояние между соседними гирляндами составляет 2.5 м вдоль и 2 м поперек бассейна. Для калибровки ЧВД НЕВОД используется система телескопов (СКТ) из 80 сцинтилляционных счетчиков, сгруппированных в двух горизонтальных плоскостях над резервуаром и его дне. Счетчики размещены между гирляндами на площади $8 \cdot 10 \text{ м}^2$ с шагом 1.25 м вдоль и 1 м поперек бассейна. Любая пара детекторов из верхней и нижней плоскостей формирует мюонный телескоп. Всего существует 1600 траекторий с 40 различными зенитными углами прихода частиц. Пороговая энергия для вертикальных мюонов составляет 2 ГэВ, угловое разрешение СКТ — не менее 2° . Помимо задачи калибровки сцинтилляционные счетчики с 2013 г также используются для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ в диапазоне энергий КЛ $10^{14} - 10^{18}$ эВ. Координатно-трековый детектор ДЕКОР располагается во внешних галереях бассейна и совместно с ЧВД НЕВОД предназначен для исследования КЛ в области энергий $10^{15} - 10^{19}$ эВ, приходящих под большими зенитными углами (вплоть до горизонтальных направлений). Детектор ДЕКОР представляет собой 8 вертикально расположенных супермодулей общей площадью $\sim 70 \text{ м}^2$, каждый из которых включает в себя 8 слоев стримерных камер. Угловое и пространственное разрешение установки $\sim 1^\circ$ и 1 см соответственно.

Установка для регистрации тепловых нейтронов ПРИЗМА-32 (Прототип установки для Измерения Атмосферных нейтронов) была введена в эксплу-

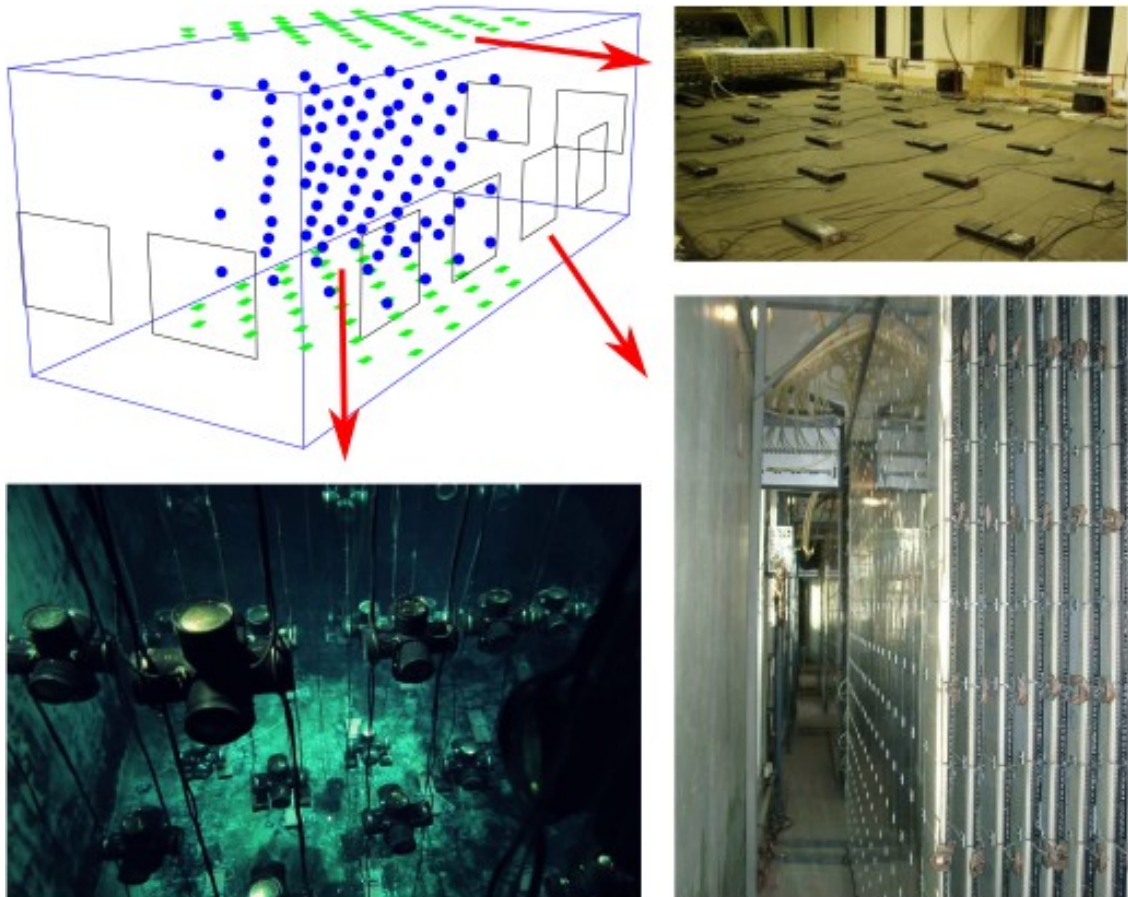


Рисунок 1.4 — Схематичное расположение и изображение детекторов ЧВД НЕВОД, координатно-трекового детектора ДЕКОР и системы калибровочных телескопов (СКТ). Синие кружки — оптические модули ЧВД НЕВОД, черные квадраты — супермодули установки ДЕКОР, зеленые прямоугольники — сцинтилляционные счетчики СКТ.

атацию в 2013 г. Основной целью исследований этого эксперимента является изучение КЛ в диапазоне энергий 10^{14} — 10^{16} эВ. Установка содержит 32 эн-детектора, объединенных в 2 кластера и размещенных на площади ~ 500 м² внутри здания экспериментального комплекса НЕВОД. Эн-детектор позволяет регистрировать не только нейтроны, возникающие при взаимодействии высокоэнергетических адронов ШАЛ с ядрами атомов атмосферы и земной поверхности, но и заряженные частицы ШАЛ. Детектор представляет собой светоотражающий кожух в форме конуса, внутри которого находится специализированный тонкий неорганический сцинтиллятор площадью 0.36 м² и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-200. Вся конструкция дополнительно помещена в светонепроницаемую промышленную полиэтиленовую бочку объемом

200 л. Установка УРАН (Установка для Регистрации Атмосферных Нейтронов) была создана в 2016 г, является последующим развитием установки ПРИЗМА-32 и предназначена для изучения КЛ в области энергий $10^{13} - 10^{16}$ эВ. В ее состав входят 72 аналогичных эн-детектора, расположенных на крышах экспериментального комплекса НЕВОД и соседнего здания. Общая площадь установки $\sim 10^3$ м².

Для повышения точности измерений параметров КЛ в диапазоне энергий $10^{15} - 10^{17}$ эВ в состав комплекса НЕВОД в 2018 г была введена установка НЕВОД-ШАЛ. В этом случае применяется классический подход к изучению КЛ методом регистрации электрон-фотонной компоненты ШАЛ. Установка представляет собой 9 независимо работающих кластеров, размещенных на крышах корпусов университета и на поверхности Земли. Перепад высот при этом достигает 20 м, а общая площадь установки $\sim 10^4$ м². Отдельно взятый кластер включает в себя 4 станции, каждая из которых, в свою очередь, содержит 4 сцинтилляционных счетчика. Расстояние между станциями одного кластера находится в пределах 15 — 20 м.

Годоскоп ТЕМП был создан в 1995 г для исследования атмосферных мюонов. Установка представляет собой 2 пары координатных плоскостей площадью 9 м² разнесенных по вертикали на расстояние 1 м. Каждая плоскость включает в себя 128 сцинтилляционных счетчиков размером $2.5 \cdot 1 \cdot 300$ см³, что обеспечивает угловое разрешение $\sim 2^\circ$. Годоскоп УРАГАН (Установка для РАСпознавания Грозových АНОмалий) был введен в эксплуатацию в 2005 г для решения задач в области мониторинга и прогнозирования состояния околоземного пространства. В настоящее время УРАГАН состоит из четырех супермодулей площадью 11.5 м², расположенных на крышке водного резервуара. Каждый супермодуль состоит из восьми слоев газоразрядных камер, разделенных пластинами пенопласта толщиной 5 см.

На данный момент среди главных результатов экспериментального комплекса НЕВОД в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ [102] можно выделить следующие: обнаружение излома в спектре КЛ вблизи энергии 10^{17} эВ и открытие избытка мюонов в ШАЛ по сравнению с теоретическими предсказаниями при энергии первичных частиц выше 10^{17} эВ. Последний результат был подтвержден многими экспериментами и до сих пор не имеет однозначного объяснения.

1.2.2 Тянь-Шаньская высокогорная станция

Экспериментальный комплекс Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН) [73; 103] предназначен для исследований в области астрофизики, физики КЛ, геофизики и атмосферной физики высоких энергий. Комплекс располагается на высоте 3340 м н.у.м. в горах Заилийского Алатау (северный высокогорный хребет Тянь-Шаня), в 43 км от г. Алматы, Казахстан. Основу высокогорной станции составляют два пункта (CENTER и CENTER II), внутри и вблизи которых располагаются детекторы для регистрации ШАЛ в диапазоне энергий КЛ $10^{14} - 10^{18}$ эВ (см. рисунок 1.5).

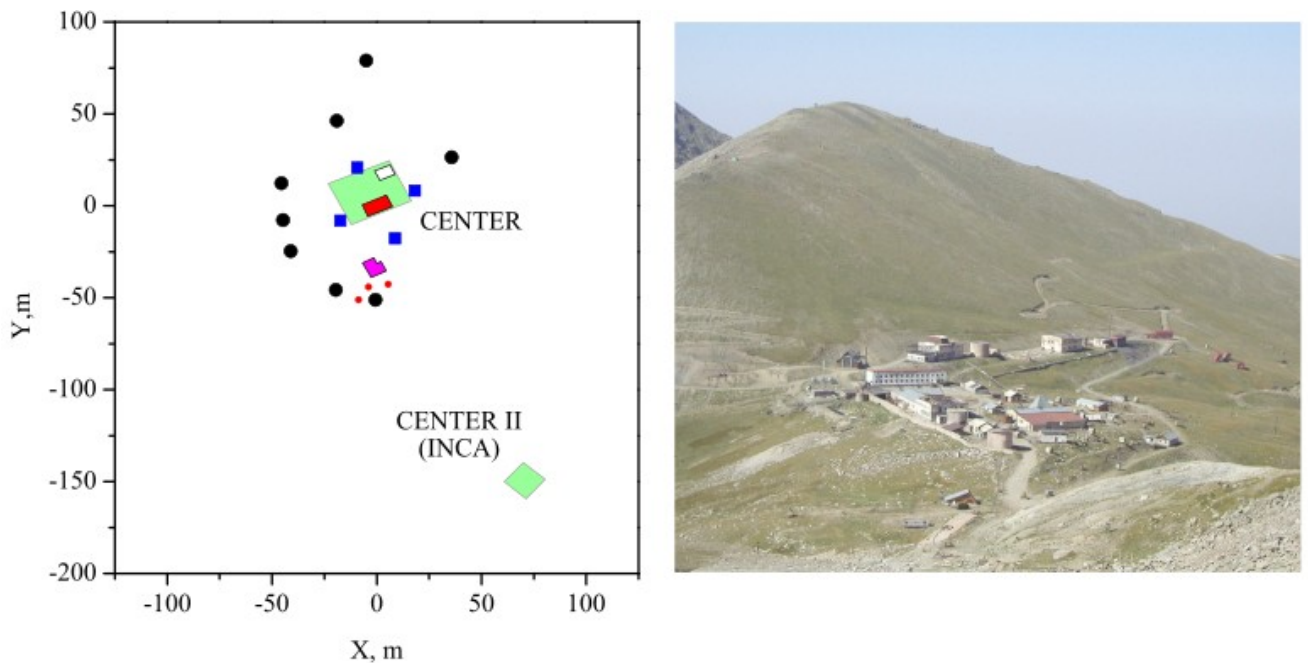


Рисунок 1.5 — Схематичное расположение детекторов ШАЛ (слева) и изображение Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН (справа). Зеленые квадраты — области с плотным расположением детекторов (CENTER и CENTER II) и ионизационно-нейтронный калориметр INCA, черные кружки — периферийные детекторы, синие квадраты — детекторы для определения углов прихода оси ШАЛ, розовый многоугольник — нейтронный супермонитор NM64, белый прямоугольник — нейтронные и гамма-детекторы, красный прямоугольник — комплекс подземных детекторов, красные точки — антенны.

В пунктах CENTER и CENTER II для регистрации электрон-фотонной компоненты ШАЛ на площади $\sim 10^3$ м² размещаются 72 и 36 сцинтилляцион-

ных счетчика на основе пластикового сцинтиллятора размером $0.5 \cdot 0.5 \cdot 0.05 \text{ м}^3$, металлического кожуха в виде усеченной пирамиды и ФЭУ (ФЭУ-49, ФЭУ-52, ФЭУ-82 или ФЭУ-110). Для определения углов прихода оси ШАЛ вблизи пункта CENTER используются счетчики, каждый из которых состоит из двух слоев пластикового сцинтиллятора размером $1 \cdot 1 \cdot 0.05 \text{ м}^3$, металлического кожуха, переизлучателей и ФЭУ. Система дополнительных периферийных сцинтилляционных детекторов размещается в диапазоне расстояний 20 — 200 м вокруг пунктов CENTER и CENTER II и также предназначены для регистрации электрон-фотонной компоненты ШАЛ. Задачей нейтронного супермонитора NM64 и ионизационно-нейтронного калориметра INCA площадью 18 м^2 и 56 м^2 является изучение адронной компоненты ШАЛ с пространственным разрешением $\sim 20 - 30 \text{ см}$. Помимо этого экспериментальный комплекс для исследования КЛ также включает в себя системы нейтронных и гамма-детекторов с низким энергетическим порогом регистрации, детекторы мюонной компоненты ШАЛ, радиоантенны, работающие в частотном диапазоне 30 — 300 МГц, и установку Horizon-10T. Последняя состоит из 10 пунктов, разнесенных на расстояния друг относительно друга в интервале от $\sim 100 \text{ м}$ до 1.3 км, и позволяет регистрировать ШАЛ в диапазоне энергий КЛ $10^{16} - 10^{18} \text{ эВ}$ и в интервале зенитных углов $0 - 80^\circ$ [104].

Многолетние исследования на Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН привели к обнаружению необычных эффектов, связанных с моделями развития ШАЛ и физики КЛ в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18} \text{ эВ}$. Так, дано указание на возможное наличие в составе КЛ при энергии выше $3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$ гипотетических частиц странной кварковой материи [105]. Также при помощи установки Horizon-10T обнаружены ШАЛ с несколькими фронтами, отстоящими друг от друга на сотни нс. Такая многокомпонентная временная структура наблюдаются в ливнях при энергии КЛ выше 10^{17} эВ и может свидетельствовать о нестандартном механизме развития ядерно-электромагнитного каскада [106].

1.2.3 TAIGA

История создания экспериментального комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [107] берет свое начало в 1992 г. В это время на льду озера Байкал в рамках Байкальского нейтринного проекта [108] были проведены первые эксперименты по регистрации черенковско́го света ШАЛ четырьмя гибридными фотоприемниками КВАЗАР-370 [109; 110]. Через год детекторы на основе уже модифицированных фотоприемников КВАЗАР-370G были перевезены в Тункинскую долину ($51^{\circ}48'35''$ N, $103^{\circ}04'02''$ E, 675 м н.у.м.) с целью создания широкоугольной черенковской установки для изучения КЛ, впоследствии получившей название Тунка-4 [111]. Успешная работа этого относительно маленького и простого эксперимента привела к тому, что в 1996—1999 гг была развернута промежуточная черенковская установка Тунка-13, а в 2000—2005 гг на площади ~ 0.1 км² — полноценная установка Тунка-25 [69]. Благодаря работе последней были получены важные результаты как по методике восстановления параметров ШАЛ, так и по энергетическому спектру КЛ в интервале энергий $\sim 10^{15}$ — 10^{17} эВ. Следующим этапом является ввод в эксплуатацию в 2009 г широкоугольной черенковской установки Тунка-133 [37] для исследования КЛ в области энергий 10^{16} — 10^{18} эВ. В ее состав входило 133 оптических детектора, сгруппированных в 19 независимых кластеров, и размещенных на площади ~ 1 км². В 2010—2012 гг установка была доукомплектована шестью внешними кластерами и в настоящее время содержит уже 175 оптических детекторов на площади ~ 3 км². Каждый кластер включает в себя 7 детекторов, один из которых находится в центре, а остальные 6 располагаются в вершинах правильного шестиугольника на расстоянии ~ 80 м от центрального. При этом условие выработки локального триггера заключается в срабатывании не менее трех детекторов, принадлежащих одному кластеру, во временном окне 500 нс. Оптический детектор представляет собой металлический кожух в виде цилиндра высотой 60 см и диаметром 50 см. Внутри кожуха располагается ФЭУ ЕМ1 9350 или Hamamatsu R1408 и блок электроники. Входное окно направлено вертикально вверх и закрыто прозрачным подогреваемым органическим стеклом. Защита от солнечного света и атмосферных осадков осуществляется при помощи дистанционно управляемой крышки.

Для повышения информативности получаемых данных в 2012 г в дополнение к установке Тунка-133 было начато развертывание радиоустановки Tunka-Rex (Tunka Radio EXtension) [112], а в 2013 г — сцинтилляционной установки Tunka-Grande [56; 63; 64]. Регистрация радиоизлучения ШАЛ в частотном диапазоне 30 — 80 МГц при помощи установки Tunka-Rex производилась с 2012 по 2019 гг. В этот период времени установка состояла из 63 антенн, размещенных на площади ~ 3 км². Установка Tunka-Grande создавалась для регистрации заряженной компоненты ШАЛ и на сегодняшний день представляет собой массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций и размещенных на площади ~ 0.5 км². Каждая станция состоит из двух частей: наземной и подземной. Первая включает в себя 12 счетчиков с общей площадью 7.68 м² и регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне наблюдения, вторая содержит 8 счетчиков общей площадью 5.12 м², расположена под слоем грунта 1.5 м и нацелена на выделение мюонной компоненты ШАЛ. Пороговая энергия для вертикальных мюонов составляет ~ 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. На рисунке 1.6 приведено схематичное расположение установок Тунка-133, Tunka-Grande и Tunka-Rex, на рисунке 1.7 — изображение детекторов.

Создание гамма-обсерватории TAIGA было начато в 2012 г для решения фундаментальных задач физики КЛ и гамма-астрономии, таких как:

1. Исследование высокоэнергетического края спектра известных локальных галактических и внегалактических источников гамма-квантов с энергией выше $3 \cdot 10^{13}$ эВ.
2. Поиск астрофизических объектов, ускоряющих галактические КЛ до энергий выше 10^{15} эВ.
3. Поиск новых внегалактических источников гамма-излучения.
4. Поиск диффузного гамма-излучения в области энергий $10^{14} - 10^{18}$ эВ.
5. Изучение энергетического спектра и массового состава КЛ в энергетическом диапазоне $10^{14} - 10^{18}$ эВ.

В настоящее время гамма-обсерватории TAIGA включает в себя: 120 оптических станций широкоугольной черенковской установки TAIGA-HiSCORE, 3 атмосферных черенковских телескопов установки TAIGA-IACT и 3 кластера сцинтилляционной установки TAIGA-Muon. На рисунке 1.8 представлено

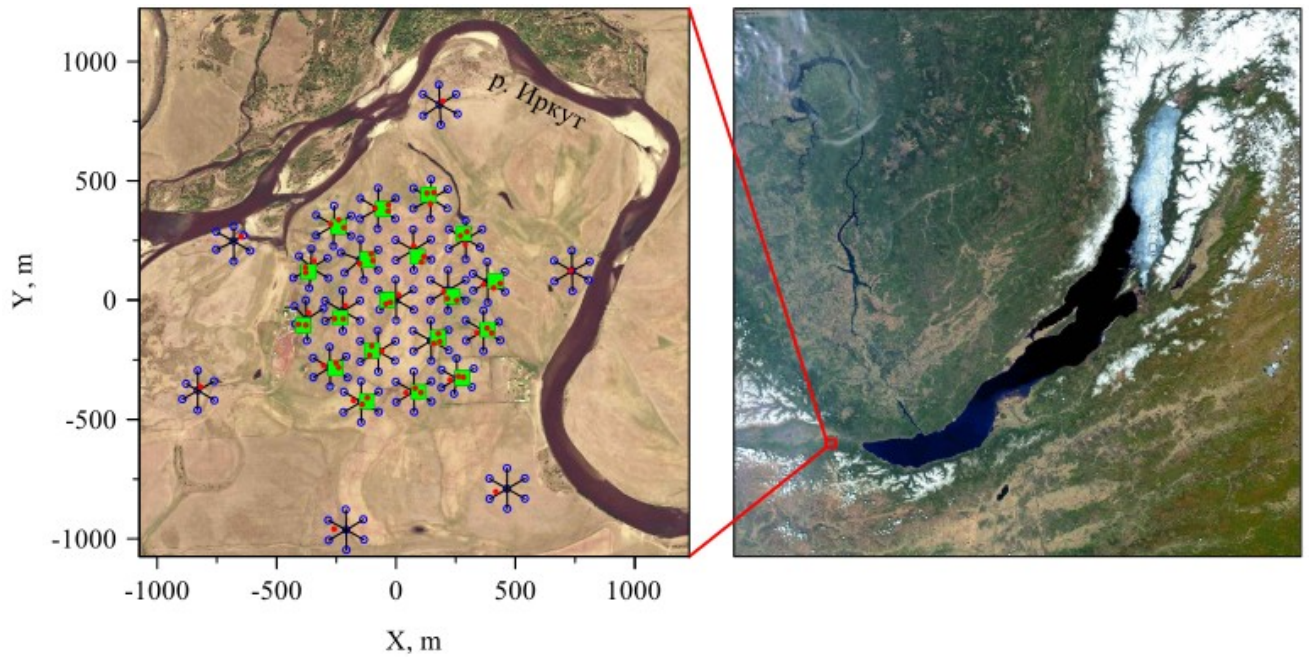


Рисунок 1.6 — Схематичное расположение установок Тунка-133, Tunka-Grande и Tunka-Rex. Синие кольца — оптические детекторы установки Тунка-133, зеленые прямоугольники — станции установки Tunka-Grande, красные точки — антенны установки Tunka-Rex, черными линиями выделены 25 кластеров установки Тунка-133.

схематичное расположение гамма-обсерватории TAIGA, на рисунке 1.9 — изображение детекторов.

Оптические станции установки TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) [113] сгруппированы в 4 кластера и размещены в узлах решетки со стороной 106 м на площади $\sim 1 \text{ км}^2$. На рисунке 1.8 принадлежность станции к тому или иному кластеру обозначена цветом. Станция представляет собой металлический контейнер в форме куба, внутри которого располагаются 4 ФЭУ EMI ET9352KB, Hamamatsu R5912 или Hamamatsu R7081, оборудованные конусом Винстона. Как и в случае установки Тунка-133 входное окно станции закрыто прозрачным подогреваемым органическим стеклом. Защита от солнечного света и атмосферных осадков осуществляется при помощи дистанционно управляемой крышки.

Атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) [114] расположены на расстоянии 300—500 м друг относительно друга. Каждый телескоп состоит из сегментированного зеркала дизайна Дэвиса-Коттона и расположенной в его фокусе детектиру-



Рисунок 1.7 — Внешний вид оптического детектора установки Тунка-133 (слева), антенны установки Tunka-Rex (справа сверху) и станции установки Tunka-Grande (справа снизу).

ющей камеры. Зеркало содержит 34 сегмента с общей площадью $\sim 10 \text{ м}^2$, фокусное расстояние составляет 4.75 м. Камера включает в себя матрицу из ~ 600 оснащенных конусами Винстона ФЭУ ХР1911 и регистрирует изображение черенковского излучения ШАЛ. Поле зрения камеры по вертикальному и горизонтальному углам составляет $\sim 10^\circ$. Каждый телескоп оснащен поворотным механизмом, позволяющим менять положение главной оптической оси по углу места в пределах от 0° до 90° , по азимутальному углу — от 0° до 360° . Планируется, что общее количество телескопов будет увеличено до 5 единиц.

Каждый кластер установки TAIGA-Muon [60; 115] имеет в своем составе 8 наземных сцинтилляционных счетчиков для регистрации всех заряженных частиц ШАЛ на уровне установки и 8 подземных для регистрации мюонной компоненты. При этом счетчики геометрически расположены парами: наземные строго над подземными. Все 8 пар размещены по периметру квадрата со стороной 5 м. Расстояние между соседним парами составляет 1 м. Необходимо отметить, что конструкция кластера не предусматривает прямого доступа к подземной части, толщина грунта над которой ~ 1.7 м. Каждый счетчик состоит из нержавеющей стальной кожуха, внутри которого располагаются пластиковые сцинтилляционные пластины переменной толщины 10 — 20 мм, преизлучатели и ФЭУ-85-4. Увеличение толщины сцинтилляционных пластин

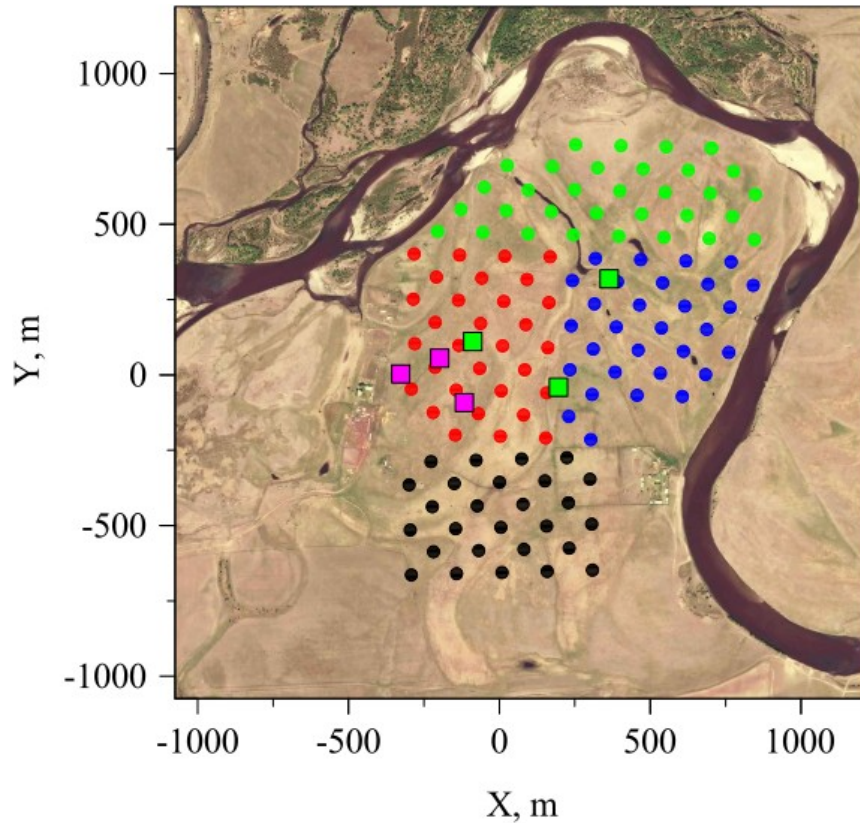


Рисунок 1.8 — Схематичное расположение детекторов гамма-обсерватории TAIGA. Красные, черные, синие и зеленые кружки — оптические станции установки TAIGA-HiSCORE, зеленые квадраты — атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT, розовые квадраты — кластеры установки TAIGA-Muon.

к периферии счетчиков обеспечивает приемлемую однородность по амплитуде сигнала по всей площади сцинтиллятора [116]. Общая площадь счетчика $\sim 1 \text{ м}^2$. Расстояние между кластерами лежит в пределах $\sim 150 - 250 \text{ м}$. Первая очередь строительства установки TAIGA-Muon предполагает наличие 10 кластеров.

Главные научные достижения экспериментального комплекса TAIGA в исследовании КЛ связаны с установками Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE. В рекордно широком диапазоне энергий ($\sim 10^{14} - 10^{18} \text{ эВ}$) измерен энергетический спектр и определен массовый состав КЛ. Обнаружено наличие изломов в спектре при энергии $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$, $2 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} эВ [39]. Показано утяжеление состава за областью $5 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$ и продемонстрирован рост доли легких элементов при энергии свыше $3 \cdot 10^{16} \text{ эВ}$ [117].



Рисунок 1.9 — Изображение атмосферного черенковского телескопа установки TAIGA-IACT (сверху слева), кластера установки TAIGA-Muon (сверху справа) и оптических станций установки TAIGA-HiSCORE (снизу).

1.2.4 IceTop

Установка IceTop [79] предназначена для регистрации электрон-фотонной компоненты ШАЛ, является поверхностной частью нейтринной обсерватории IceCube [118] и располагается вблизи географического южного полюса на высоте 2835 м н.у.м. Установка состоит из 162 цилиндрических баков высотой 130 см и диаметром 182 см, заполненных льдом и объединенных в 81 станцию на площади $\sim 1 \text{ км}^2$ (см. рисунок 1.10). Расстояние между баками в станции составляет $\sim 10 \text{ м}$, между станциями $\sim 125 \text{ м}$. В центральной части станции размещены более плотно. В данной конфигурации наблюдения проводятся с 2011 г. В качестве основного детектирующего устройства установки IceTop и телескопа IceCube используется оптический модуль, который регистрирует черенковское излучение и представляет собой стеклянную сферу диаметром 33 см. Внутри

сферы размещаются ФЭУ Hamamatsu R7081-02 и блок электроники. Каждый бак содержит 2 модуля, частично погруженных в лед и работающих с разным коэффициентом усиления для обеспечения необходимого динамического диапазона. На установке существует 2 условия выработки локального триггера: первое используется для регистрации первичного космического излучения в диапазоне энергий $\sim 10^{15} - 10^{18}$ эВ и заключается в одновременном срабатывании более четырех станций. Второе позволяет изучать события вплоть до энергии $2.5 \cdot 10^{14}$ эВ и состоит в детектировании ШАЛ не менее двумя станциями центральной части. Временное окно совпадения для первого и второго случая составляет 5 мкс и 200 нс соответственно. В рамках проекта IceCube-Gen2 [119] для повышения информативности получаемых данных в диапазоне энергий $\sim 10^{14} - 10^{18}$ эВ планируется дополнить установку IceTop массивами радиоантенн и сцинтилляционных счетчиков.

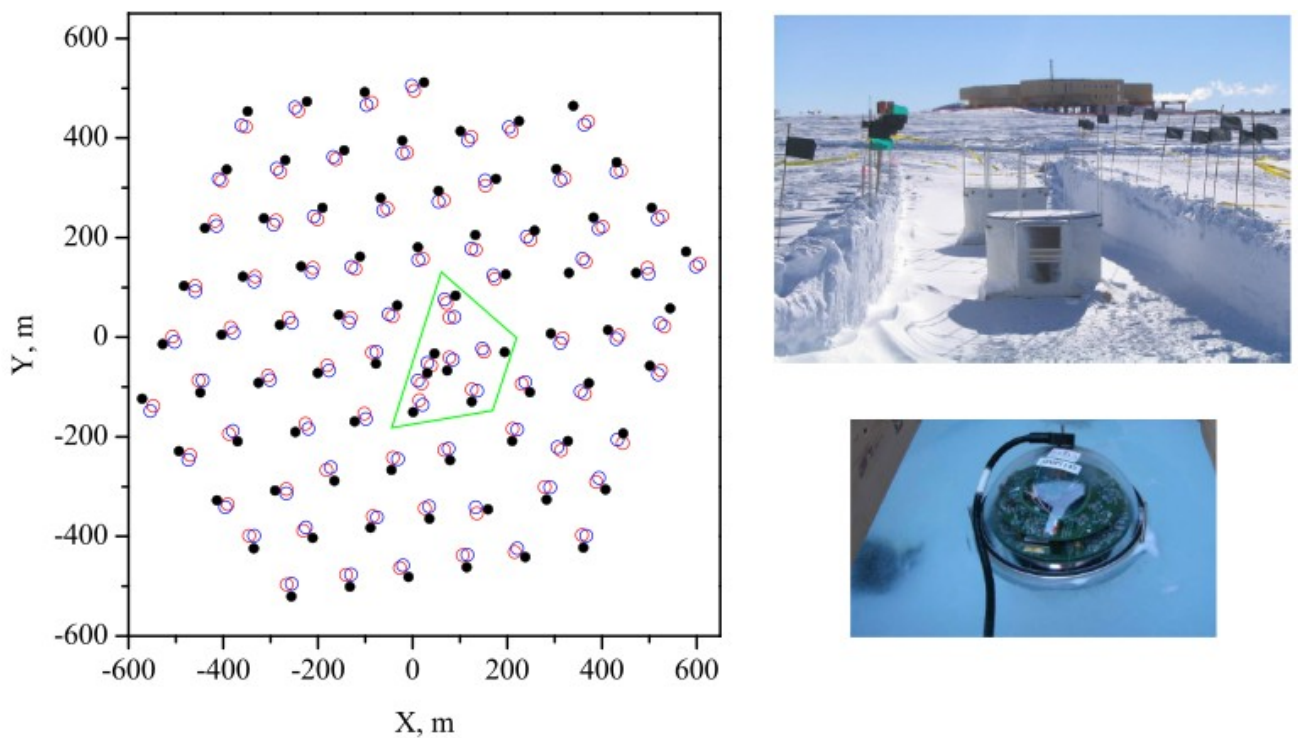


Рисунок 1.10 — Схематичное расположение установки IceTop и стрингов телескопа IceCube (слева), внешний вид станции (справа сверху) и оптического модуля (справа снизу) установки IceTop. Синие и красные кольца — баки, черные кружки — стринги, зелеными линиями выделена плотная центральная часть установки IceTop.

В настоящее время при помощи установки IceTop восстановлен энергетический спектр КЛ в диапазоне $\sim 3 \cdot 10^{15} - 10^{18}$ эВ. В спектре наблюдаются изломы при энергиях $\sim 5 \cdot 10^{15}$ эВ, $2 \cdot 10^{16}$ эВ и 10^{17} эВ [120]. Дополнительно представлен результат по данным центральной части в интервале энергий $\sim 2.5 \cdot 10^{14} - 10^{16}$ эВ [121]. Также показано, что массовый состав КЛ в области энергии выше $5 \cdot 10^{15}$ эВ утяжеляется вследствие уменьшения доли легких элементов и затем при энергии $2 \cdot 10^{17}$ эВ происходит излом в спектре тяжелых компонент [120].

1.2.5 Telescope Array

Установка Telescope Array (ТА) [85] является самым большим экспериментом по исследованию КЛ в северном полушарии и располагается рядом с городом Дельта, штат Юта, США, на высоте 1400 м н.у.м. С 2008 г установка проводит измерения в области энергии выше 10^{18} эВ и включает в себя 507 наземных детекторов [122], размещенных в узлах квадратной решетки со стороной 1200 м на площади 700 км². Также в состав Telescope Array входят 38 флуоресцентных детекторов [123], сгруппированных в 3 станции — Middle Drum, Black Rock Mesa и Long Ridge. В 2012 г для исследования предполагаемой области перехода от галактических к внегалактическим КЛ было начато развертывание новой установки TALE (Telescope Array Low Energy extension) [124], которая в настоящее время включает в себя 10 флуоресцентных и 80 наземных детекторов. Первые объединены в одну станцию, которая находится рядом со станцией Middle Drum и с 2013 г регистрирует черенковское и флуоресцентное излучение ШАЛ при энергии первичных частиц в интервале $\sim 2 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{18}$ эВ. Наземные детекторы размещаются на площади ~ 40 км², предназначены для детектирования заряженной компоненты ШАЛ в области энергий выше 10^{17} эВ и в полном объеме были запущены в 2018 г. При этом территориально они разбиты на 2 зоны и расстояние между ними составляет 400 м и 600 м в зависимости от принадлежности к той или иной области (см. рисунок 1.11). В будущем планируется доукомплектовать установку TALE 23 наземными детекторами, которые будут формировать третью зону, расположенную между установками TALE и Telescope Array, с расстоянием между детекторами ~ 1200 м. Также в рамках расширения установки TALE вблизи флуоресцентной станции будут

развернуты дополнительные 54 наземных детектора на дистанции 100 м и 200 м друг относительно друга [125]. Помимо этого, с 2017 г. ведется создание черенковской установки NICHE (Non-Imaging Cherenkov Array) [126]. Все указанные расширения нацелены на детальное изучение области энергии $10^{15} - 10^{18}$ эВ.

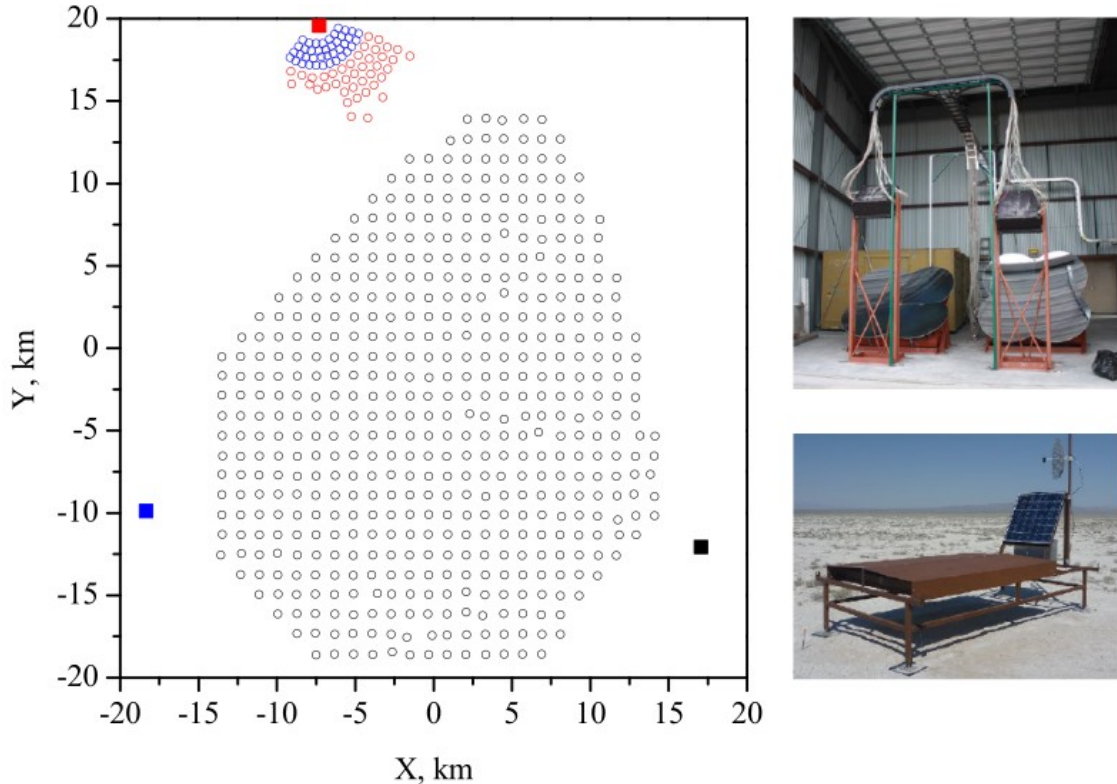


Рисунок 1.11 — Схематичное расположение установок Telescope Array и TALE (слева), изображение флуоресцентных (справа сверху) и наземных детекторов (справа снизу) установки TALE. Синие и красные кольца — наземные детекторы установки TALE, черные кольца — наземные детекторы установки Telescope Array, черный и синий квадраты — станции Black Rock Messa и Long Ridge соответственно, красный квадрат — станция Middle Drum и флуоресцентная станция установки TALE.

Флуоресцентные детекторы установки TALE собраны из зеркал, камер и электроники детектора HiRes-II [127]. Каждое зеркало площадью ~ 3.7 м² состоит из четырех сегментов. В фокусе размещена камера из 256 пикселей, представляющих собой ФЭУ Photonis XP3062. Поле зрения станции по горизонтали составляет $\sim 110^\circ$, по углу места лежит в интервале от 31° до 59° . Условие регистрации события заключается в одновременной срабатывании не менее пяти пикселей. Наземные детекторы установки TALE работают автономно и имеют ту же базовую конструкцию, что и наземные детекторы

установки Telescope Array. Детектор включает в себя антенны связи и GPS (Global Positioning System), солнечную батарею, аккумулятор, блок электроники и сцинтилляционный счетчик, расположенный в металлической контейнере. Счетчик состоит из двух слоев пластикового сцинтиллятора, каждый из которых имеет площадь 3 м^2 и толщину 1.2 см. Между слоями находится пластина из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Верхний и нижний слои состоят из двух сегментов размером $1.5 \cdot 1 \text{ м}^2$. Сцинтилляционный свет с помощью переизлучателей собирается на ФЭУ Electron Tubes 9124SA или Hamamatsu R8619. Выработка локального триггера происходит при срабатывании пяти и более станций во временном окне 8 мс.

На данный момент времени результаты работы установки TALE главным образом связаны с наблюдениями флуоресцентных детекторов. Так с их помощью обнаружены изломы в энергетическом спектре КЛ при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ, $2 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} эВ [128]. В отношении массового состава дано указание на преобладание доли протонов в области до $\sim 10^{16}$ эВ. Также показано, что за границей этой области становится заметным вклад гелия, а еще выше по энергии — значительное влияние ядер группы CNO и железа. Доля протонов в общем потоке первичного излучения вновь становится доминирующей при энергии $\sim 7 \cdot 10^{17}$ эВ [129].

1.2.6 Pierre Auger Observatory

Установка Pierre Auger Observatory (PAO) [86] — крупнейший в мире эксперимент по изучению КЛ, расположенный на равнине Пампа Амарилла, недалеко от города Маларгуэ, провинция Мендоса, Аргентина на высоте 1340 — 1610 м н.у.м. Строительство базовой части установки было завершено в 2008 г, и сейчас она состоит из ~ 1600 наземных детекторов, размещенных в узлах треугольной решетки со стороной 1500 м на площади $\sim 3000 \text{ км}^2$ и предназначенных для регистрации заряженной компоненты ШАЛ. Также в состав обсерватории входят 24 флуоресцентных детектора [130], сгруппированных в 4 станции — Los Leones, Coihueco, Loma Amarilla и Los Morados. В данной конфигурации установка ведет исследования в области энергий свыше 10^{18} эВ. Для понижения энергетического порога регистрации рядом со станцией Coihueco

дополнительно развернуты радиоантенны, наземные и флуоресцентные детекторы. Последние объединены в одну станцию HEAT (High Elevation Auger Telescopes), расположенную на расстоянии 180 м от станции Coihueco. С 2009 г станция HEAT регистрирует черенковское и флуоресцентное излучение ШАЛ при энергии первичных частиц свыше $6 \cdot 10^{15}$ эВ. Наземные детекторы с 2012 и 2019 гг формируют 2 массива на площади ~ 23.5 км²: SD-750 и SD-433 соответственно. В первом случае расстояние между детекторами составляет 750 м, что позволяет изучать КЛ в области энергий выше $\sim 10^{17}$ эВ, во втором — 433 м и это обеспечивает порог регистрации $\sim 10^{16}$ эВ [131]. 150 радиоантенн установки AERA (Auger Engineering Radio Array) [132; 133] были полностью установлены в 2015 г на площади ~ 17 км², на расстояниях 144 м, 250 м, 375 м и 750 м друг относительно друга и предназначены для изучения энергетического спектра и массового состава первичного излучения в интервале энергии $\sim 10^{17} - 10^{18}$ эВ. На рисунке 1.12 представлено схематичное расположение установки Pierre Auger Observatory, на рисунке 1.13 — изображение наземного детектора, радиоантенны и станций Coihueco и HEAT. В 2015 г началась широкомасштабная модернизация установки Pierre Auger Observatory под названием AugerPrime [134]. В ее рамках ведутся работы по развертыванию мюонных детекторов установки AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array) [135] и оснащению всех наземных детекторов сцинтилляционными счетчиками и радиоантеннами. На рисунке 1.12 зеленым многоугольником выделена область планируемого размещения мюонных детекторов.

Флуоресцентные детекторы станций Los Leones, Coihueco, Loma Amarilla и Los Morados состоят из диафрагмы, фильтра, коррекционного кольца, зеркала, камеры и блока электроники. Флуоресцентное излучение приходит на детектор и проходит через круглую диафрагму радиусом 1.1 м и фильтр, который пропускает ультрафиолетовое излучение в интервале 290 — 410 нм. Коррекционное кольцо частично исправляет сферическую и устраняет коматическую абберации, состоит из 24 сегментов, имеет внутренний и внешний радиус 85 см и 110 см соответственно. Далее флуоресцентный свет собирается сферическим зеркалом с радиусом кривизны 340 см на сферическую фокальную поверхность с радиусом 170 см. Зеркало имеет площадь 13 м² и конструктивно выполнено в двух конфигурациях: на одной половине детекторов используется 36 прямоугольных, на другой — 60 гексагональных сегментов. Камера состоит из 440 ФЭУ Photonis XR3062. Поле зрения станций составляет 30° по углу места и 180° по горизон-

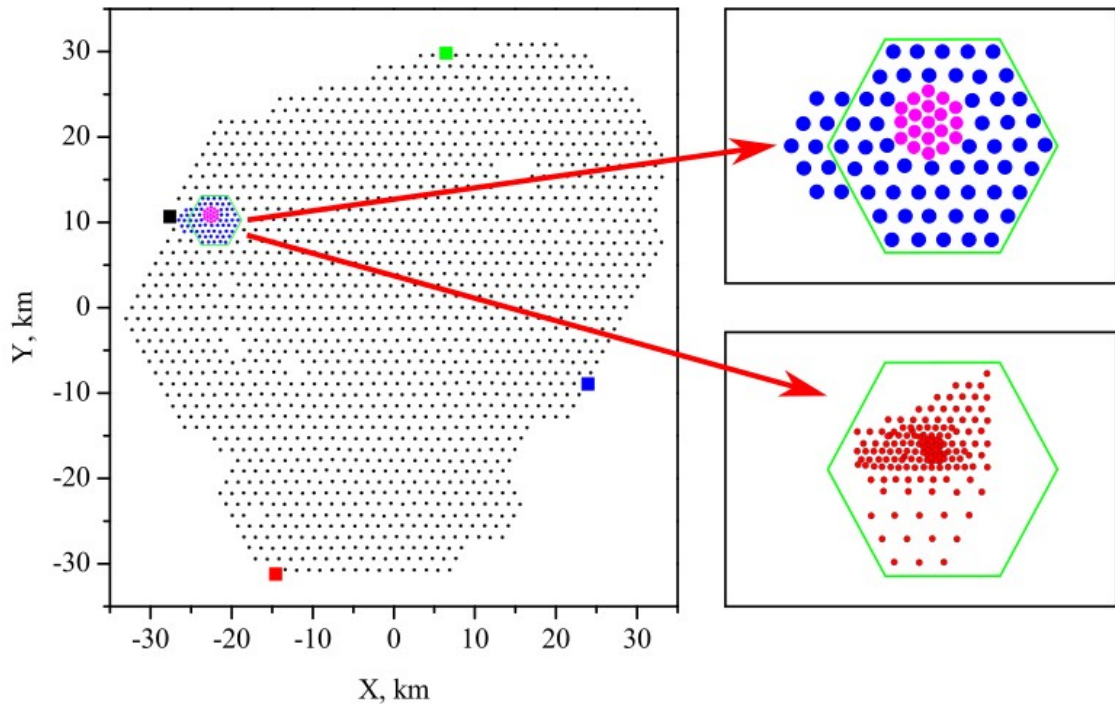


Рисунок 1.12 — Схематическое расположение установки Pierre Auger Observatory. Черные точки — наземные детекторы базовой части, зеленый, синий и красный квадраты — станции Loma Amarilla, Los Morados и Los Leones соответственно, черный квадрат — станции Coihueco и HEAT, синие и розовые кружки — наземные детекторы массивов SD-750 и SD-433, красные кружки — радиоантенны.

тали. Детекторы станции HEAT полностью аналогичны детекторам станций Los Leones, Coihueco, Loma Amarilla и Los Morados. Различие заключается в конструкциях самих станций. Три детектора станции HEAT располагаются в отдельных боксах поверх гидравлической системы, с помощью которой возможно изменение поля зрения станции по углу места. Наблюдения при этом могут проводиться в двух режимах. В первом случае поле зрения по углу места составляет 30° , во втором — лежит в пределах от 30° до 60° . Условием выработки локального триггера является срабатывание не менее 5 ФЭУ в камере. Каждый наземный детектор представляет собой цилиндрический бак высотой 1.5 м и диаметром 3.6 м, в котором находятся ~ 12.000 литров чистой воды и 3 ФЭУ Photonis XP1805/D1. Детекторы полностью автономны и включают в себя антенны связи и GPS, солнечную батарею, аккумуляторы и блок электроники. Запись событий осуществляется при срабатывании более двух детекторов. В установке AERA используются радиоантенны, детектирующие радиоизлучение ШАЛ в частотном диапазоне 30 — 80 МГц. Электроника установки позволяет

работать в режимах локального и внешнего триггера. Сигналы последнего поступают от станции HEAT и наземных детекторов.



Рисунок 1.13 — Изображение наземного детектора, радиоантенны и станций Coihueco и HEAT.

Результаты работы установки Pierre Auger Observatory в области предполагаемого перехода от галактическим к внегалактическим КЛ в настоящий момент связаны с наблюдениями станции HEAT и массива наземных детекторов SD-750. С помощью этих инструментов восстановлен энергетический спектр в интервале $3 \cdot 10^{16} - 10^{19}$ эВ и обнаружен излом при энергии $\sim 10^{17}$ эВ [136; 137]. Массовый состав определен с помощью флуоресцентных детекторов только для энергий свыше $\sim 2 \cdot 10^{17}$ эВ. При этом показано доминирование легких элементов в области вплоть до $\sim 2 \cdot 10^{18}$ эВ [138]. Так же в диапазоне $\sim 10^{17} - 10^{20}$ эВ поставлен верхний предел на поток диффузного гамма-излучения [139].

1.2.7 LHAASO

Эксперимент LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) [140] представляет собой масштабный комплекс для изучения энергетического спектра, массового состава и анизотропии КЛ в диапазоне энергий $10^{12} - 10^{18}$ эВ, а также поиска и исследования потока гамма-квантов и их источников в интервале $10^{11} - 10^{15}$ эВ. Развертывание установки началось в 2017 г в районе округа Даочэн, провинция Сычуань, КНР ($29^{\circ}21'31''$ N, $100^{\circ}08'15''$ E, 4410 м н.у.м.). Значительная часть детекторов работает с 2019 г. Эксперимент включает в себя три установки: KM2A, WCDA и WFCTA (см. рисунок 1.14).

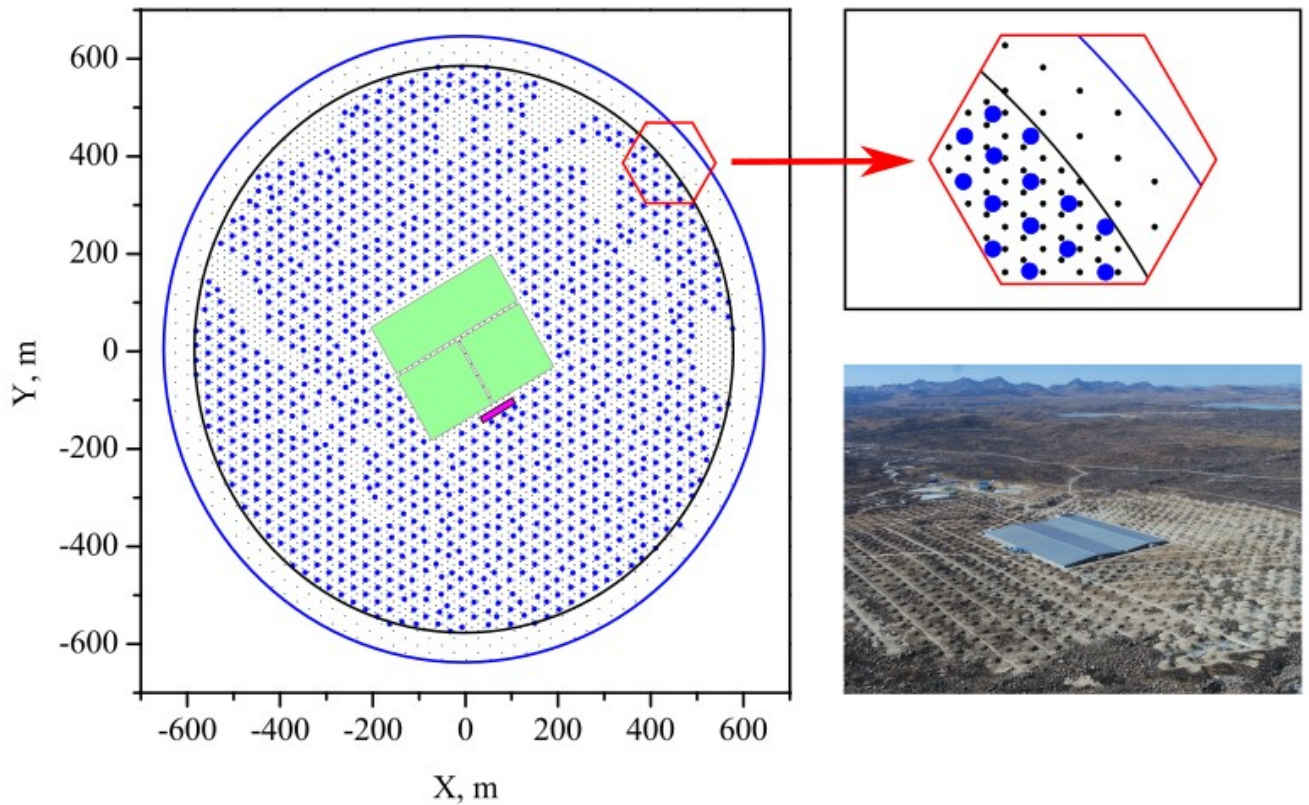


Рисунок 1.14 — Схематичное расположение установки LHAASO и ее изображение на этапе строительства. Черные точки и синие кружки — наземные и подземные детекторы установки KM2A, зеленые прямоугольники — бассейны установки WCDA, розовый прямоугольник — телескопы установки WFSTA. Черный и синие кольца — центральная и периферийная части установки KM2A.

KM2A [141] состоит из 5195 наземных и 1188 подземных детекторов, размещенных на площади 1.3 км^2 и 1 км^2 соответственно. Первые предназначены для регистрации всех заряженных частиц на уровне установки, вторые — для выделения мюонной компоненты ШАЛ. Каждый наземный детектор имеет площадь 1 м^2 и представляет собой стальной кожух в форме прямоугольного параллелепипеда, внутри которого находятся 4 пластмассовых сцинтилляционных пластины размером $100 \cdot 25 \cdot 1 \text{ см}^3$, покрытых свинцовыми плитами толщиной 0.5 см . Сцинтилляционный свет собирается на 1.5 —дюймовый ФЭУ с помощью переизлучателей. Территориально массив KM2A разбит на две части: центральную и периферийную. Центральная часть ограничена кругом радиусом 575 м , периферийная — кольцом с внешним и внутренним радиусами 635 м и 575 м соответственно. При этом детекторы, в зависимости от принадлежности к той или иной области, располагаются в узлах треугольной решетки со стороной 15 м или

30 м. Для регистрации мюонов с энергией свыше 1.3 ГэВ используются цилиндрические баки с внутренним диаметром 6.8 м и высотой 1.2 м, находящиеся под слоем грунта толщиной 2.5 м и наполненные чистой водой. Весь объем бака просматривается одним 8-дюймовым ФЭУ. Мюонные детекторы располагаются также в узлах треугольной решетки со стороной 30 м.

WCDA (Water Cherenkov Detector Array) [142] состоит из 3 бассейнов общей площадью 78.000 м². Бассейны глубиной 4 м заполнены чистой водой и разделены пластиковыми перегородками на ячейки размером 5 м на 5 м. С целью увеличения динамического диапазона в каждой из 3120 ячеек располагаются два ФЭУ.

Массив WFCTA (Wide Field of view Cherenkov Telescope Array) [141] предназначен для регистрации черенковского и флуоресцентного излучения ШАЛ и включает в себя 18 телескопов, каждый из которых состоит из зеркала площадью 4.7 м², камеры на основе кремниевых ФЭУ. Перед камерой дополнительно располагается фильтр, который пропускает излучение в интервале 310 — 550 нм. Поле зрения каждого телескопа составляет 16° по горизонтали и 16° по углу места. Все компоненты одного WFCT размещены в одном транспортном контейнере, установленном на шасси, для удобства перемещения и изменения угла места главной оптической оси от 0° до 90°.

Первые результаты работы установки LHAASO относятся к области энергии до 10¹⁶ эВ. Одним из самых значимых достижений эксперимента является обнаружение источников гамма-квантов с энергией $\sim 10^{15}$ эВ [32; 33].

1.2.8 GRANDproto300

GRAND (Giant Radio Array for Neutrino Detection) [143] — планируемая крупномасштабная обсерватория для исследования космических лучей, гамма-квантов и нейтрино с энергиями свыше 10¹⁷ эВ методом регистрации радиоизлучения от наклонных ШАЛ. Проект предполагает поэтапное строительство обсерватории, которое включает в себя создание следующих установок: GRANDProto35, GRANDProto300, GRAND10k и GRAND200k. С точки зрения исследования области перехода от галактических к внегалактическим КЛ наибольший интерес представляет эксперимент GRANDProto300

[144]. Предполагается, что данная установка будет состоять из 300 радиотелескопов, размещенных в Китае на площади 300 км^2 с возможностью исследования КЛ в диапазоне энергий $3 \cdot 10^{16} - 10^{18} \text{ эВ}$.

1.2.9 SKA

Эксперимент SKA (Square Kilometer Array) [145] — утвержденный проект радиотелескопа для решения широкого круга задач астрофизики и космологии. Планируется, что установка будет состоять из двух массивов детекторов, расположенных в Южной Африке и Австралии. Низкочастотная часть эксперимента, развернутая на территории Австралии, будет включать в себя 57344 логопериодических дипольных антенн и ~ 100 детекторов частиц на площади 0.5 км^2 . Антенны предназначены для регистрации радиоизлучения в диапазоне $50 - 350 \text{ МГц}$ и благодаря своему плотному размещению будут способны проводить исследования космических лучей в диапазоне $10^{16} - 10^{18} \text{ эВ}$. Основная задача детекторов частиц — выработка триггерного сигнала и восстановление направления прихода оси ШАЛ.

1.3 Полученные результаты

На рисунках 1.15, 1.16, 1.17 представлены результаты вышеописанных экспериментов: дифференциальный энергетический спектр КЛ, зависимость среднего логарифма атомной массы $\langle \ln A \rangle$ от энергии первичных частиц и ограничение на интегральный поток космического гамма-излучения.

Рисунок 1.15 показывает, что по форме энергетические спектры КЛ по данным разных экспериментов находятся в достаточно хорошем согласии между собой. Приведенные результаты в области $10^{15} - 10^{18} \text{ эВ}$ демонстрируют 3 статистически обеспеченные особенности при энергиях $\sim 3 \cdot 10^{15}$, $2 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} эВ . И если первый и третий изломы могут быть связаны с переходом от галактических к внегалактическим КЛ, то второй в настоящее время не имеет однозначного астрофизического объяснения. Существующие различия в

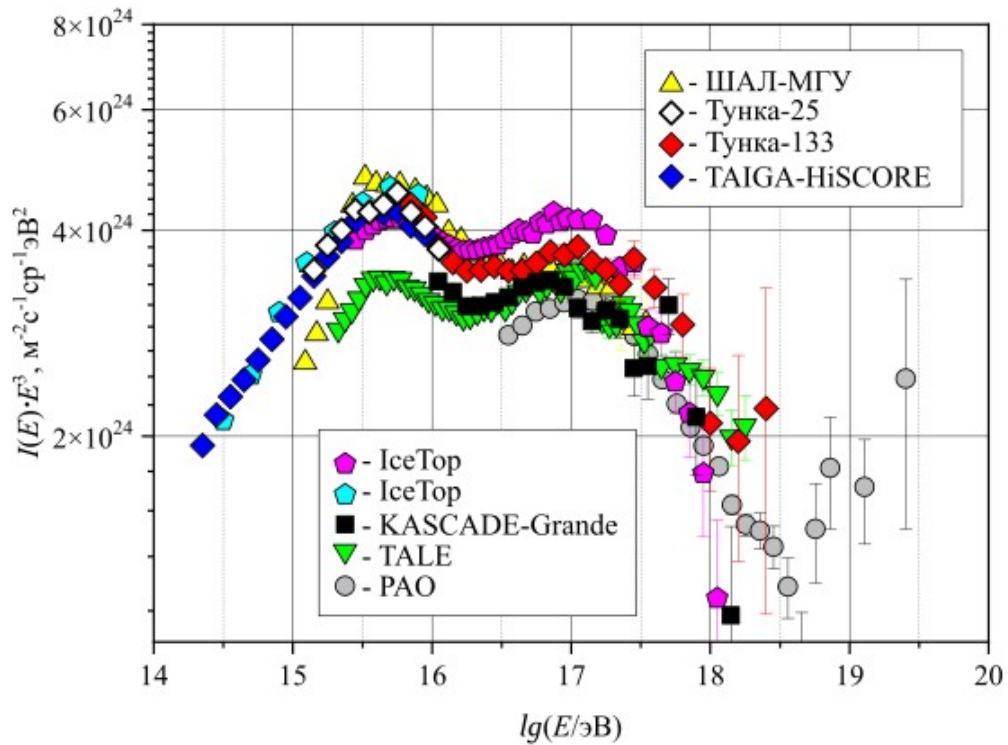


Рисунок 1.15 — Дифференциальный энергетический спектр КЛ, восстановленный по экспериментальным данным установок ШАЛ-МГУ [87], Тунка-25 [69], Тунка-133 [39], TAIGA-HiSCORE [39], IceTop (SIBYLL 2.1) [120], KASCADE-Grande (QGSJET-II) [97], TALE (QGSJET-II-03) [128] и PAO [136].

интенсивности потока КЛ, вероятно, связаны со систематическими ошибками измерения энергии первичных частиц. В работе [146] показано, что систематическое отличие определения энергии КЛ по данным установок Тунка-133 и KASCADE-Grande составляет 4% и даже такое отличие для степенных спектров (показатель наклона ≈ -3) приводит к заметным расхождениям в интенсивности потока космического излучения. Также следует отметить, что расхождение в интенсивности наблюдается и в результатах установок Telescope Array и Pierre Auger Observatory в области предельно высоких энергий (энергия выше 10^{18} эВ) [147]. Несмотря на значительные усилия двух коллабораций, причина различий так и не выяснена.

Массовый состав КЛ, как правило, характеризуется параметром $\langle \ln A \rangle$ — средним натуральным логарифмом атомной массы первичных ядер. На рисунке 1.16 видно, что приведенные результаты экспериментов указывают на утяжеление состава за областью, соответствующей первому излому в энергетическом спектр КЛ (энергия $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ). Дальнейшее поведение массового

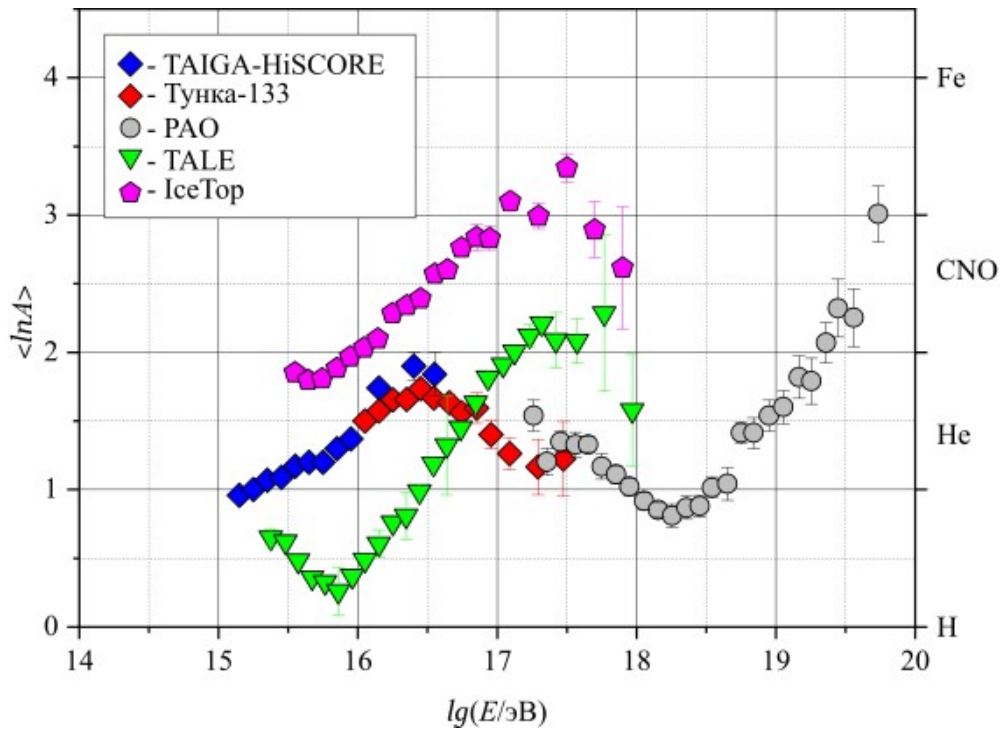


Рисунок 1.16 — Зависимость среднего логарифма атомной массы $\langle \ln A \rangle$ от энергии КЛ по экспериментальным данным установок TAIGA-HiSCORE (QGSJET-II-04) [117], Тунка-133 (QGSJET-II-04) [117], Pierre Auger Observatory (EPOS-LHS) [138], TALE (EPOS-LHS) [129] и IceTop (SIBYLL 2.1) [120].

состава КЛ существенно различается, что, вероятно, является показателем значительных систематических погрешностей измерений.

На сегодняшний день максимально зарегистрированная энергия космических гамма-квантов достигает значения $\sim 1.6 \cdot 10^{15}$ эВ [33]. В области $10^{16} - 10^{18}$ эВ по экспериментальным данным установок ШАЛ-МГУ, KASCADE-Grande и Pierre Auger Observatory получены верхние пределы на поток диффузного гамма-излучения на уровне достоверности (C.L. — Confidence Level) 90% и 95% (см. рисунок 1.17). На рисунке 1.17 также для сравнения приведены результаты установок CASA-MIA, KASCADE и Telescope Array.

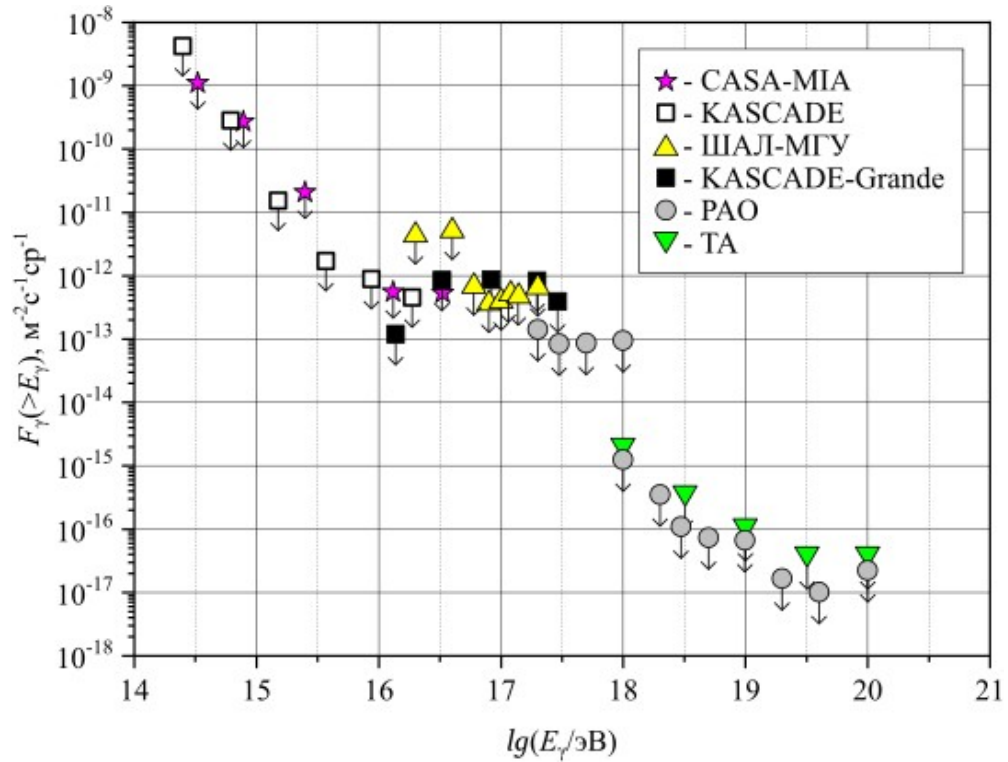


Рисунок 1.17 — Ограничение на интегральный поток диффузных гамма-квантов по экспериментальным данным установок CASA-MIA (90% C.L.) [148], KASCADE (90% C.L., QGSJET-II-02) [99], ШАЛ-МГУ (90% C.L., QGSJET-II-04) [91], KASCADE-Grande (90% C.L., QGSJET-II-02) [99], Pierre Auger Observatory (95% C.L., EPOS LHS) [139] и Telescope Array (95% C.L., QGSJET-II-03) [149].

Глава 2. Создание установки Tunka-Grande

Наземные установки способны регистрировать компоненты ШАЛ и по этим экспериментальным данным восстанавливать такие основные параметры КЛ как: направление прихода, энергию и сорт первичных частиц. Флуктуации, присущие развитию ШАЛ, использование разных методов регистрации, а также неопределенности в теоретических моделях адронных взаимодействий при высоких энергиях, приводят к значительным систематическим ошибкам и, как следствие, к расхождениям в получаемых результатах. Для достижения максимальной точности определения свойств первичного космического излучения полезна одновременная регистрация сразу нескольких компонент ШАЛ. Это обстоятельство приводит к необходимости создания новых или модернизации существующих наземных установок, а также дальнейшему развитию методик детектирования КЛ и обработки экспериментальных данных.

Создание установки Tunka-Grande началось после заключения договоренности о безвозмездной передаче сцинтилляционных счетчиков установки KASKADE-Grande Тункинскому астрофизическому центру коллективного пользования ИГУ. В июле 2013 г на территорию ТАЦКП была доставлена первая партия счетчиков, кабельных линий и необходимой электроники. Строительно-монтажные работы были полностью завершены в декабре 2015 г. В настоящей главе приведено подробное описание процесса создания и устройства установки Tunka-Grande. Материалы главы опубликованы в работах [56—64].

2.1 Расположение станций и организация линий связи

При определении размеров и конфигурации установки Tunka-Grande за основу была взята геометрия действующей установки Тунка-133. По результатам компьютерного моделирования [47—49] и, исходя из общего количества полученных сцинтилляционных счетчиков установки KASKADE-Grande, было принято решение, что новая установка будет состоять из 19 станций. При этом место расположения отдельно взятой станции выбиралось с учетом территориальной близости центра одного из 19 кластеров установки Тунка-133. Такое размещение

связано с реализацией идеи гибридного подхода к изучению КЛ, заключающегося в одновременной регистрации заряженной компоненты и черенковского излучения ШАЛ. В связи с этим для установки Tunka-Grande изначально предполагалось 2 режима работы: «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» и «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР». В первом случае планировалось, что внешний триггерный сигнал будет формироваться ближайшим кластером установки Тунка-133 при совместных сеансах наблюдений. В остальное время предусматривалось использование режима «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР», в котором каждая станция является независимой с точки зрения регистрации ШАЛ.

Сегодня, в соответствии с изначальным проектом, установка Tunka-Grande представляет собой массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций и расположенных на площади $\sim 0.5 \text{ км}^2$. Каждая станция состоит из двух частей: наземной и подземной. Первая включает в себя 12 счетчиков с общей площадью 7.68 м^2 и регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне наблюдения. Вторая содержит 8 счетчиков общей площадью 5.12 м^2 , расположена под слоем грунта 1.5 м и предназначена для выделения мюонной компоненты ШАЛ. Пороговая энергия для вертикальных мюонов при этом составляет $\sim 0.5 \text{ ГэВ}$. Обе части находятся в непосредственной близости друг от друга и на расстоянии не более 30 м от центра ближайшего кластера установки Тунка-133. В приложении А приведена таблица с координатами станций.

Технические решения, примененные при создании установки Tunka-Grande, во многом повторяют идеи, реализованные в установке Тунка-133, в том числе используют ее инфраструктуру. Последнее частично относится и к организации кабельных линий связи. Аппаратный комплекс установки Тунка-133 разделен на две части: центральную и кластерную. Центральная часть находится в здании центра сбора данных (ЦСД), едином для всех установок ТАЦКП, кластерная — внутри теплоизолированных контейнеров, расположенных в центре каждого кластера. Контейнеры представляют собой металлический короб с двойными стенками, между которыми проложен пенопласт толщиной 5 см. Обе части аппаратного комплекса соединены между собой комбинированным кабелем ОКБ-М8Т-62.5-08-4/4, содержащим 4 медных и 4 многомодовых волоконно-оптических жилы. Первые используются для передачи электропитания напряжением 220 В от главного распределительного щита ЦСД к теплоизолированным контейнерам. Волоконно-оптические жилы предназначены для обмена служебной информацией и передачи эксперимен-

тальных данных. Для этого в каждом кластере задействованы только две из них, что дало возможность использования оставшихся жил для целей установки Tunka-Grande. Подключение кабеля ОКБ-М8Т-62.5-08-4/4 к аппаратуре станций выполнено с помощью 2-жильных многомодовых волоконно-оптических коммутационных шнуров длиной 40 м. При этом подача электропитания напряжением 220 В от главного распределительного щита ЦСД осуществляется посредством 4-жильного силового бронированного кабеля ВВШвнг(А) 4 · 2.5, прокладка которого на территории ТАЦКП производилась в рамках работ по созданию установки Tunka-Grande. Все кабельные линии расположены в траншеях на глубине ~ 30 см. Для дополнительного обмена информацией между ЦСД и станциями также организована беспроводная сеть, аналогично используемой в установке Тунка-133. На рисунке 2.1 приведено расположение ЦСД, станций установки Tunka-Grande с указанием их нумерации и оптических детекторов установки Тунка-133.

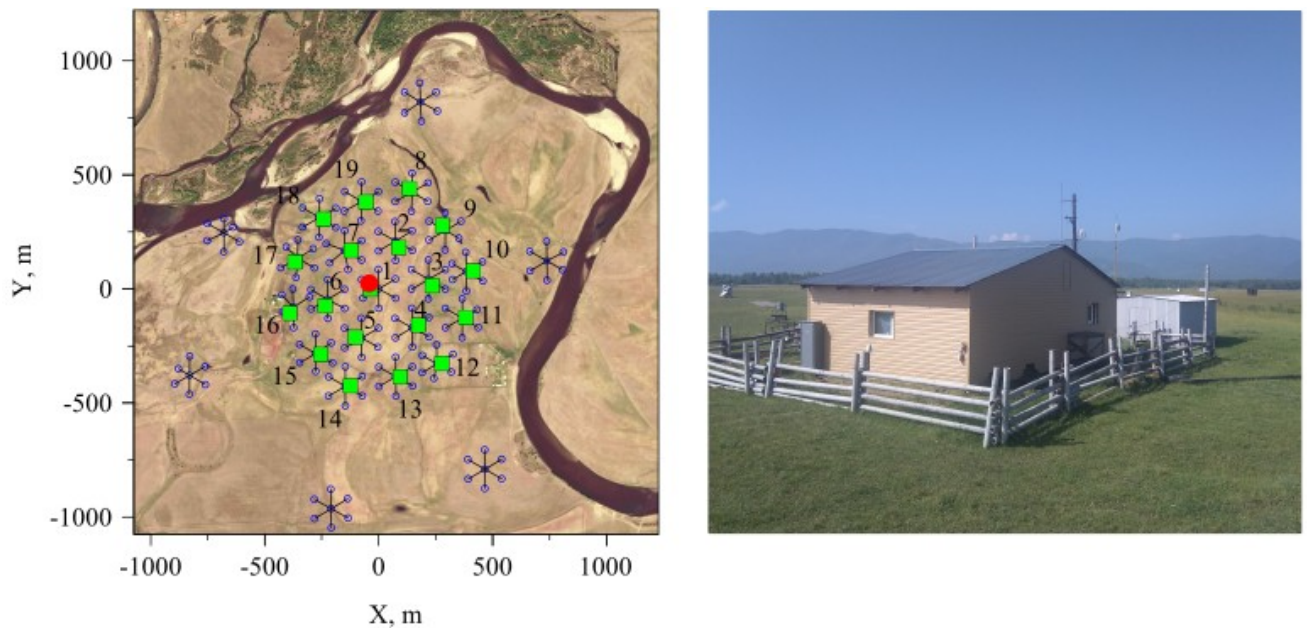


Рисунок 2.1 — Схематичное расположение центра сбора данных (ЦСД), станций установки Tunka-Grande, оптических детекторов установки Тунка-133 (слева) и внешний вид ЦСД (справа). Красный круг — ЦСД, зеленые квадраты — станции, синие кольца — оптические детекторы, черными линиями выделены 25 кластеров установки Тунка-133.

2.2 Конструкция сцинтилляционного счетчика и станции

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 порядка 30 см от него ФЭУ Photonis XP-3462. В работе [150], в рамках создания установки НЕВОД-ШАЛ, подробно исследованы параметры этого типа счетчика и показано, что геометрия и характеристики детектора позволяют эффективно выделять сигналы от ШАЛ и обеспечивают высокую однородность по амплитуде сигнала по всей площади сцинтиллятора. Для подачи питания на ФЭУ и передачи сигналов системе сбора данных внутри станций используются коаксиальные кабели RG-59, RG-178 и RG-58. Их длина для наземной части составляет 8 м, для подземной — 15 м. На двух центральных счетчиках каждой станции для расширения динамического диапазона регистрации сигналов используются дополнительные ФЭУ Photonis XP-3462 с коэффициентом усиления в ~ 10 раз меньшим по сравнению стандартным. На рисунке 2.2 представлены конструкция и элементы детектора.

Сцинтилляционные счетчики стабильно работают в достаточно широком диапазоне температур, но в тоже время не герметичны и подвержены механическим повреждениям, поэтому при разработке конструкции станции установки Tunka-Grande были установлены следующие основные требования:

1. Возможность свободного доступа к счетчикам наземной и подземной частей.
2. Защита счетчиков наземной части от случайного внешнего механического воздействия и негативного влияния атмосферных явлений.
3. Защита счетчиков подземной части от возможного воздействия случайных и грунтовых вод.
4. Возможность установки в наземной части теплоизолированного контейнера для размещения в нем аппаратуры станции.
5. Учет значительных нагрузок на конструкцию подземной части со стороны грунта.

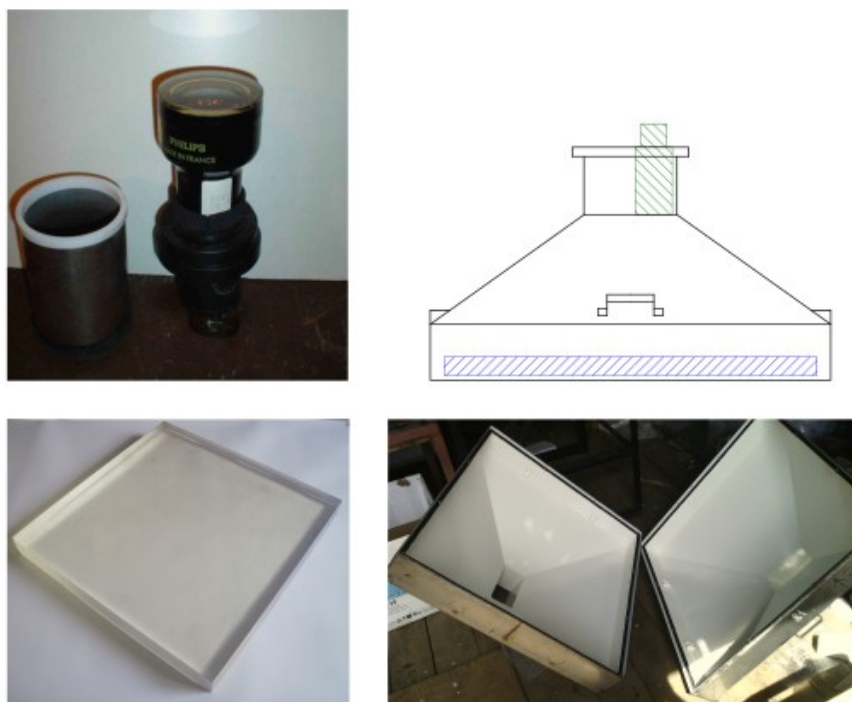


Рисунок 2.2 — Схематичное изображение конструкции и элементы сцинтилляционного счетчика.

6. Нахождение в непосредственной близости наземной и подземной частей.

В соответствии с выдвинутыми требованиями была разработана конструкция станций. Опорными элементами наземной части являются металлические профильные трубы, заглубленные в землю и соединенные между собой досками. Каркас по всему периметру обшит стальным профилированным листом толщиной 1 мм. Счетчики располагаются в 4 ряда на металлических рамах, которые, в свою очередь, жестко соединены деревянными брусками. Помимо детекторов в каждой станции находится теплоизолированный контейнер (см. рисунок 2.3).

Подземные части, в отличие от наземных, выполнены в трех конструктивах с разной схемой размещения счетчиков. Их устройство зависит от расположения станции и очереди ее строительства. ТАЦКП находится в пределах поймы и надпойменной террасы реки Иркут. Для такой местности характерно наличие заболоченных участков вследствие высокого уровня грунтовых вод. На стадии проектирования с учетом проведенных инженерно-геологических изысканий, рельефа территории ТАЦКП и климата Тункинской долины было принято решение, что нижние части станций должны быть заглублены не более чем на 2 м. Обеспечение слоя грунта толщиной 1.5 м для

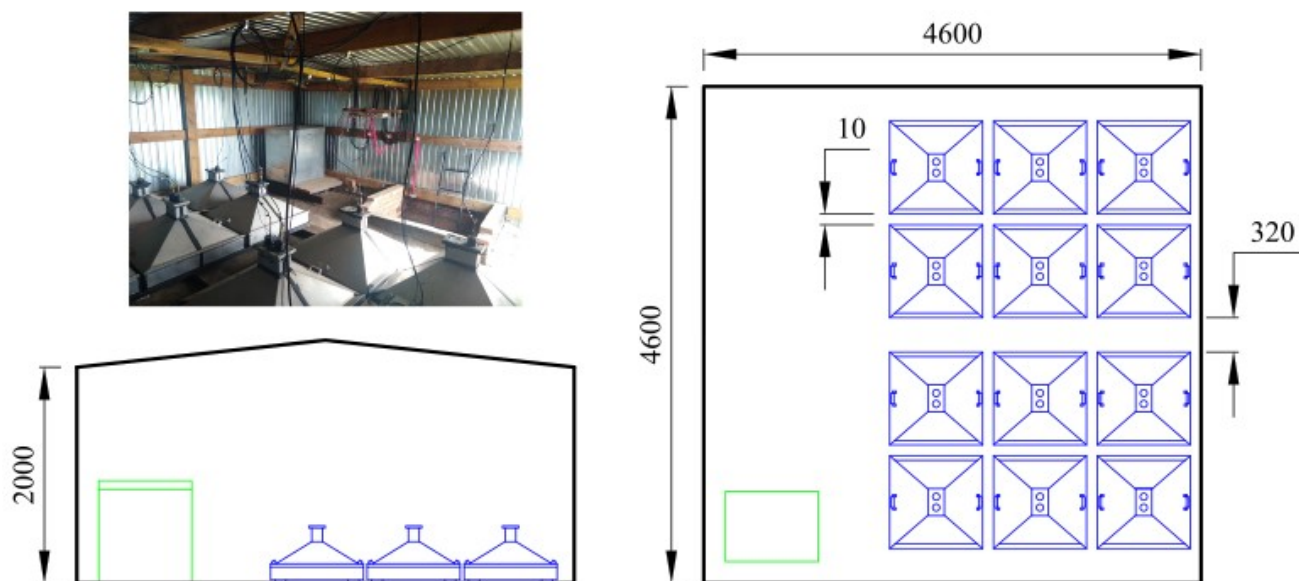


Рисунок 2.3 — Конструкция наземной части станций и ее вид изнутри. Синим обозначены сцинтилляционные счетчики, зеленым — теплоизолированный контейнер. Размеры приведены в мм.

поглощения электрон-фотонной компоненты ШАЛ предполагалось достичь за счет возведения насыпей. В 2013 г была построена подземная часть станции №1. Данная конструкция имеет Т-образную форму. Счетчики расположены в двух металлических контейнерах, изготовленных по индивидуальному заказу в форме полуцилиндра. Между контейнерами устроен проход, который, в свою очередь, соединен с наземной частью посредством прямоугольного кирпичного колодца и тоннеля, состоящего из двух промышленных железобетонных лотков Л5. Сверху проход перекрыт железобетонной плитой По4, опирающейся на сварную металлоконструкцию. В качестве несущих стен используется кирпичная кладка (см. рисунок 2.4).

Устройство приведенной на рисунке 2.4 подземной части имеет ряд недостатков, главным из которых на момент ее создания являлась достаточно высокая суммарная стоимость входящих в нее элементов. По этой причине на остальных станциях были предложены и реализованы решения на основе типовой проектной документации серии 3.006.1-2.87, заключающееся в использовании промышленных железобетонных лотков Л11-8/2 как основного строительного элемента. Это позволило снизить конечную стоимость в $\sim 1.5 - 2$ раза.

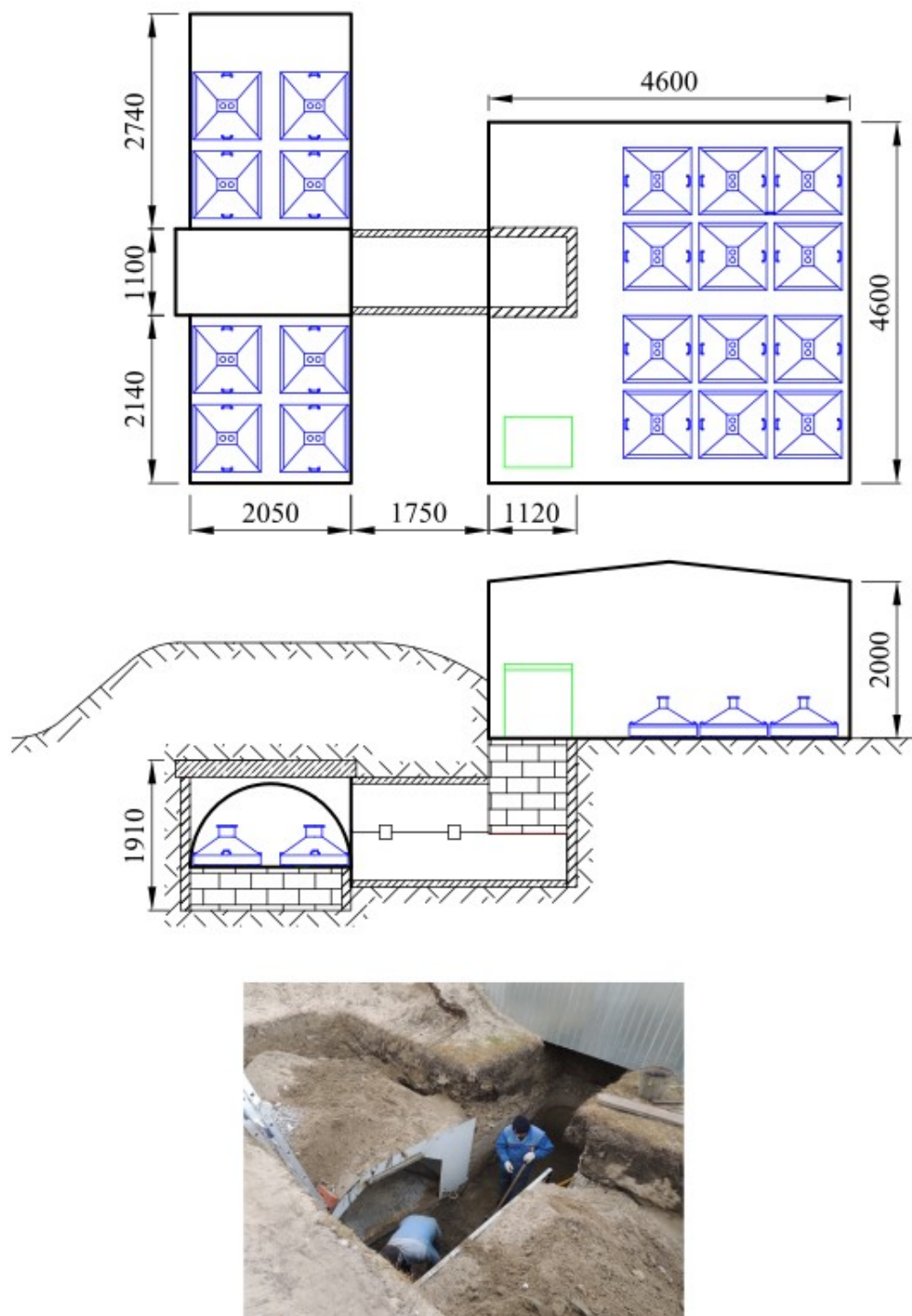


Рисунок 2.4 — Конструкция подземной части станции №1 и ее вид на этапе строительно-монтажных работ. Размеры приведены в мм.

Вторая конструкция была разработана для станции №14, которая находится на заболоченном участке, характеризующимся просадочным грунтом и близким расположением почвенным вод, что не позволило произвести заглубление ее подземной части. В этом случае счетчики размещены внутри двухсекционного составного канала и находятся на одном горизонтальном

уровне со счетчиками наземной части. Сообщение между частями станции осуществляется посредством односекционного составного канала. Между каналами устроен проход, перекрытый железобетонными плитами По4. В качестве несущих стен используется кирпичная кладка. Представленное решение отличается от устройства подземной части других станций и разработано с учетом минимизации стоимости работ по возведению насыпи (см. рисунок 2.5).

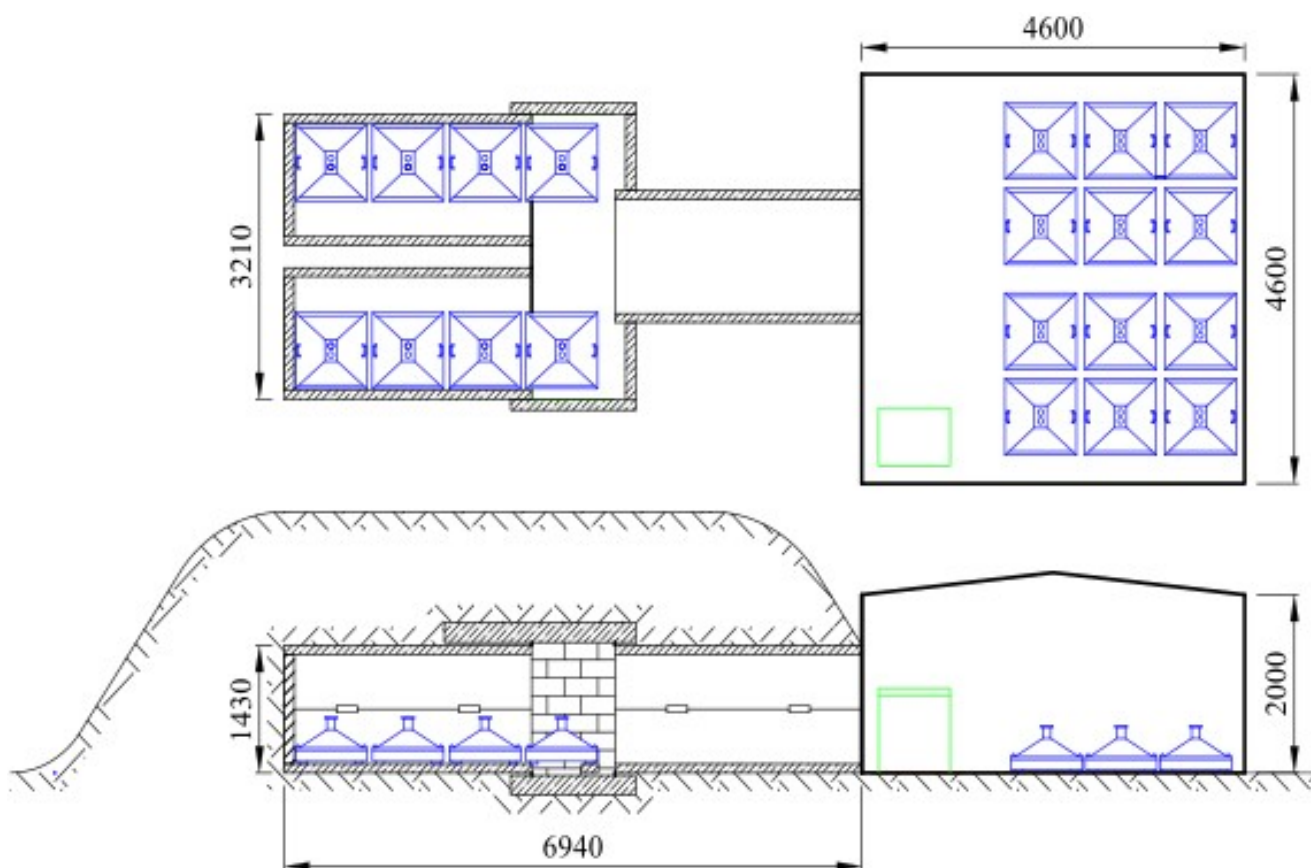


Рисунок 2.5 — Конструкция подземной части станции №14 и ее вид на этапе строительно-монтажных работ. Размеры приведены в мм.

Конструкция подземных частей остальных станций выполнена в виде одностороннего составного канала из восьми лотковых элементов. Доступ к счетчикам из наземной части осуществляется через прямоугольный кирпичный колодец, в основании которого расположены 2 железобетонные плиты П14д-3 (см. рисунок 2.6).

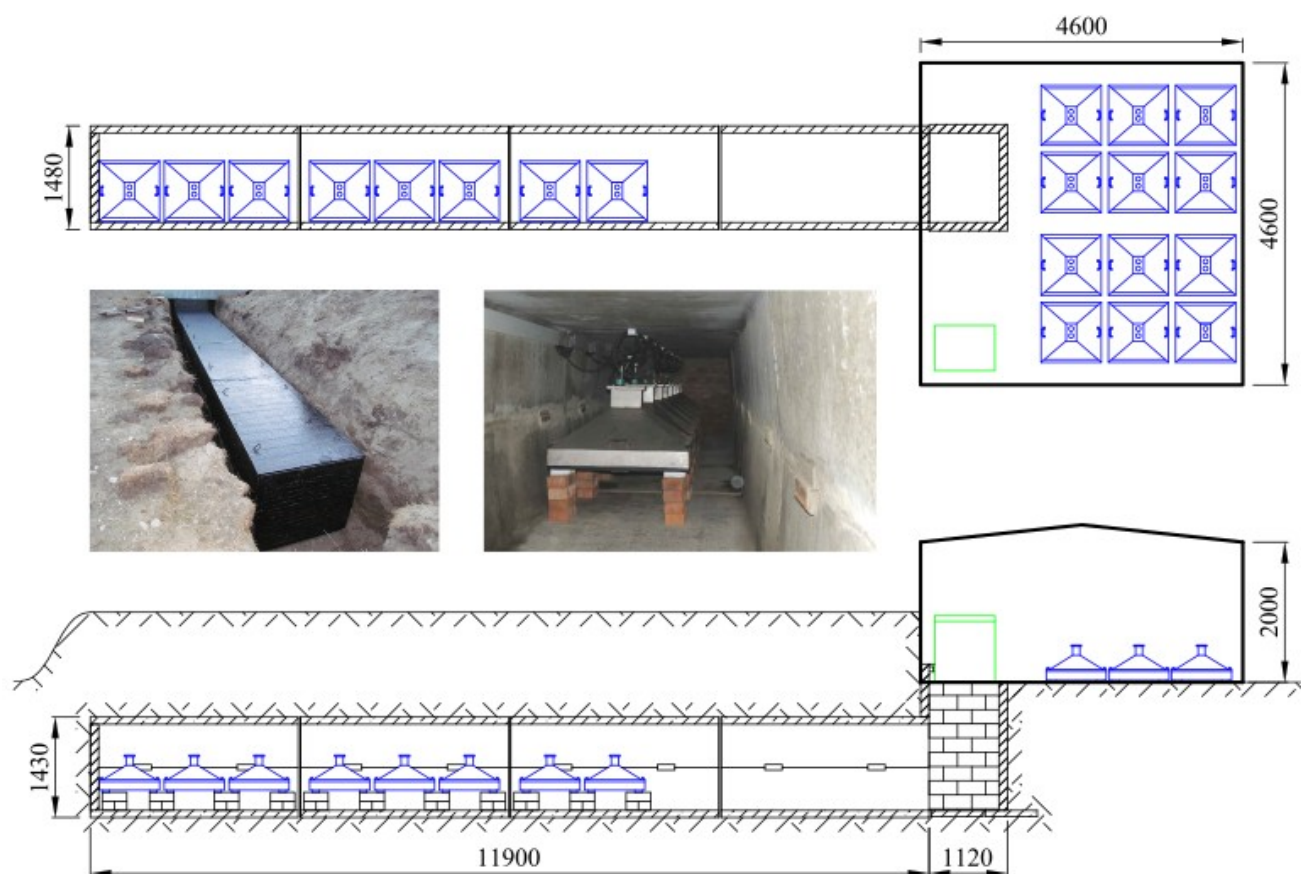


Рисунок 2.6 — Конструкция подземной части станций и ее вид на этапе строительно-монтажных работ. Размеры приведены в мм.

Здесь необходимо отметить, что пороговая энергия для установки Tunka-Grande составляет $\sim 10^{16}$ эВ. Характерные поперечные размеры ШАЛ от первичной частицы с такой энергией на уровне наблюдения составляют несколько сотен метров и варианты локального расположения счетчиков в зависимости от конструкции станции не влияют на эффективность регистрации компонент ШАЛ.

2.3 Программно-аппаратный комплекс

Программно-аппаратный комплекс установки Tunka-Grande [58] построен на базе программно-аппаратного комплекса установки Тунка-133 [151] и состоит из систем временной синхронизации, сбора данных, управления и мониторинга. Каждая из этих систем разделена на центральную и станционную. Первая располагается в здании ЦСД, вторая — непосредственно в наземной части каждой станции. Программное обеспечение позволяет использовать весь возможный функционал комплекса, устанавливать необходимые параметры работы его узлов и производить обмен информацией между ними.

К устройствам ЦСД относятся персональные компьютеры (ПК), МегаХост, СуперХост, Хосты, узел коммутации, координатор радиосети и GPS приемник. Каждая станция включает в себя: контроллер обогрева, радиомодуль, модули измерения формы сигналов, модуль управления станцией, модуль управления устройствами, источники высокого напряжения, платы сумматоров для наземной и подземной частей и метеостанцию (см. рисунок 2.7). Последние 3 устройства являются новыми элементами электроники по сравнению с аппаратным комплексом установки Тунка-133.

Обмен информацией между центральной и станционными системами сбора данных и синхронизации осуществляется посредством волоконно-оптических линий связи длиной от 50 до 560 м на базе кабеля ОКБ-М8Т-62.5-08-4/4 и коммутационных шнуров. Сигналы системы управления и мониторинга передаются по радиоканалу.

2.3.1 Система сбора данных

Система сбора данных станции отвечает за непрерывную оцифровку сигналов со сцинтилляционных счетчиков, их отбор согласно установленным условиям, присвоение временной метки и порядкового номера зарегистрированным событиям и передачу экспериментальных данных в ЦСД. Аппаратура каждой станции находится в теплоизолированном контейнере, аналогично используемому в установке Тунка-133. Внутри контейнера находятся платы

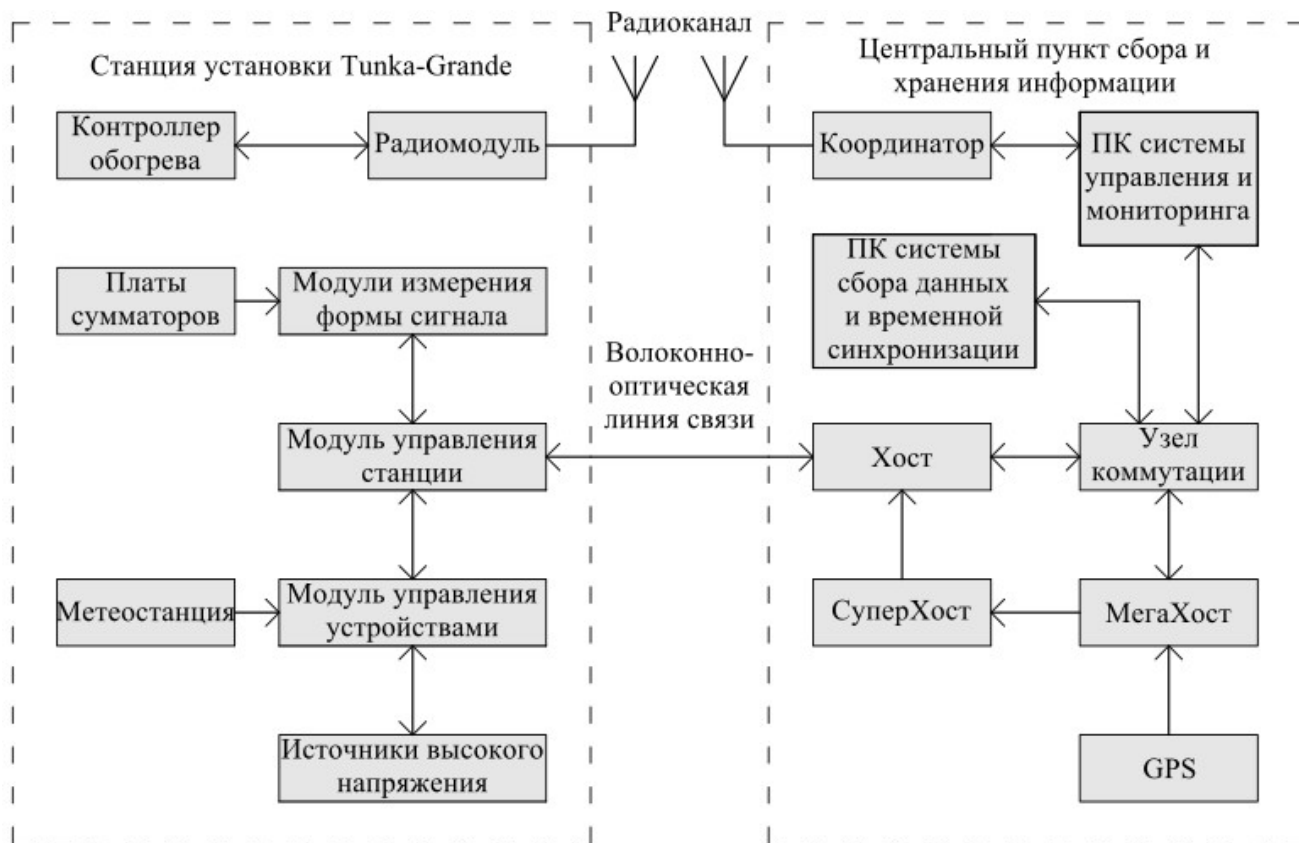


Рисунок 2.7 — Элементы аппаратного комплекса установки Tunka-Grande и взаимосвязь между ними.

сумматоров для наземной и подземной частей, 4 модуля измерения формы сигналов, модуль управления станции и модуль управления устройствами (см. рисунок 2.8). Все перечисленные элементы, за исключением платы сумматоров для подземной части, выполнены в стандарте VME (VersaModule Eurocard bus) и располагаются в крейте, изготовленном в конструктиве Евромеханика 6U. Обмен данными между модулями осуществляется через 34-жильный шлейф, обеспечивающий интерфейс реального времени и магистраль VME.

Платы сумматоров выполнены по идентичным схемам на базе операционного усилителя AD8058AR, предназначены для аналогового суммирования, усиления и интегрирования сигналов от сцинтилляционных счетчиков. Плата для наземной части состоит из двух входных линий, каждая из которых предусматривает подключение шести ФЭУ и имеет 2 каскада усиления: первый с коэффициентом передачи по напряжению равным 1, второй — 10. Плата для подземной части включает в себя 6 линий, четыре из которых суммарно рассчитаны на прием сигналов с восьми ФЭУ и предусматривают один каскад усиления с коэффициентом передачи 10. Дополнительные две линии с одним

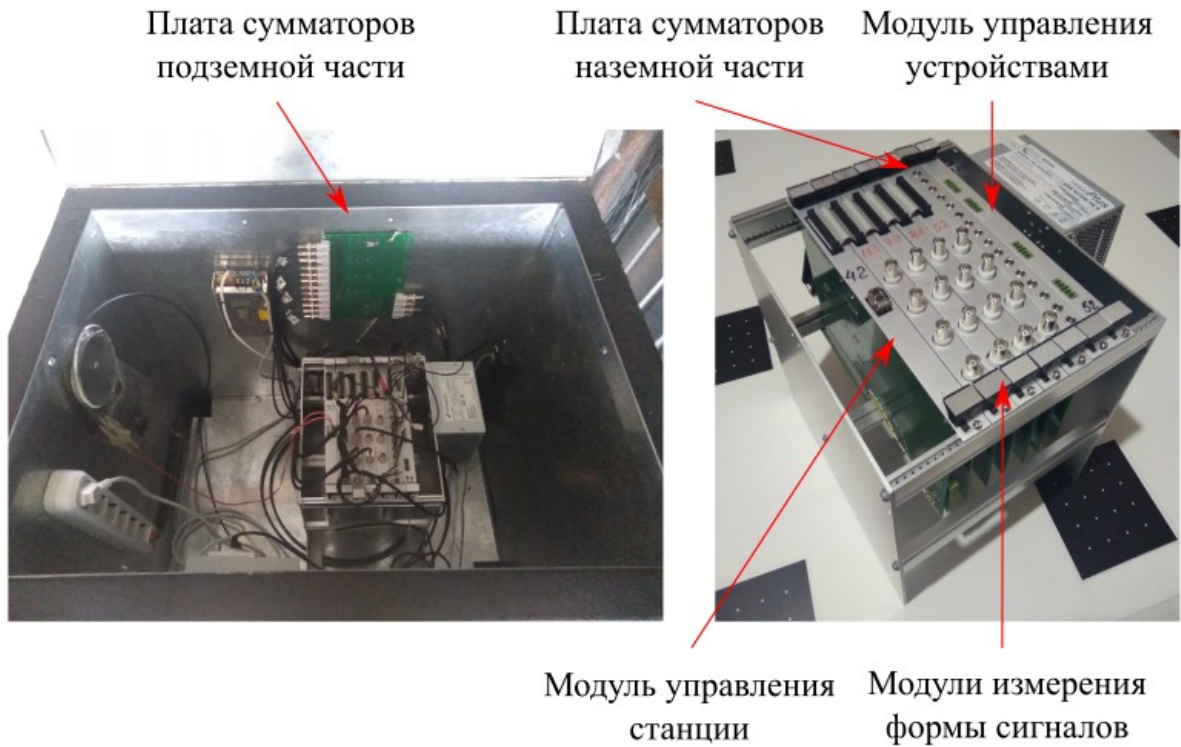


Рисунок 2.8 — Элементы системы сбора данных станции.

каскадом и коэффициентом равным 1 рассчитаны на подключение по одному ФЭУ из наземной части (см. рисунок 2.9).

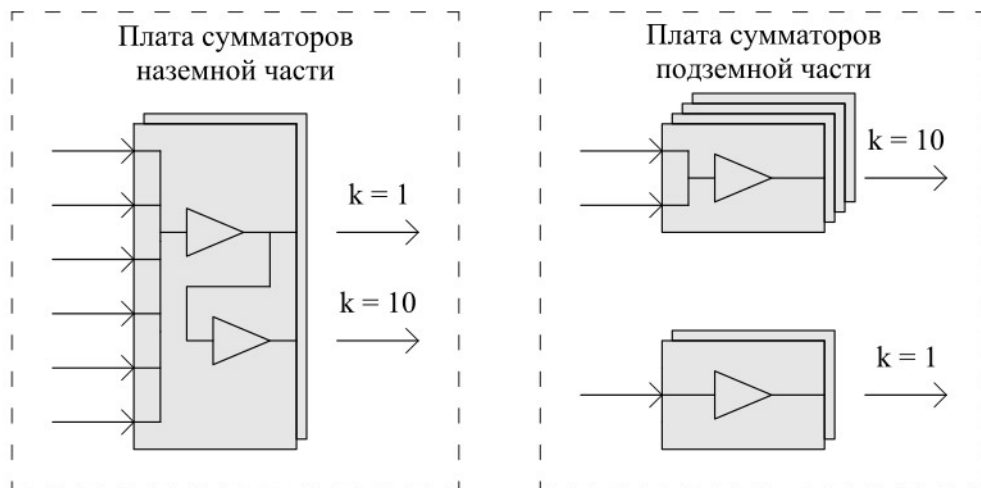


Рисунок 2.9 — Структурная схема плат сумматоров.

Модуль измерения формы сигналов включает в себя 2 основных и 2 вспомогательных канала, образующих две входные линии. В основном канале электрические импульсы от платы сумматоров через согласующий трансформатор поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) AD9613

или AD9430 разрядностью 12 бит и частотой дискретизации 200 МГц. Далее оцифрованные сигналы передаются на ПЛИС XILINX семейства Spartan-6, в которой, с одной стороны, производится непрерывная запись в 2 кольцевых буфера объемом 1024 отсчета каждый, с другой — через блок сглаживания поступают на блоки формирования запроса и амплитудного анализатора. Сглаживающий фильтр обеспечивает сглаживание по 1, 2, 4 или 8 отчетам. Блок формирования запроса состоит из компаратора, сравнивающего амплитуду импульса с установленным порогом срабатывания, регулируемой задержки, предназначенной для компенсации возможной разности времен прихода импульсов в линиях, и формирователя запроса, сигнал «ЗАПРОС» с которого поступает на модуль управления станции при срабатывании компаратора. Задержка устанавливается с дискретностью 10 нс в диапазоне от 0 до 650 нс. Блок амплитудного анализатора состоит из пикового детектора, определяющего амплитуду импульса, и собственно амплитудного анализатора, содержащего 1024 канала с глубиной 16 бит каждый. Уровень сглаживания, значение порога срабатывания, величина задержки и время накопления данных амплитудным анализатором задаются программно. В стандартном режиме работы запись в оба кольцевых буфера производится параллельно и регулируется блоком управления набора данных. После поступления в блок сигнала «ТРИГГЕР» в одном из буферов запускается временное окно длительностью 512 отсчетов, по окончании которого запись останавливается и с помощью блока передачи данных начинается процедура считывания информации. При этом второй буфер не прекращает своей работы. После завершения считывания и получения блоком управления сигнала «РЕЛИЗ» первый буфер возобновляет запись. При поступлении сигнала «ТРИГГЕР» до окончания процедуры считывания временное окно запускается только в свободном буфере. Такое решение позволяет минимизировать мертвое время системы сбора данных. Вспомогательный канал модуля отличается от основного отсутствием блоков сглаживания, формирования запроса и амплитудного анализатора. Управление основными и вспомогательными каналами, а также передача данных осуществляется через магистраль VME. Сигналы «ЗАПРОС», «ТРИГГЕР» и «РЕЛИЗ» поступают через интерфейс реального времени. Необходимо также отметить, что диапазон входных напряжений основного и вспомогательного каналов лежит в интервале от ~ -3 В до +3В. На рисунке 2.10 представлена структурная схема одной входной линии модуля измерения формы сигналов.



Рисунок 2.10 — Структурная схема модуля измерения формы сигналов.

Модуль управления станции предназначен для обмена информацией с ЦСД, передачи модулям измерения формы сигналов значений рабочих параметров, формирования сигналов «ТРИГГЕР» и «РЕЛИЗ», приема данных кольцевых буферов, присвоения временных меток и порядковых номеров зарегистрированным событиям. Модуль управления реализован на базе ПЛИС XILINX семейства Spartan-6 и состоит из блока трансиверов, триггерного блока, локального таймера, счетчика событий и блока приема и передачи данных (см. рисунок 2.11). Блок трансиверов обеспечивает связь с ЦСД и включает в себя оптический и сетевой приемопередатчики. Триггерный блок устанавливает режим работы станции: «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» и «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР». В режиме «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» блок принимает сигналы «ЗАПРОС» от основных каналов модулей измерения формы сигналов. В случае соответствия количества пришедших сигналов в заданном временном окне с установленной кратностью формируется сигнал «ТРИГГЕР», который запускает процедуру считывания данных кольцевых буферов основных и вспомогательных каналов. Временное окно совпадения устанавливается в диапазоне от 20 до 2500 нс,

кратность — от 1 до 8. После завершения процедуры считывания модуль управления посылает сигнал «РЕЛИЗ». В режиме «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» сигнал от ближайшего кластера установки Тунка-133 является условием для выработки сигнала «ТРИГГЕР». Разрядность локального таймера составляет 48 бит, счетчика событий — 32 бита. Режим работы триггерного блока, начальное время локального таймера с точностью 10 нс, условие сброса счетчика событий, число опрашиваемых каналов модулей измерения формы сигналов, величина временного окна совпадения и кратность задаются программно.

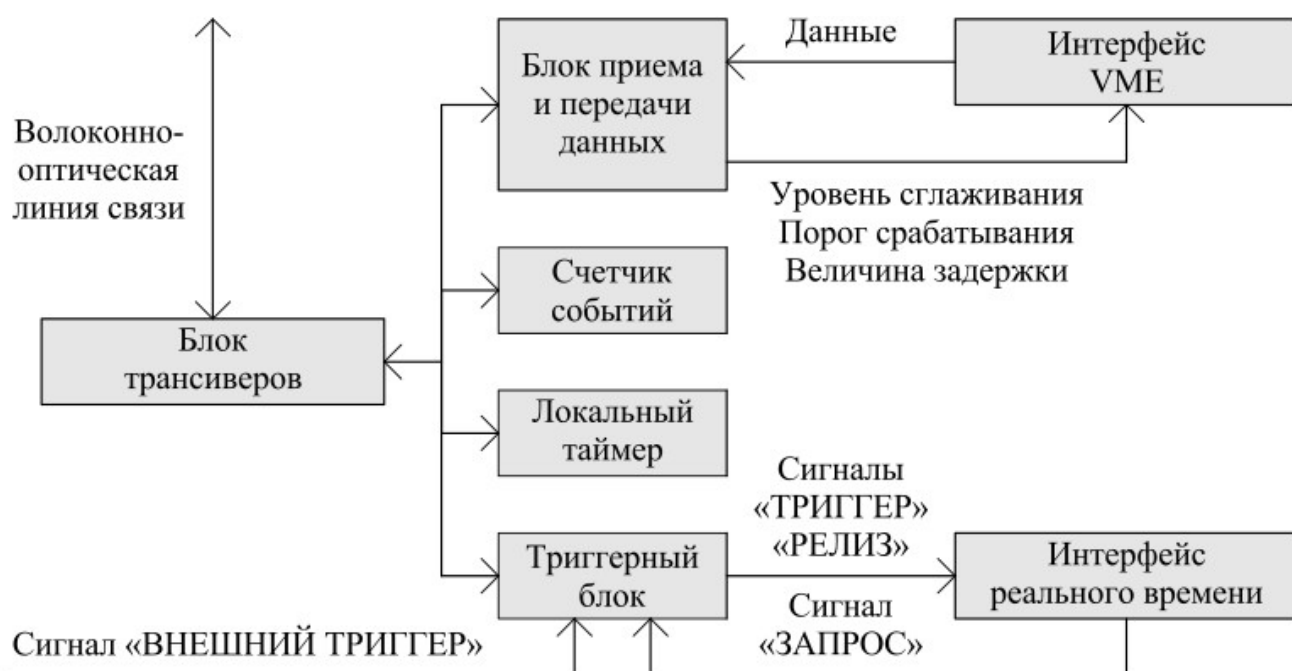


Рисунок 2.11 — Структурная схема модуля управления станции.

Модуль управления устройствами реализован на базе микросхемы MAX1480VER1 и предназначен для взаимодействия с двумя 10-канальными источниками высокого напряжения и метеостанцией. Источник высокого напряжения состоит из контроллера и 10 высоковольтных преобразователей, которые объединены базовой платой и расположены внутри пластикового корпуса. Контроллер построен на базе микроконтроллера PIC24FJ64GA004. Преобразователи, в соответствии с программно заданными значениями, позволяют устанавливать выходное напряжение в диапазоне 0—2000 В, работают независимо друг от друга и предусматривают автоматическое отключение в случае превышения допустимой выходной мощности 5 Вт, короткого замыкания или перегрева. Информация о статусе контроллера и каждого канала

может быть получена программно. Необходимо отметить, что для подачи напряжения питания на дополнительные ФЭУ в двух центральных счетчиках используется резистивные разветвители, подключающиеся к двум каналам и имеющие возможность ручной регулировки. Метеостанция необходима для измерения температуры и давления окружающей среды и реализована на базе микроконтроллера PIC32MX150F128D, который размещается внутри пластикового корпуса. При этом только 3 станции установки Tunka-Grande оборудованы метеостанциями. На рисунке 2.12 представлены структурные схемы модуля управления, подключенных к нему элементов аппаратного комплекса, их взаимосвязь и изображения.



Рисунок 2.12 — Структурные схемы модуля управления устройствами, 10-канального источника высокого напряжения, метеостанции, взаимосвязь между ними и их изображения.

Центральная система сбора данных состоит из 5 Хостов, узла коммутации и персонального компьютера. Хосты функционируют на базе ПЛИС XILINX семейства Spartan-6 и обеспечивают обмен служебной информацией и экспериментальными данными между модулями управления станции и ПК. Один Хост может поддерживать параллельную передачу данных с четырьмя станциями.

Узел коммутации состоит из промышленных 8-портовых сетевых коммутаторов и необходим для организации связи в ЦСД. Персональный компьютер является центральным устройством системы сбора данных и посредством программного обеспечения позволяет управлять всеми элементами аппаратного комплекса установки Tunka-Grande, производить первичную обработку и хранение экспериментальных данных.

2.3.2 Система временной синхронизации

Временная синхронизация установки Tunka-Grande осуществляется на 5 уровнях, которые расположены последовательно и реализованы в виде блоков временной синхронизации в модулях управления станции, модулях измерения формы сигналов и устройств временной синхронизации таких как: Хост, СуперХост и МегаХост. Последние 3 элемента располагаются в здании ЦСД, в крейтах, изготовленных в конструктиве Евромеханика 6U.

Для всех уровней предусмотрено 2 режима работы: «ЛОКАЛЬНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ» и «ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ». В первом случае источником опорной частоты является встроенный кварцевый резонатор на 25 МГц и генератор тактовых импульсов, во втором — устройство верхнего уровня. Система временной синхронизации согласно своей иерархии (см. рисунок 2.13) предназначена для выполнения следующих задач:

1. Обеспечение узлов модуля измерения формы сигналов частотами 100 МГц и 200 МГц, синхронная работа всех АЦП в пределах одного модуля.
2. Тактирование локального таймера модуля управления станции частотой 100 МГц, синхронная работа до 8 модулей измерения формы сигнала включительно в пределах одной станции.
3. Тактирование локального таймера Хоста частотой 100 МГц, синхронная работа до 4 модулей управления станции в пределах одного Хоста.
4. Тактирование локального таймера СуперХоста частотой 100 МГц, синхронная работы до 12 Хостов в пределах одного СуперХоста.
5. Тактирование локального таймера МегаХоста частотой 100 МГц, синхронная работа до 10 СуперХостов в пределах одного МегаХоста,

синхронизация локального таймера МегаХоста с временем внешнего GPS приемника или персонального компьютера.

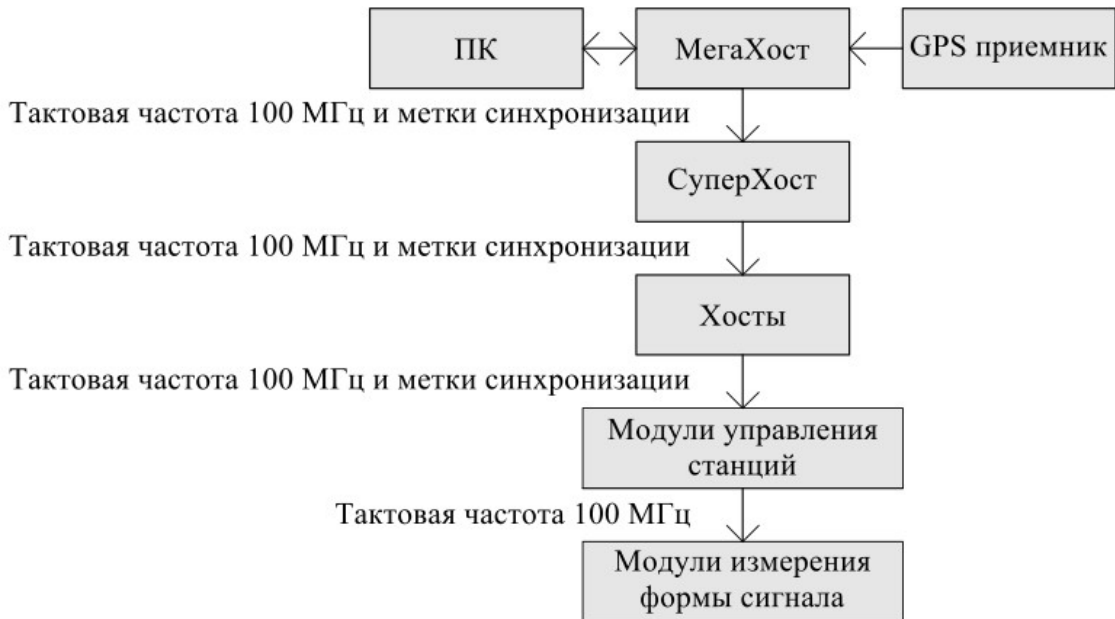


Рисунок 2.13 — Уровни системы временной синхронизации.

Режим работы «ЛОКАЛЬНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ», в соответствии с программно заданными условиями, может быть реализован на любом из уровней и использован при тестировании, настройке и калибровке электроники и сцинтилляционных счетчиков в пределах одной или нескольких станций. Регистрация ШАЛ, с последующим восстановлением характеристик и параметров первичной частицы, требует синхронной работы всех 19 станций и привязки к всемирному времени UTC (Universal Time Coordinated). В этом случае МегаХост (см. рисунок 2.14) является центральным устройством для всех установок ТАЦКП и отправляет элементам аппаратного комплекса, которые находятся в режиме «ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ», по 10 возможным каналам единую тактовую частоту 100 МГц и метки синхронизации, имеющие длительность 10 нс и частоту 1 Гц. Установка значения и запуск локального таймера МегаХоста производится однократно по программному запросу в соответствии с данными внешнего GPS приемника или персонального компьютера. СуперХост и Хосты являются элементами расширения и связывают модули управления станции с ЦСД. Установка значения локальных таймеров устройств системы временной синхронизации по времени МегаХоста выполняется однократно при запуске процедуры набора экспериментальных данных.



Рисунок 2.14 — Структурная схема МегаХоста.

2.3.3 Система управления и мониторинга

Основными функциями системы управления и мониторинга являются обеспечение температуры воздуха внутри теплоизолированных контейнеров в программно заданных пределах, дистанционный контроль температуры во время работы установки и управление электропитанием станций. Стационарная система состоит из контроллера обогрева и промышленного радиомодуля XBee—PRO. Контроллер обогрева реализован на базе микроконтроллера PIC24FJ64GA004 и регулирует температуру внутри теплоизолирующего контейнера с помощью двух нагревательных элементов суммарной мощностью 200 Вт. Включение аппаратуры станции происходит при достижении программно заданного температурного значения (по умолчанию $+15^{\circ}\text{C}$), которое измеряется с помощью датчика, входящего в состав радиомодуля. При достижении верхнего порога (по умолчанию $+28^{\circ}\text{C}$) предусмотрено включение вытяжного вентилятора. С помощью радиомодуля и антенны, вынесенной за пределы станции, осуществляется обмен информацией с центральной системой. На рисунке 2.15 изображены элементы системы управления и мониторинга станции.

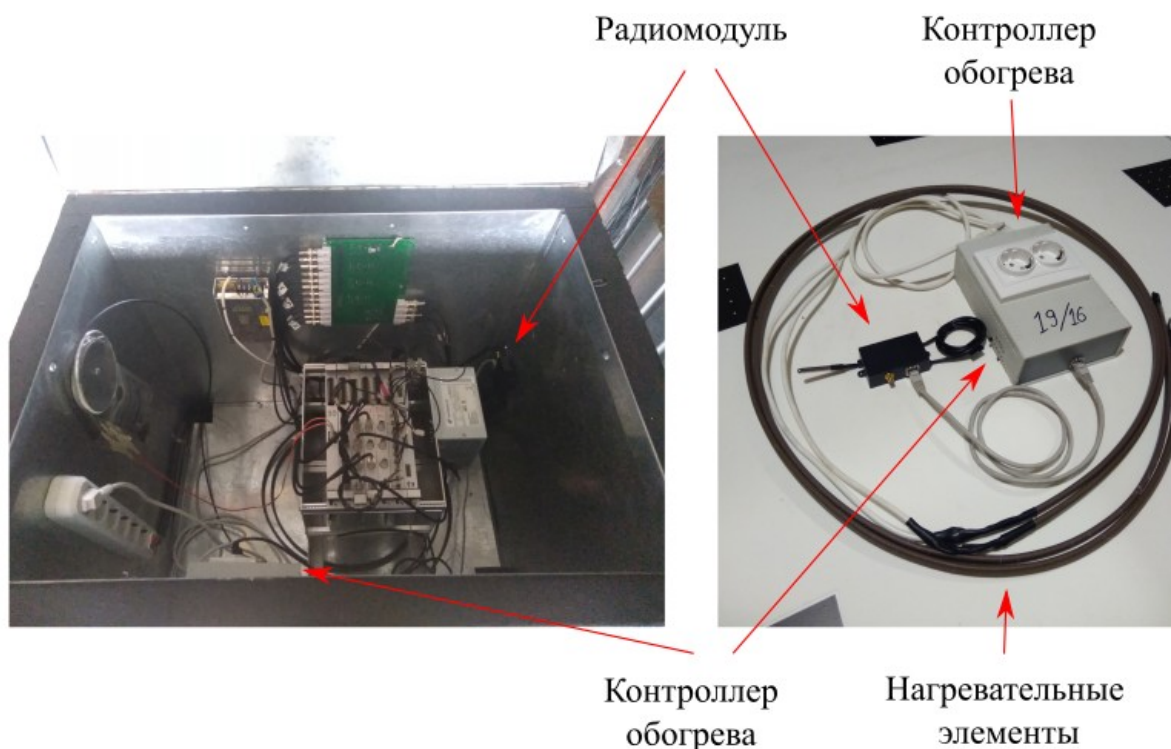


Рисунок 2.15 — Элементы системы управления и мониторинга станции.

В состав центральной системы входят радиомодуль XBee—PRO, выполняющий функцию координатора радиосети, и персональный компьютер, на котором находится главная программа системы управления и мониторинга.

2.4 Схема подключения сцинтилляционных счетчиков в станции

Станция включает в себя 20 сцинтилляционных счетчиков, в которых суммарно размещаются 22 ФЭУ. При этом система сбора данных имеет 4 модуля измерения формы сигналов, один из которых изначально использовался для задач установки Tunka-Rex. Очевидно, что 6 основных и 6 вспомогательных оставшихся каналов недостаточно для прямого подключения всех ФЭУ. Поэтому было реализовано решение, заключающееся в том, что 12 счетчиков наземной части станции разделены на две половины и подключены к двум основным и двум вспомогательным каналам через плату сумматоров. При этом выходы с коэффициентом передачи 10 соединены с основными каналами, с коэффициентом передачи 1 — с вспомогательными. Импульсы с дополнительных

двух ФЭУ, расположенных в центральных счетчиках, через входные линии сумматоров подземной части с коэффициентом 1 поступают на 2 вспомогательных канала. Необходимо отметить, что эти подключения формируют 3 динамических диапазона регистрации сигналов каждой станции. Счетчики подземной части разбиты на 4 пары и также через плату сумматоров соединены с четырьмя основными каналами. На рисунке 2.16 представлена схема подключения счетчиков в станции. Конфигурации для наземной части, выделенные черным и красными цветами, соответствуют разным периодам работы установки (см. раздел 3.5).

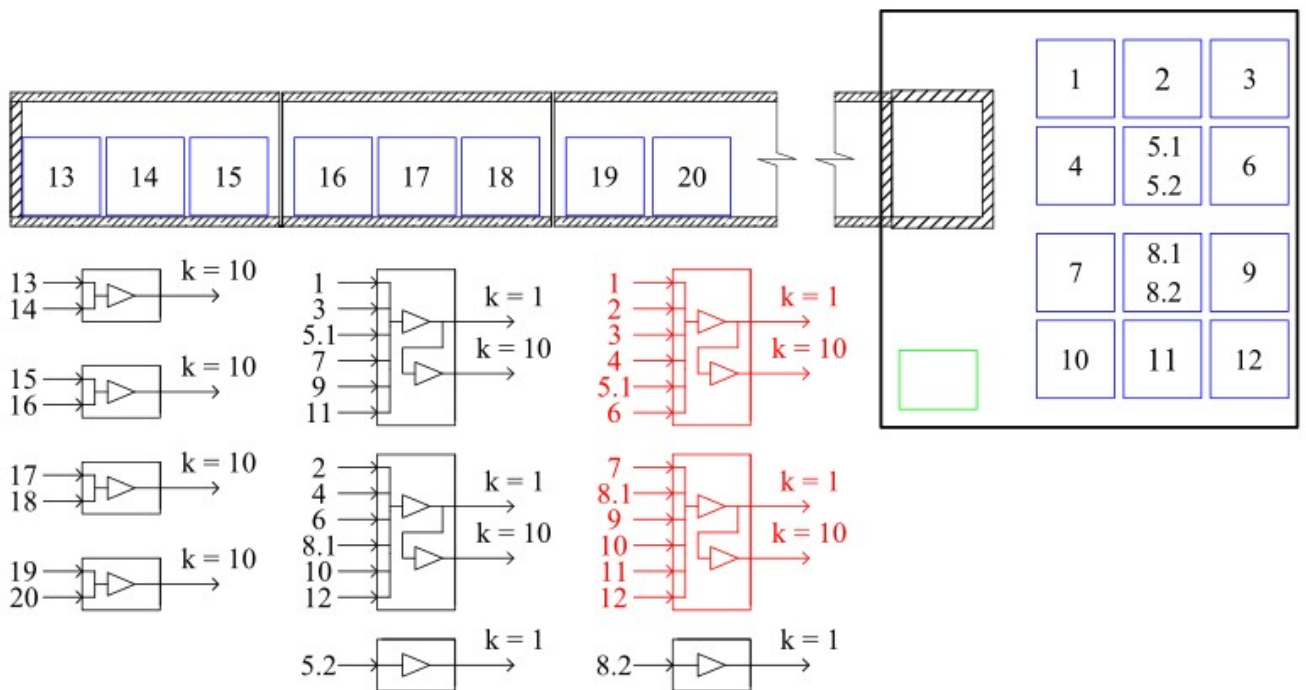


Рисунок 2.16 — Схема подключения счетчиков в станциях.

Глава 3. Ввод в эксплуатацию установки Tunka-Grande

После завершения строительно-монтажных работ в декабре 2015 г был начат процесс ввода в эксплуатацию установки Tunka-Grande. В рамках настоящей главы проведено описание методик тестирования, отладки и калибровки установки, а также результаты проведения тестовых сеансов наблюдений. Материалы главы опубликованы в работе [63].

3.1 Измеряемые параметры регистрируемых событий

Оцифрованные сигналы со станций передаются в ЦСД в виде осциллограмм (см. рисунок 3.1), каждой из которых присвоена временная метка и порядковый номер зарегистрированного события. Первый шаг в процессе обработки и анализа экспериментальных данных заключается в определении основных параметров осциллограмм, таких как:

1. Уровень базовой линии A_{BL} (пьедестал);
2. Отсчеты, соответствующие началу и концу импульса, T_S и T_E ;
3. Амплитуда и площадь импульса A и Q ;
4. Время регистрации событий T_{event} .

На рисунке 3.1 приведен пример оцифрованного сигнала со сцинтилляционного счетчика и его измеряемые характеристики. Уровень базовой линии A_{BL} представляет собой среднее амплитудных значений шумовой составляющей по предварительно заданному интервалу временных отсчетов и является величиной, относительно которой определяются все остальные параметры. Интервал всегда предшествует искомому импульсу и в зависимости от режима работы станций («ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» или «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР») лежит в диапазоне 0 — 200 отсчетов или 400 — 440 отсчетов. Различие связано с передаваемым со станций в ЦСД объемом кольцевых буферов модулей измерения формы сигналов и положением импульса в осциллограмме. Среднеквадратичное отклонение амплитудных значений σ_{BL} , которое также вычисляется при нахождении уровня базовой линии, используется в качестве критерия отбора событий и для контроля состояния шумов аппаратуры, кабельных линий связи

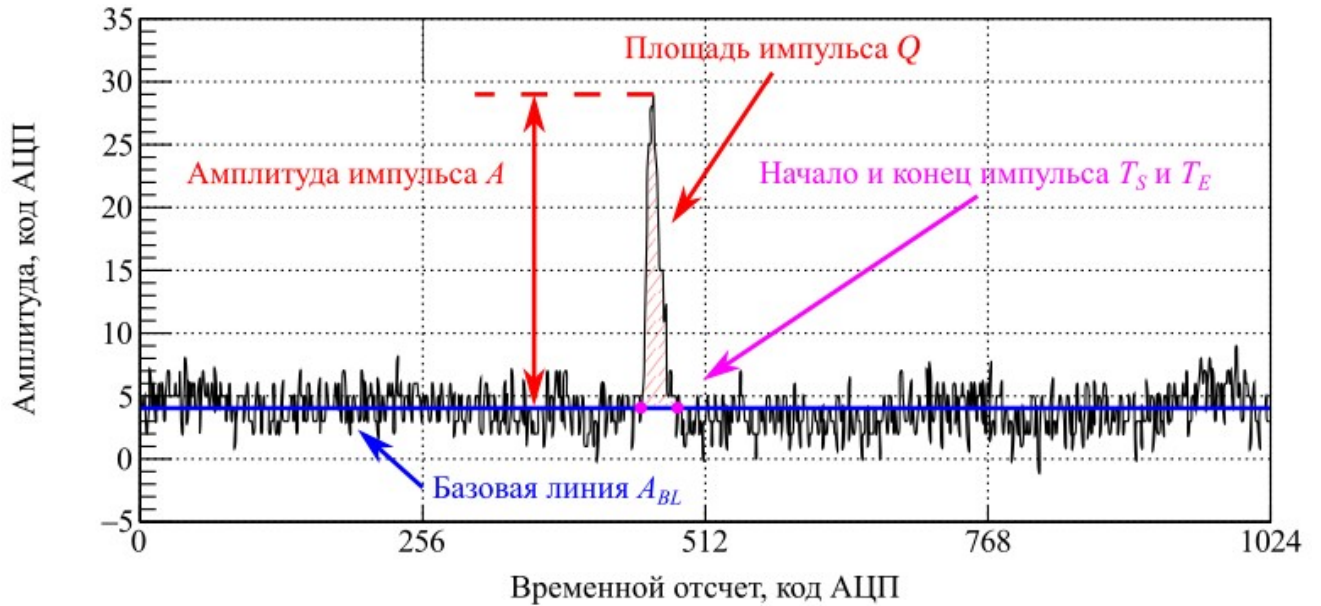


Рисунок 3.1 — Измеряемые параметры оциллограммы.

и ФЭУ. Временные отсчеты, соответствующие началу T_S и концу T_E импульса, представляют собой точки пересечения его передним и задним фронтами уровня базовой линии.

Амплитуда импульса A определяется следующим образом:

$$A = A_{max} - A_{BL}, \quad (3.1)$$

где A_{max} — максимальное значение импульса в оциллограмме. Условием отбора событий является превышение амплитуды A уровня $5\sigma_{BL}$.

Площадь импульса Q пропорциональна заряду ФЭУ и вычисляется согласно выражению:

$$Q = \Delta t \sum_{i=T_S}^{T_E} (A_i - A_{BL}), \quad (3.2)$$

где Δt — интервал временных отсчетов, A_i — значение амплитуды импульса в i -м временном отсчете. Связь между амплитудой и площадью показана на рисунке 3.2. Представленная зависимость аппроксимирована линейной функцией вида (Б.1) с параметрами p_0 и p_1 . Значение $A \approx 2000$ кодов АЦП соответствует пределу диапазона входных напряжений каналов модуля измерения формы сигналов (см. разделы 2.3 и 3.2).

При вычислении времени регистрации события T_{event} учитываются временной отсчет T_S , соответствующий началу импульса, присвоенное оциллограмме значение временной метки T_M и время распространения сигнала по

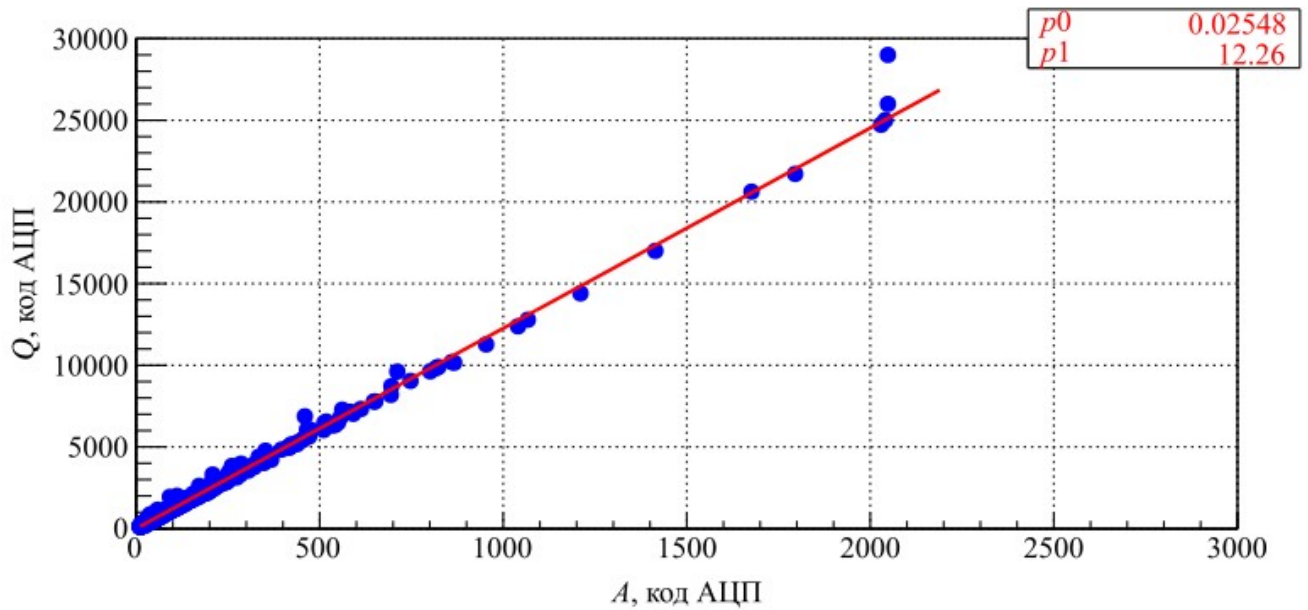


Рисунок 3.2 — График зависимости амплитуды A от площади Q импульса.

волоконно-оптическим линиям связи T_O :

$$T_{event} = t \cdot T_S + T_M + T_O, \quad (3.3)$$

где $t = 5$ нс. Значение T_O для отдельно взятой станции определяется средствами аппаратно-программного комплекса установки при каждом установлении ее соединения с аппаратурой ЦСД. В отличие от остальных вышеприведенных параметров время T_{event} измеряется не в аппаратных единицах (кодах АЦП), а в единицах времени (нс).

3.2 Передаточная характеристика модуля измерения формы сигналов

Модуль измерения формы сигналов является ключевым элементом системы сбора данных. Параметры и стабильность его работы напрямую влияют на достоверность получаемой информации. В рамках тестирования программно-аппаратного комплекса установки были определены передаточные характеристики модулей, пример одной из которых представлен на рисунке 3.3.

Для получения характеристик на измерительные каналы модулей от генератора сигналов подавались прямоугольные импульсы отрицательной по-

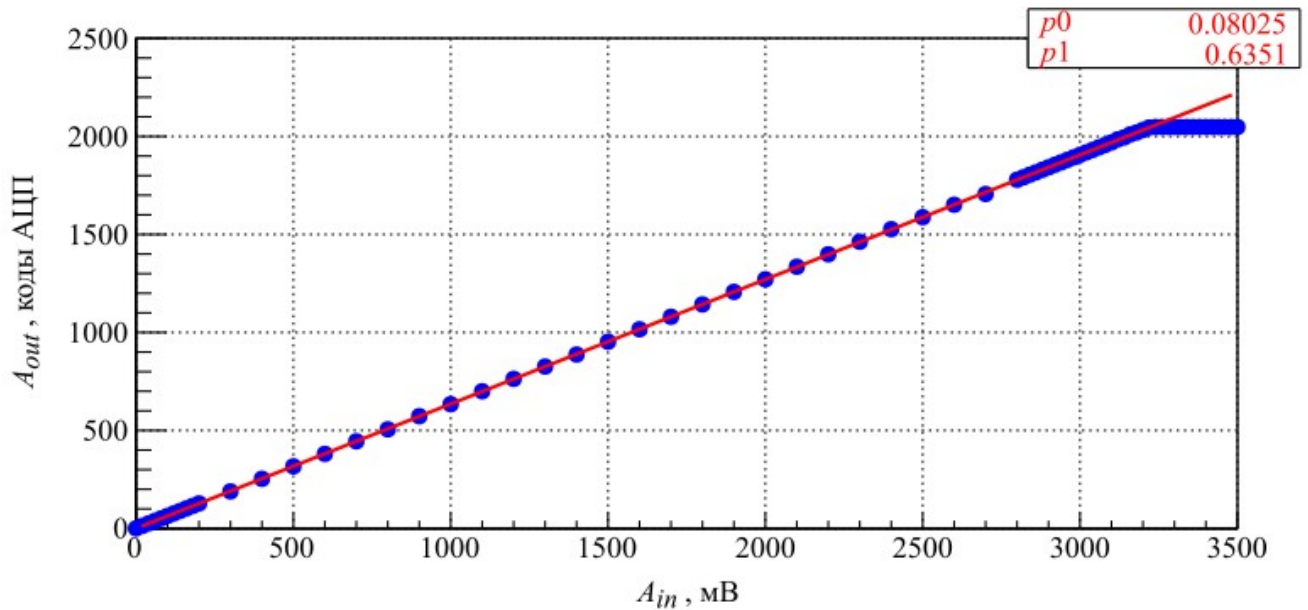


Рисунок 3.3 — Пример передаточной характеристики одного из каналов модуля измерения формы сигналов.

лярности длительностью 100 нс. Амплитуда импульсов A_{in} дополнительно контролировалась осциллографом (Tektronix TDS2024B) и в процессе проведения измерений увеличивалась на величину заданного шага: в интервале 20 — 200 мВ и 2800 — 3500 мВ это значение составляло 20 мВ, в диапазоне от 200 мВ до 2800 мВ — 100 мВ. При помощи аппаратно-программного комплекса установки Tunka-Grande определялась амплитуда выходного оцифрованного импульса A_{out} . Для каждого шага было набрано по 1000 событий. Полученные характеристики аппроксимировались линейной функцией вида (Б.1) с параметрами p_0 и p_1 . В ходе проведения измерений не было обнаружено эффектов, связанных с возможными интегральной или дифференциальной нелинейностями. Так, максимальное отклонение характеристик от значений их аппроксимирующих функций не превышает 5%. Независимо от используемого типа АЦП (AD9613 или AD9430) коэффициент преобразования p_1 составил ~ 0.64 код АЦП/мВ, максимально измеряемая амплитуда входного аналогового сигнала достигла значения ~ 3200 мВ.

3.3 Амплитудная калибровка сцинтилляционных счетчиков

Амплитудная калибровка в экспериментах, регистрирующих заряженную компоненту ШАЛ, необходима для обеспечения единого энергетического порога регистрации детекторов и перехода от измеряемых параметров сигналов к числу частиц. На установке Tunka-Grande для проведения калибровки сцинтилляционных счетчиков, в зависимости от динамического диапазона регистрации сигналов, было разработано 2 метода. Здесь необходимо отметить, что, начиная с этого раздела, амплитуда A и площадь импульса Q имеют индекс 1, 2 или 3 и соответствуют рассматриваемому динамическому диапазону.

3.3.1 Калибровка первого и второго динамических диапазонов

На этапе проектирования установки Tunka-Grande предполагалось, что первый динамический диапазон наземных частей станций будет предназначен для регистрации событий с числом заряженных частиц в интервале \sim от 1 до 100, второй диапазон — в пределах $\sim 10 - 1000$. Изначальной задачей калибровки первого диапазона являлось определение амплитуды импульсов, соответствующих прохождению вертикальных одиночных атмосферных мюонов через сцинтилляционные счетчики, и установке этих значений в единый для всех станций код АЦП. При этом предусматривалось, что связь между первым и вторым диапазонами будет однозначно определена коэффициентами передачи плат сумматоров. Поэтому отсутствовала необходимость создания отдельной методики калибровки для второго диапазона. Работа счетчиков подземных частей станций планировалась в одном динамическом диапазоне с числом регистрируемых частиц каждой пары детекторов в интервале \sim от 1 до 100. Процедура их калибровки предполагала полностью идентичную схему калибровки счетчиков наземных частей первого диапазона.

После окончания развертывания установки Tunka-Grande для определения уровня сигналов от одиночных атмосферных мюонов на одной из станций с использованием ее аппаратно-программного комплекса был проведен эксперимент, схематичное изображение которого приведено на рисунке 3.4. Поток

частиц в заданных направлениях, отмеченных зеленым, синим и красными цветами, регистрировался при помощи телескопа, состоящего из двух сцинтилляционных счетчиков №1 и №3. Счетчик №2 использовался для учета фоновых событий от ШАЛ. Всего было проведено 3 принципиальных измерения: детектирование общего потока вертикальных одиночных частиц (зеленые направляющие линии), выделение вертикального (синие направляющие линии) и наклонного, под зенитным углом $\theta \approx 45^\circ$ (красные направляющие линии) потока мюонов с энергией более 0.5 ГэВ. Условием регистрации события являлось одновременное срабатывание счетчиков №1 и №3. Порог регистрации по амплитуде сигнала для каждого счетчика был установлен на уровне 10 кодов АЦП и являлся минимальным для данной станции, при котором исключалось влияние шумов аппаратуры и кабельных линий связи. Временное окно совпадения составляло 100 нс, напряжение питания ФЭУ ~ 1600 В. Также во всех измерениях для каждого детектора были набраны данные в режиме самозапуска. Условием регистрации события в таком режиме работы являлось превышение амплитуды импульса со счетчика порога, установленного на уровне 10 кодов АЦП.

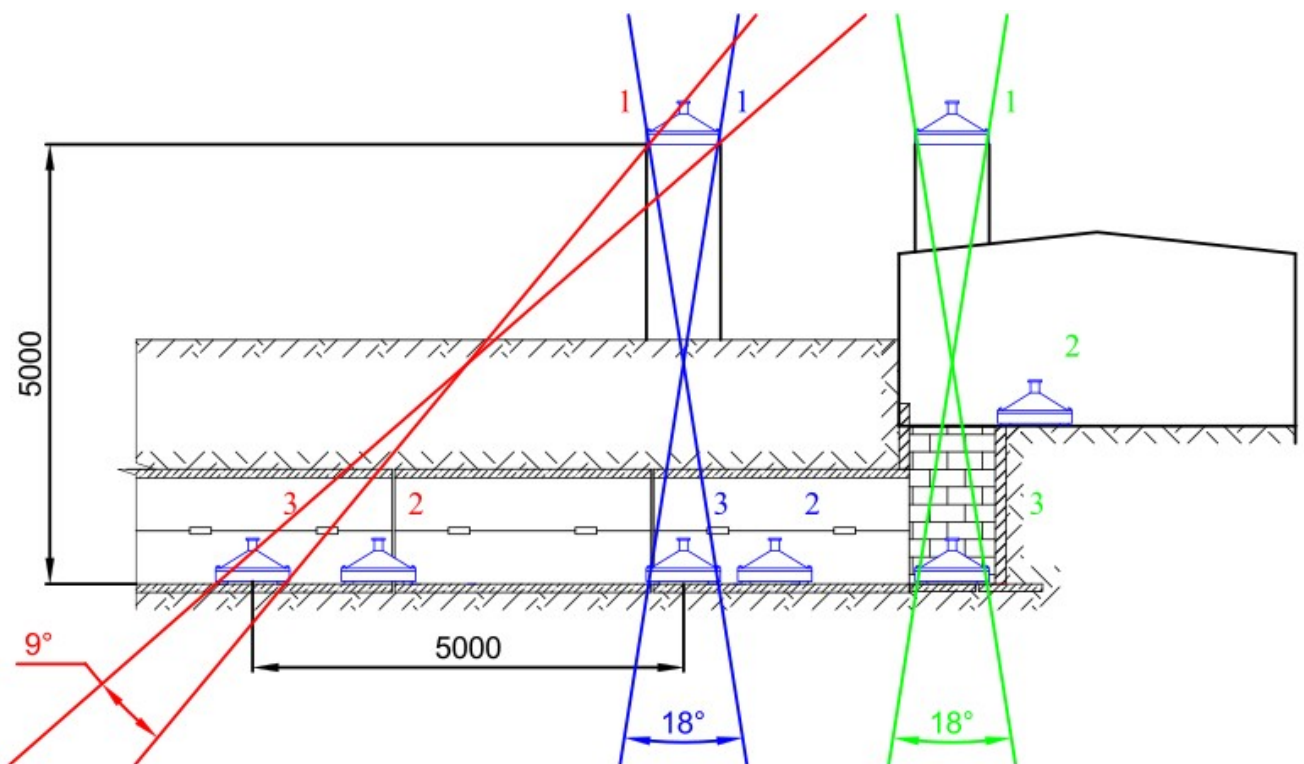


Рисунок 3.4 — Схема эксперимента. Размеры приведены в мм.

На рисунке 3.5 представлены результаты проведенного эксперимента в виде дифференциальных амплитудных распределений для счетчика №1, имеющих

характерный вид распределения Ландау [152] и в общем случае аппроксимированной функцией Мюллера [153] с параметрами C , μ и σ (см. формулу (Б.3)). Зеленая, синяя и красная гистограммы соответствуют цвету линий, определяющих направление прихода частиц в эксперименте. Черная гистограмма построена по данным, набранным в режиме самозапуска, и ее аппроксимирующая функция является составной (см. рисунок 3.6): правая часть также аппроксимирована функцией Мюллера, левая описана в предположении экспоненциального распределения амплитуд (см. формулу (Б.4)). Из приведенного рисунка 3.5 следует, что положение пиков гистограмм A_{MPV} (Most Probable Value), соответствующих общему потоку вертикальных частиц, вертикальному и наклонному потоку мюонов, зависит только от зенитного угла θ и определяется выражением:

$$A_{MPV}(\theta) = \frac{A_{MPV}(0)}{\cos \theta}, \quad (3.4)$$

где $A_{MPV}(0)$ — наиболее вероятное значение амплитуды при $\theta = 0^\circ$. Этот результат согласуется с тем фактом, что количество фотонов, излученных сцинтиллятором, пропорционально пройденному в нем пути заряженной частицы. В случае режима самозапуска отклик счетчика на искомые одиночные события описывается правой частью гистограммы и положение ее пика, согласно формуле (3.4), определяется углом $\theta \approx 30^\circ$. Таким образом для проведения калибровки отсутствует необходимость выделения именно вертикального направления. При этом за эквивалент одной заряженной частицы ШАЛ целесообразно принимать наиболее вероятное значение в таком амплитудном распределении и в дальнейшем при реконструкции параметров ШАЛ приводить это значение к вертикальному. Перечисленные утверждения справедливы для счетчиков как наземной, так и подземной частей станций.

Исходя из полученных результатов эксперимента была разработана методика амплитудной калибровки счетчиков подземных и наземных частей станций. В общем случае она заключается в наборе дифференциальных амплитудных распределений с каждого из 380 детекторов в режиме самозапуска при регистрации одиночных заряженных атмосферных частиц. Наиболее вероятное значение амплитуды A_{MPV} при помощи регулировки напряжения питания ФЭУ устанавливается на уровне 30 кодов АЦП. Порог регистрации при этом, в зависимости от станции, лежит в пределах $\sim 5 - 15$ кодов АЦП, напряжение

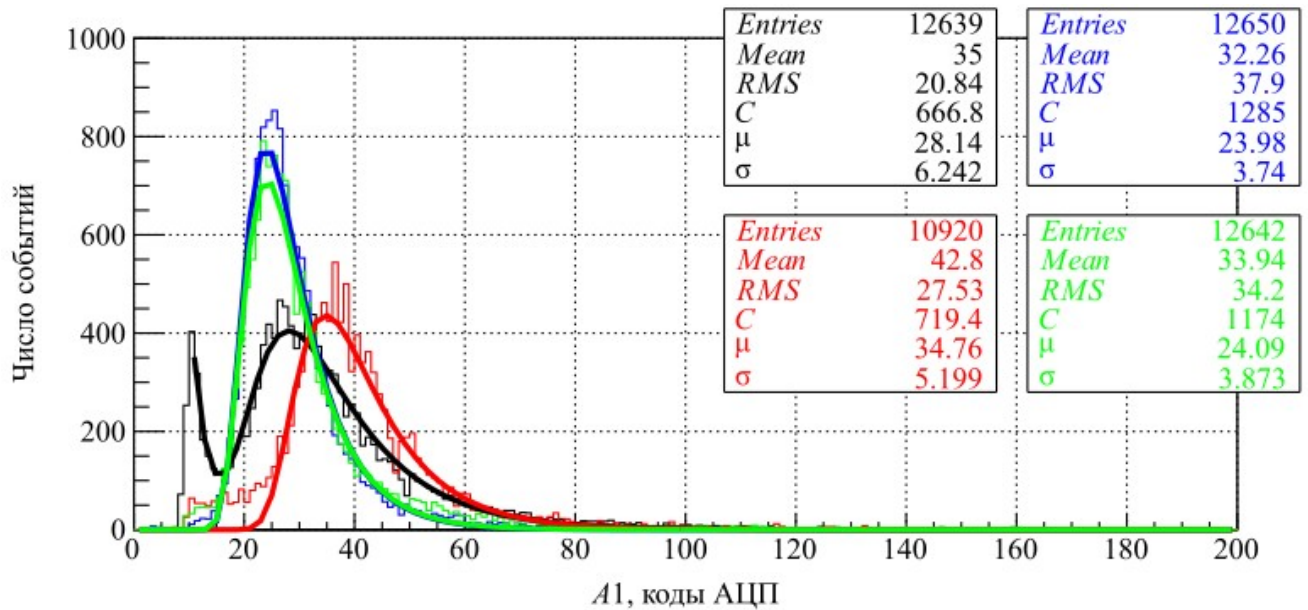


Рисунок 3.5 — Дифференциальные амплитудные распределения для сцинтиляционного счетчика №1. Зеленая гистограмма соответствуют общему потоку вертикальных одиночных частиц, синяя и красная гистограммы — вертикальному и наклонному потоку мюонов соответственно, черная гистограмма — данным, набранным в режиме самозапуска.

питания ФЭУ — в интервале $\sim 1300 - 1900$ В, а средний темп счета (количество зарегистрированных событий за единицу времени) составляет ~ 170 Гц и 120 Гц для счетчиков наземной и подземной частей соответственно. Процесс калибровки всех детекторов установки проводится не менее одного раза в год, либо в случае замены ФЭУ.

Еще одним важным результатом проведенных измерений является оценка интенсивности потока одиночных заряженных атмосферных частиц I на уровне наблюдения. Для этого был определен темп счета телескопа J при регистрации общего вертикального потока частиц (зеленые направляющие линии на рисунке 3.4) и вертикального потока мюонов (синие направляющие линии на рисунке 3.4). С учетом случайных срабатываний счетчиков и фоновых событий от ШАЛ темп счета в первом случае составил ~ 1.9 Гц, во втором ~ 1.3 Гц. Интенсивность потока вычислялась следующим образом:

$$I = \frac{J}{k}, \quad (3.5)$$

где $k \approx 0.016 \text{ м}^2 \text{ ср}^1$ — геометрический фактор телескопа. Таким образом интенсивность общего потока частиц составила $\sim 120 \text{ м}^2 \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}$, мюонов с энергией

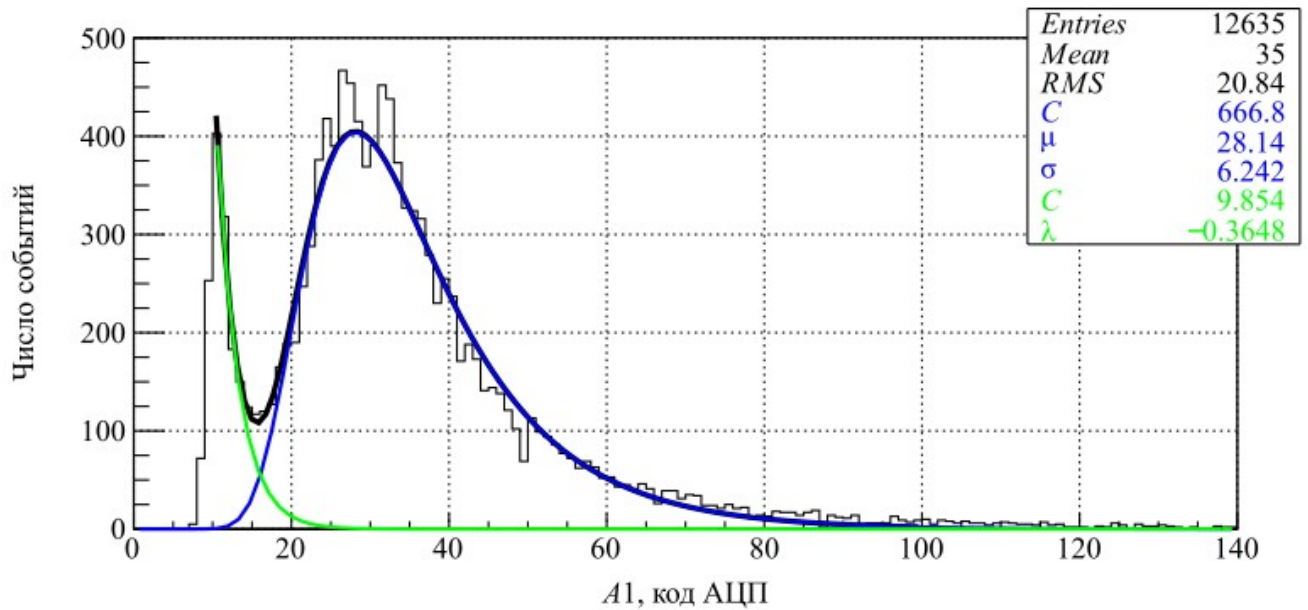


Рисунок 3.6 — Дифференциальное амплитудное распределение для сцинтилляционного счетчика №1 в режиме самозапуска.

более $0.5 \text{ ГэВ} \sim 80 \text{ м}^{-2}\text{ср}^{-1}\text{с}^{-1}$. Полученные значения достаточно хорошо согласуются с существующими представлениями [13; 154].

3.3.2 Калибровка третьего динамического диапазона

Дополнительные 2 ФЭУ, расположенные в центральных счетчиках каждой станции, формируют третий динамический диапазон. Коэффициент их усиления в ~ 10 раз меньше по сравнению со стандартным. Такое отношение достигается с помощью амплитудной калибровки, основанной на использовании наносекундного импульсного источника света [50] и регулировки напряжения питания ФЭУ (см. рисунок 3.7).

Принцип калибровки основан на том, что световые импульсы передаются во внутреннее пространство счетчика посредством волоконно-оптического кабеля. Частота их следования и мощность засветки задаются внешними генератором сигналов и источником питания. Кабель внутри счетчика направлен вертикально вниз, параллельно положению ФЭУ, и на фотокатод каждого из них поступают отраженные от стенок кожуха фотоны. Для минимизации возможного влияния эффекта неоднородности светосбора счетчиков на конце

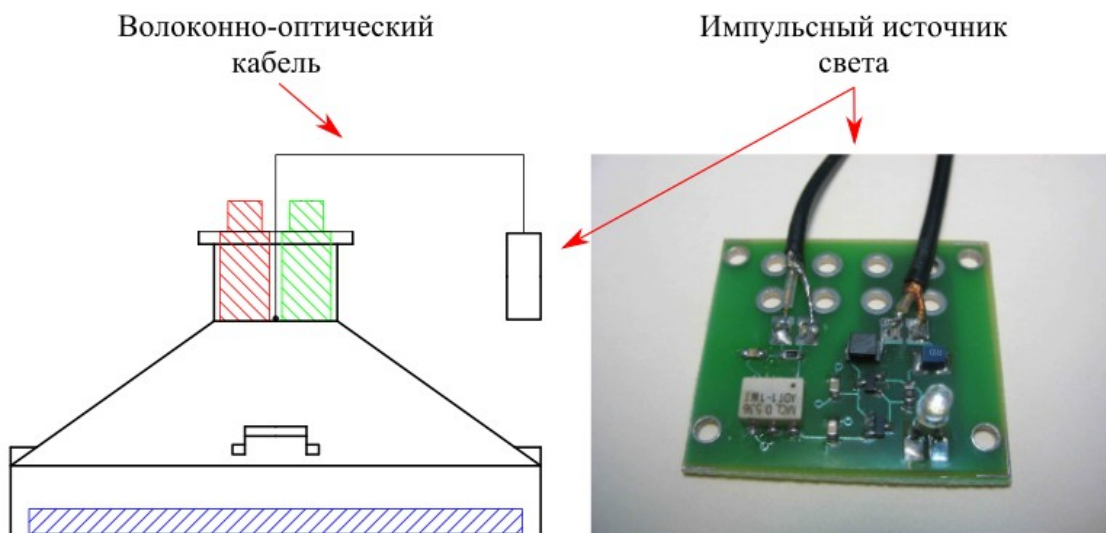


Рисунок 3.7 — Схема проведения калибровки.

кабеля располагается рассеиватель, изготовленный из белого матового органического стекла. На первом этапе калибровки производится набор данных, по которым 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 3.8 показаны примеры таких амплитудных распределений. Приведенные гистограммы аппроксимированы функцией Гаусса с параметрами C , μ и σ (см. формулу (Б.5)). Как и в случае первого и второго диапазонов процесс калибровки третьего диапазона проводится не менее одного раза в год, либо в случае замены ФЭУ.

3.3.3 Спектр плотностей ШАЛ

Спектром плотностей ШАЛ называется частота появления событий, у которых плотность частиц в данном месте находится в интервале от ρ до $\rho + \Delta\rho$. Экспериментально эта величина определяется независимо от размеров ливня и положения его оси. С точки зрения амплитудной калибровки установки Tunka-Grande спектр плотностей может быть использован как критерий оценки качества ее проведения.

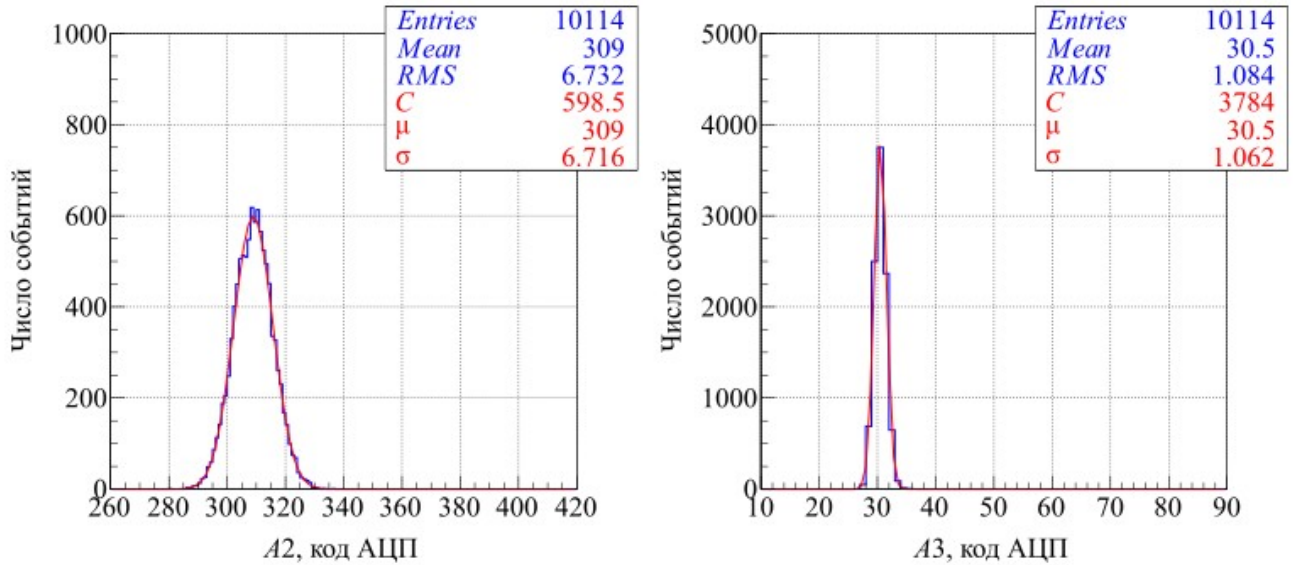


Рисунок 3.8 — Пример дифференциальных амплитудных распределений для скинтилляционного счетчика, соответствующих второму (слева) и третьему (справа) динамическим диапазонам.

На рисунке 3.9 показан пример спектра плотностей ШАЛ наземной части отдельно взятой станции после проведения ее калибровки. Экспериментальные данные получены во время тестовых сеансов наблюдений в режиме работы установки «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР». События отобраны с условием дополнительной регистрации ШАЛ не менее, чем одной соседней станцией. Время набора данных составляет ~ 220 ч. Указанные на рисунке динамические диапазоны разбиты на две группы и соответствуют двум половинам счетчиков. В качестве измеряемого параметра сигналов от детекторов используется площадь импульса Q .

Из рисунка 3.9 следует, что разработанные методики амплитудной калибровки и реализованная конфигурация динамических диапазонов являются весьма эффективными для задач установки Tunka-Grande. Предельная плотность частиц ШАЛ в линейной области динамических диапазонов составляет ~ 20 , 200 и 12000 частица/ m^2 соответственно.

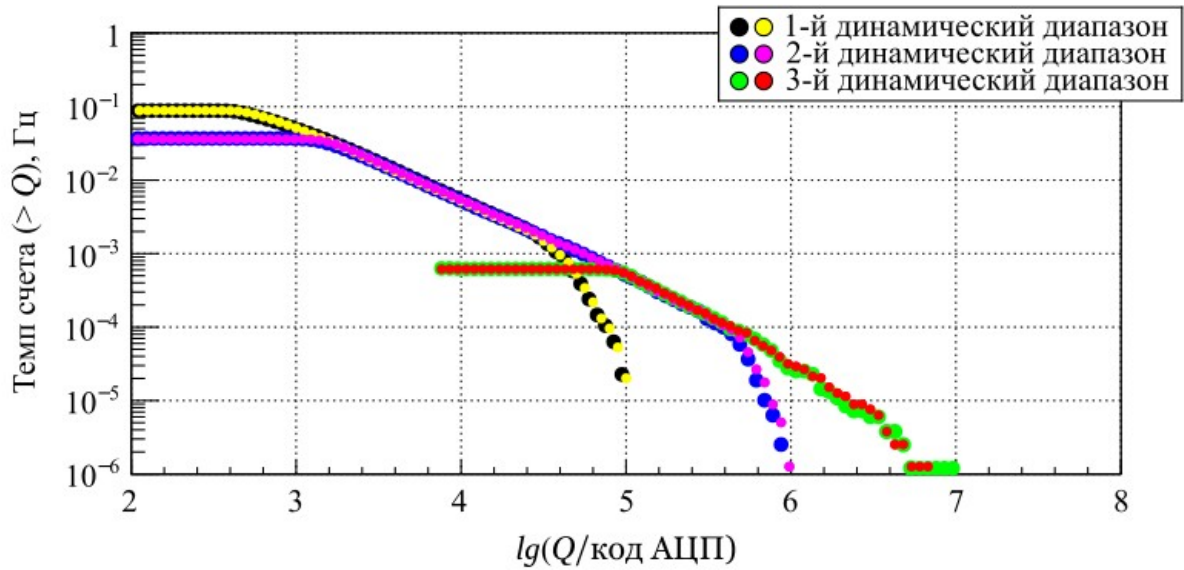


Рисунок 3.9 — Спектр плотностей ШАЛ наземной части станции после проведения амплитудной калибровки сцинтилляционных счетчиков.

3.4 Ограничение на темп счета станций

В рамках проведения тестовых сеансов наблюдений на установке Tunka-Grande было обнаружено, что максимальный темп счета станций зависит от их удаленности относительно ЦСД. Также было установлено, что эта закономерность обусловлена характеристиками регистрационной аппаратуры и применяемым протоколом передачи данных, в качестве которого используется протокол TCP (Transmission Control Protocol).

При выполнении программно заданного триггерного условия модуль управления отдельно взятой станции инициирует процесс установки соединения с аппаратурой ЦСД. Затем следуют процедуры отправки служебной информации модуля управления станцией и данных кольцевых буферов модулей измерения формы сигнала, и завершения соединения. Основным объемом передаваемых данных является содержимое буферов, представляющих собой последовательность 16-битных машинных слов. Их общее количество, в расчете на один буфер, составляет 1024. В составе модуля управления станцией не предусмотрено наличие буферной памяти для хранения большого объема информации, поэтому чтение данных модулей измерения формы сигналов осу-

ществляется по одному слову. Формируемые при этом для отправки в ЦСД ТСР-пакеты содержат по 2 байта данных и их итоговое количество зависит от числа запрашиваемых Хостом слов и каналов модулей измерения формы сигналов. Следует также отметить, что согласно протоколу ТСР процедура передачи каждого следующего пакета сопровождается приемом ответа с подтверждением получения предыдущего. В ЦСД Хост собирает всю информацию и после завершения соединения отправляет ее на ПК системы сбора данных и временной синхронизации. В этом случае вся передача осуществляется двумя ТСР-пакетами. Таким образом максимальный темп счета отдельно взятой станции в значительной степени зависит от времени передачи данных T_T , которое, в свою очередь, определяется временем распространения сигнала в волоконно-оптической линии связи T_O , количеством передаваемых слов N_W , в расчете на один буфер, и числом опрашиваемых каналов модулей измерения формы сигналов N_C :

$$T_T = 2T_O \cdot N_W \cdot N_C. \quad (3.6)$$

Длина волоконно-оптической линий связи и время распространения сигнала от ЦСД до отдельно взятой станции T_O , определяемое средствами аппаратно-программного комплекса установки при каждом установлении соединения, приведены в таблице 1. Наибольшая длина линии связи достигает величины 566 м, и для станции №12 предельный темп счета согласно формуле (3.6) при максимальных значениях $N_W = 1024$ и $N_C = 16$ составляет ~ 11 Гц. Это значение, в пределах погрешности ~ 1 Гц, обусловленной дополнительной передачей служебной информации и техническими характеристиками аппаратуры, также подтверждается экспериментально. Необходимо подчеркнуть, что функционал аппаратно-программный комплекса установки Tunka-Grande предусматривает возможность запроса со станций произвольного количества машинных слов и каналов модулей измерения формы сигналов.

3.5 Условия выработки триггера станций

Каждая станция в своем составе имеет 4 модуля измерения формы сигналов, один из которых изначально был предназначен для решения задач

Таблица 1 — Характеристики волоконно-оптической линии связи.

Номер станции	Длина линии, м	Время распространения сигнала, нс
1	67	335
2	314	1570
3	368	1840
4	368	1840
5	341	1705
6	297	1485
7	273	1365
8	536	2680
9	535	2677
10	537	2685
11	538	2690
12	566	2830
13	557	2785
14	555	2775
15	510	2550
16	445	2225
17	518	2590
18	459	2295
19	502	2510

установки Tunka-Rex. В режиме работы «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» условие регистрации события заключается в наличии сигналов от ШАЛ во временном окне 500 нс на выходе каждого из двух сумматоров, соответствующих первому динамическому диапазону. Это решение позволяет эффективно подавлять фоновые события от одиночных частиц и случайных срабатываний аппаратуры. С момента создания установки и до настоящего времени было реализовано две схемы подключения счетчиков к сумматорам (см. рисунок 2.16) с использованием разных порогов регистрации по амплитуде сигнала. Первый вариант был применен с 2016 по 2017 гг и предполагал шахматный порядок подключения с порогом, установленном в 15 код АЦП. В случае выполнения триггерного условия на станции осуществлялась процедура отправки данных в ЦСД со всех 16 каналов модулей измерения формы сигнала. При этом для трех модулей $N_W = 200$ (чтение содержимого кольцевых буферов производилось с 400 по 600 отсчеты), для модуля установки Tunka-Rex $N_W = 1024$. В процессе обработки и анализа данных было обнаружено, что число потерянных событий на

отдельных периферийных станциях достигало 50% от ожидаемого количества. Для уменьшения эффекта мертвого времени с 2017 г порог регистрации на всех станциях, за исключением станции №2, был установлен в 30 код АЦП. Это решение позволило снизить число теряемых событий до 10% при темпе счета станций ~ 10 Гц. На рисунке 3.10 показан пример спектра временных интервалов зарегистрированных событий одной из станций внешнего круга при пороге регистрации 15 и 30 кодов АЦП.

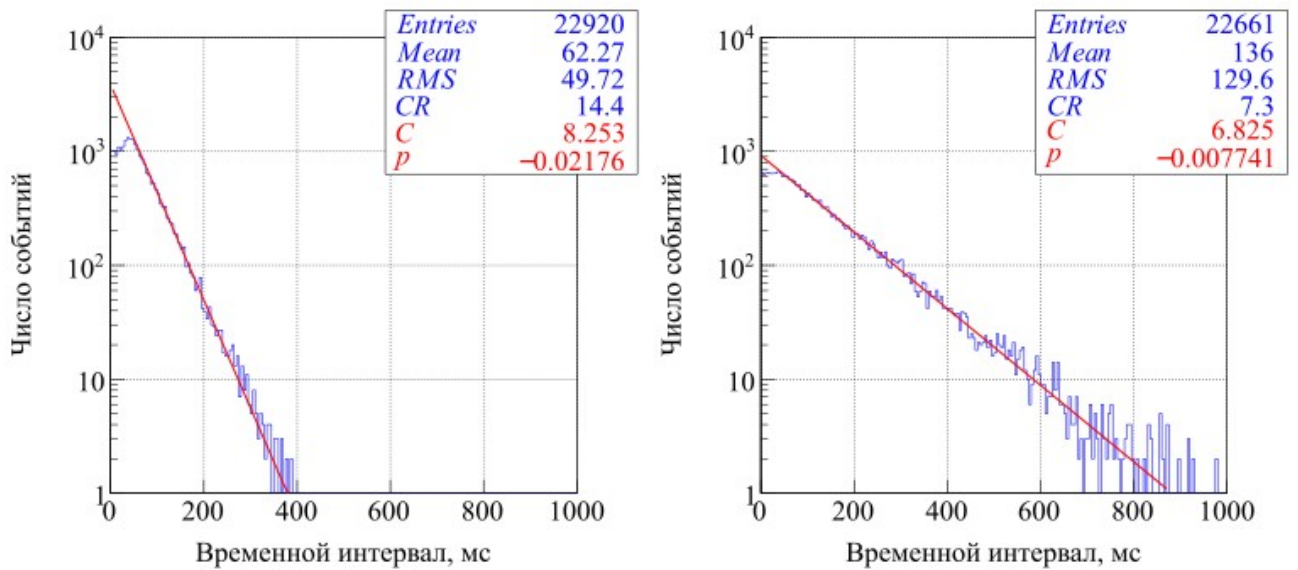


Рисунок 3.10 — Спектр временных интервалов зарегистрированных событий отдельно взятой периферийной станции при пороге регистрации 15 (слева) и 30 (справа) кодов АЦП.

Приведенные на рисунке 3.10 спектры предполагают пуассоновский характер распределения и аппроксимированы экспоненциальной функцией вида (Б.4) с параметрами C и p . Фактический средний темп счета CR зарегистрированных событий в первом случае составил 14.4 Гц, во втором — 7.3 Гц. При этом ожидаемые средние темпы счета, определенные при помощи аппроксимации, имеют значения ~ 22 Гц и 7.7 Гц соответственно. Основной объем потерянной информации обусловлен временем передачи данных кольцевых буферов модулей измерения формы сигналов по волоконно-оптической линии связи.

Увеличение порога регистрации с одной стороны позволило уменьшить число теряемых событий, с другой — привело к ошибкам при определении наиболее вероятного значения в дифференциальных амплитудных распределениях

со станций, принятого за эквивалент одной заряженной частицы ШАЛ (см. рисунок 3.11). Описание процесса поиска этого значения приведено в разделе 4.1.

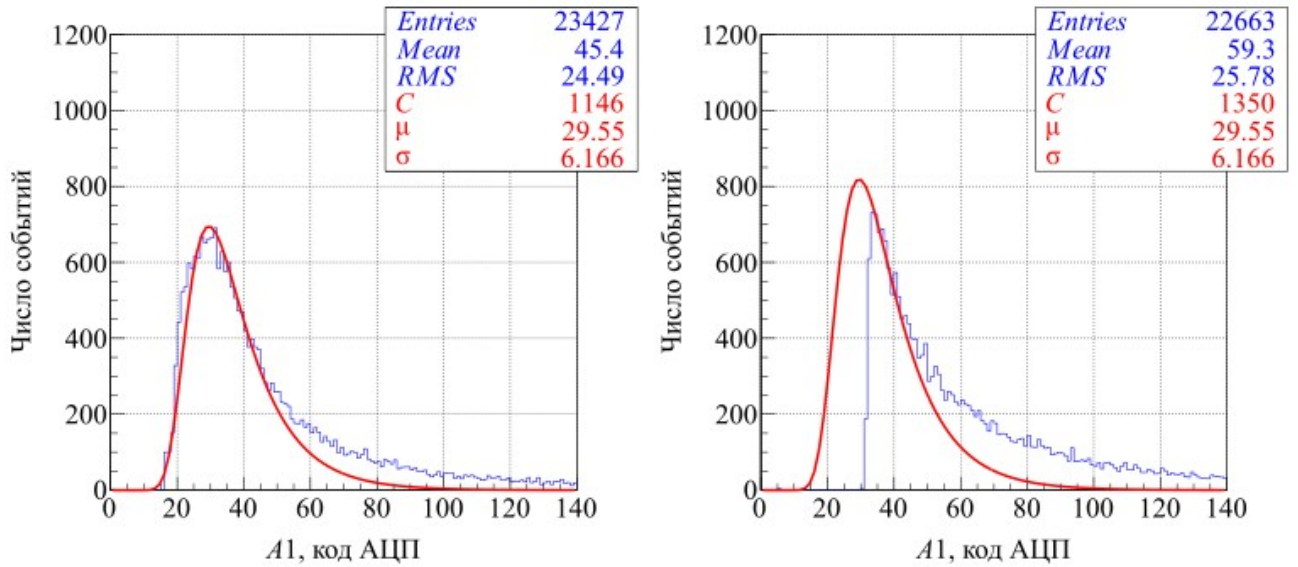


Рисунок 3.11 — Пример дифференциального амплитудного распределения зарегистрированных событий для отдельно взятой станции при пороге срабатывания 15 (справа) и 30 (слева) кодов АЦП.

Для определения оптимальной схемы подключения с возможностью понижения порога регистрации без потери данных в 2021 г был проведен эксперимент, задачей которого являлось изучение зависимости темпа счета совпадений двух счетчиков от расстояния между ними. Детекторы располагались на одном горизонтальном уровне и в процессе проведения измерений разносились друг относительно друга на величину заданного шага: в интервале 0 — 2 м это значение составляло 50 см, в диапазоне от 2 м до 5 м — 100 см. Порог регистрации по амплитуде был установлен в 10 код АЦП и являлся минимальным, при котором исключалось влияние шумов аппаратуры и кабельных линий связи. Временное окно совпадения составляло 500 нс, напряжение питания ФЭУ ~ 1600 В. В ходе проведения эксперимента значительное уменьшение потока событий произошло уже на расстоянии 50 см по сравнению с вариантом расположения счетчиков в непосредственной близости друг от друга. В связи с этим в 2021 г без изменения конструкции наземных частей станций была реализована вторая схема подключения, при которой счетчики были разделены на зеркально симметричные половины с расстоянием ~ 30 см между ними. Порог регистрации был установлен на уровне 15 код АЦП. Дополнительно для

уменьшения времени передачи данных в ЦСД модули измерения формы сигналов установки Tunka-Rex были отключены от системы сбора данных установки Tunka-Grande, для остальных модулей $N_W = 200$ (чтение содержимого кольцевых буферов производится с 400 по 600 отсчеты). Число потерянных событий при новой схеме составляет менее 5% от ожидаемого количества при темпе счета станций ~ 10 Гц. На рисунке 3.12 представлен результат проведения эксперимента и спектр временных интервалов зарегистрированных событий одной из периферийных станций при новой схеме подключения.

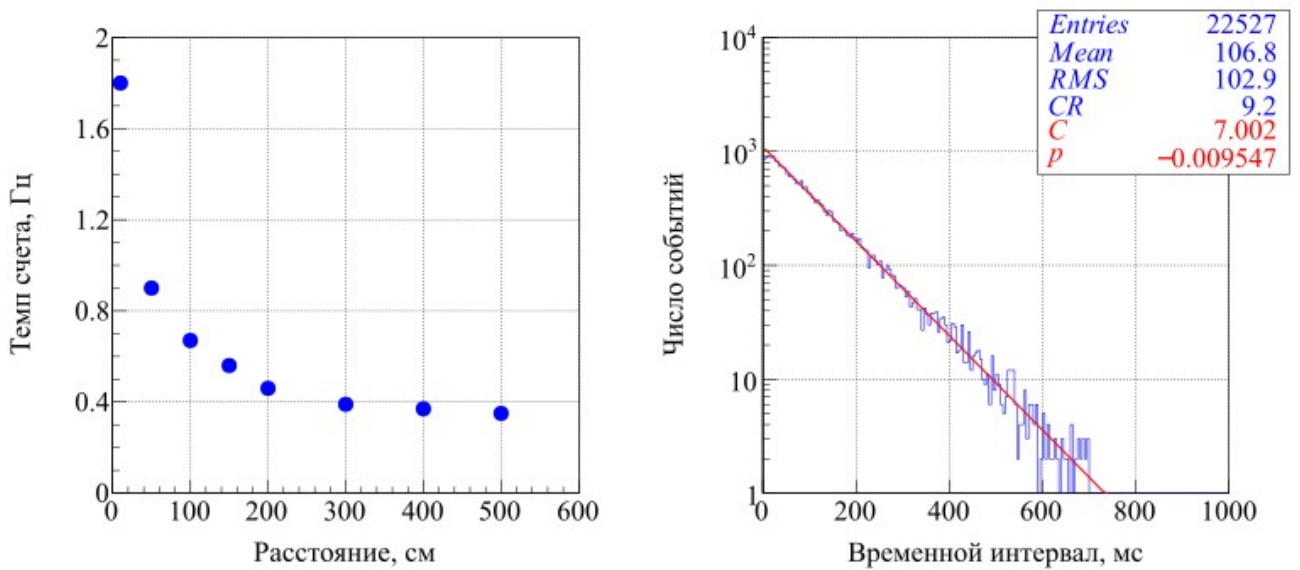


Рисунок 3.12 — Результат эксперимента (слева) и спектр временных интервалов зарегистрированных событий с отдельно взятой периферийной станции при новой схеме подключения счетчиков (справа).

В режиме работы «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» условием срабатывания отдельно взятой станции является регистрация события ближайшим кластером установки Тунка-133. Передача информации в ЦСД производится с заданными параметрами $N_W = 1024$ и $N_C = 16$. Темп счета станций определяется темпом счета кластеров и составляет величину ~ 0.1 Гц. При таком потоке событий потеря данных из-за эффекта мертвого времени аппаратно-программного комплексов установок Тунка-133 и Tunka-Grande минимальны.

3.6 Временная синхронизация станций

Точность системы временной синхронизации в режиме работы установки «ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ» была проверена экспериментально. В центры окружностей, образованных тремя ближайшими друг к другу станциями, помещался генератор сигналов. Через коаксиальные кабели длиной 150 м каждый на эти станции одновременно подавались импульсы для запуска их систем сбора данных. Время регистрации событий вычислялось по формуле (3.3). Результатом проведения измерений является подтверждение того, что синхронизация станций осуществляется с заявленной точностью 10 нс.

3.7 Проведение сеансов наблюдений

С точки зрения проведения сеансов наблюдений основным недостатком 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». Проведение штатных сеансов включает в себя 4 основных этапа. На первом, перед началом измерений, осуществляется проверка работоспособности станций путем установки их соединения с аппаратурой ЦСД. Далее, на втором этапе, для контроля состояния и стабильности работы счетчиков и шумовой составляющей измерительных каналов станций 1 раз в сутки производится автоматическая процедура определения среднего темпа счета событий с каждого счетчика в режиме самозапуска. Время накопления данных с одного детектора в станции составляет 30 с, общее время выполнения процедуры ~ 1 ч. На третьем этапе запускается сеанс измерений. Для контроля состояния и стабильности работы станций каждые 2 мин в режиме «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» и каждые 15 мин в режиме «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР» вычисляются их средние темпы счета. После завершения сеанса в режиме «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» проводится процесс предобработки, который заключается в отборе событий зарегистриро-

ванных не менее двумя станциями. Это позволяет сократить полученный объем экспериментальных данных в ~ 100 раз. Предобработка событий, набранных режиме «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР», не проводится вследствие изначально низкого потока данных.

Глава 4. Реконструкция параметров ШАЛ и КЛ по данным установки Tunka-Grande

Глава посвящена описанию процедуры 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 [57; 59; 63; 64].

4.1 Первый этап реконструкции параметров ШАЛ

На основе зарегистрированных установкой Tunka-Grande событий проводится реконструкция следующих параметров ШАЛ и КЛ:

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} ;
7. Энергия КЛ E .

Процедура реконструкции [47—49] была разработана на этапах проектирования и создания установки Tunka-Grande на базе успешного опыта работы эксперимента ШАЛ-МГУ. В настоящее время, без значимых изменений, она применяется для всех зарегистрированных событий. Процедура включает в себя 3 этапа. На первом этапе для каждого ливня определяются общее количество сработавших станций во временном окне 5 мкс и плотность частиц в их наземных и подземных частях. Затем по полученным данным, если число станций составляет не менее трех, вычисляются нулевое приближение для направления прихода оси ливня, координат ее положения в плоскости установки и полного числа частиц электрон-фотонной компоненты ШАЛ. Ключевым элементом при нахождении N_E и дальнейшей процедуры являются функции пространственного распределения частиц (ФПР). На втором и третьем этапах при помощи выбранных ФПР, а также метода максимального правдоподобия производится

уточнение полученных ранее параметров. Помимо этого определяются возраст ливня, плотность частиц на расстоянии 200 м от его оси и полное число мюонов в ШАЛ. В том случае, если на втором или третьем шаге не удастся восстановить какой-либо параметр, то он принимается равным значению, найденному на предыдущем этапе.

4.1.1 Плотность зарегистрированных частиц ШАЛ

Плотность зарегистрированных частиц в наземных ρ_E и подземных ρ_M частях станций определяется следующими выражениями:

$$\rho_{Ei} = \frac{1}{S_{Ei}} \sum_{j=1}^2 \frac{Q_{i,j} \cdot k}{Q_{MPVi,j}}, \quad (4.1a)$$

$$\rho_{Mi} = \frac{1}{S_{Mi}} \sum_{j=1}^4 \frac{Q_{i,j}}{Q_{MPVi,j}}, \quad (4.1b)$$

где i — номер станции; j — номер половины наземной или пары сцинтилляционных счетчиков подземной частей станции; Q — площадь импульса; Q_{MPV} — значение площади импульса, соответствующее прохождению через счетчик одной заряженной частицы ШАЛ; k — коэффициент перехода между динамическими диапазонами регистрируемых сигналов; S_E и S_M — суммарная площадь счетчиков наземной и подземной частей станции.

За эквивалент одной заряженной частицы ШАЛ для наземных частей станций до 15 ноября 2017 г и с 1 октября 2021 г принимается наиболее вероятное значение в дифференциальном распределении площадей импульсов первого динамического диапазона. В период, когда порог регистрации по амплитуде импульса был установлен в 30 код АЦП, поиск этого значения заключается в нормировке интегральных спектров событий измерительных каналов станций на интегральный спектр событий первого канала станции №2 (см. раздел 3.5) и нахождении соответствующих коэффициентов связи $m_{i,j}$ при фиксированной интенсивности ШАЛ (см. рисунок 4.1):

$$Q_{MPVi,j} = Q_{MPV32,1} \cdot m_{i,j} = Q_{MPV32,1} \cdot \frac{Q_{Fi,j}}{Q_{F2,1}}, \quad (4.2)$$

где i — номер станции, j — номер половины наземной части станции, Q_F — значение площади импульса при фиксированной интенсивности ШАЛ.

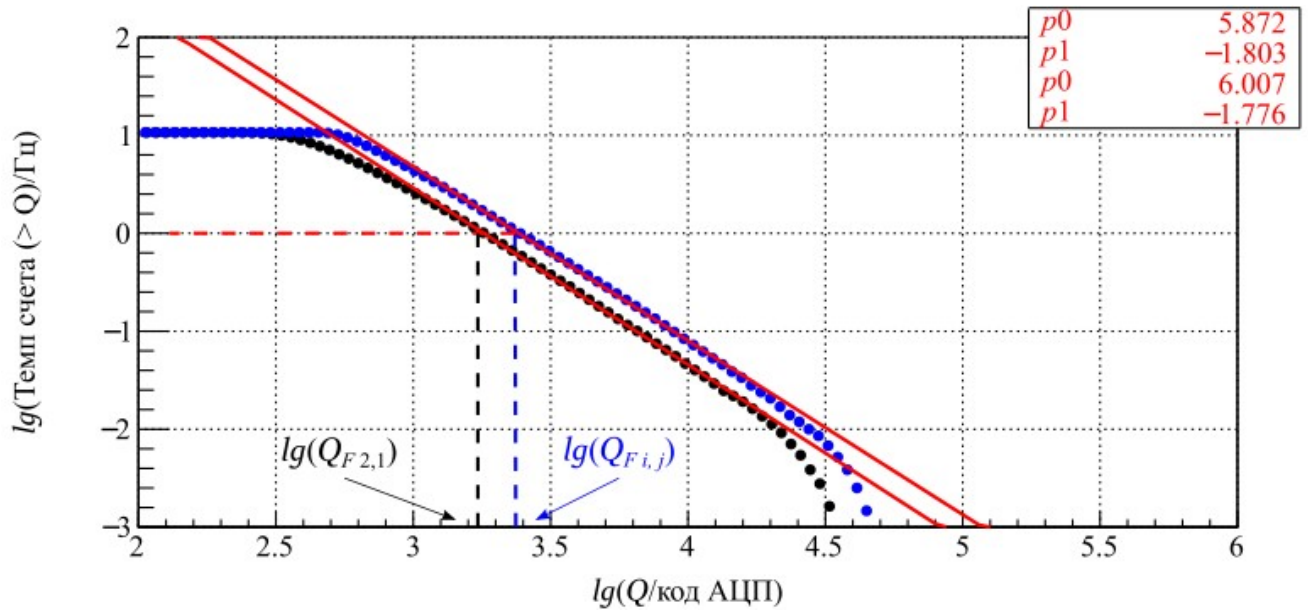


Рисунок 4.1 — Пример спектра плотностей ШАЛ отдельно взятой станции и станции №2. К пояснению отношения (4.2).

Приведенные на рисунке 4.1 спектры плотностей ШАЛ аппроксимированы функцией вида (Б.2) с параметрами p_0 и p_1 . Значение параметра $p_1 \approx -1.8$ характерно для всех наземных частей станций установки Tunka-Grande и не противоречит существующим представлениям [13]. Для пар счетчиков подземных частей станций определение эквивалента одной заряженной частицы не зависит от периода работы установки и состоит в нахождении наиболее вероятного значения в дифференциальном распределении площадей импульсов.

Принцип вычисления коэффициентов перехода между динамическими диапазонами регистрируемых сигналов графически показан на рисунке 4.2. Он заключается в построении зависимости значений площадей импульсов в области взаимного перекрытия диапазонов с применением аппроксимации вида (Б.1) с параметрами p_0 и p_1 . Значение $Q \approx 25000$ кодов АЦП на оси ординат соответствует пределу диапазона входных напряжений измерительных каналов модуля измерения формы сигналов (см. рисунок 3.2).

Суммарная площадь счетчиков наземной части станции при стабильной работе всех детекторов составляет 7.68 м^2 при регистрации событий по первому или второму динамическим диапазонам и 1.28 м^2 в случае третьего диапазона. Площадь подземной части $S_M = 5.12 \text{ м}^2$.

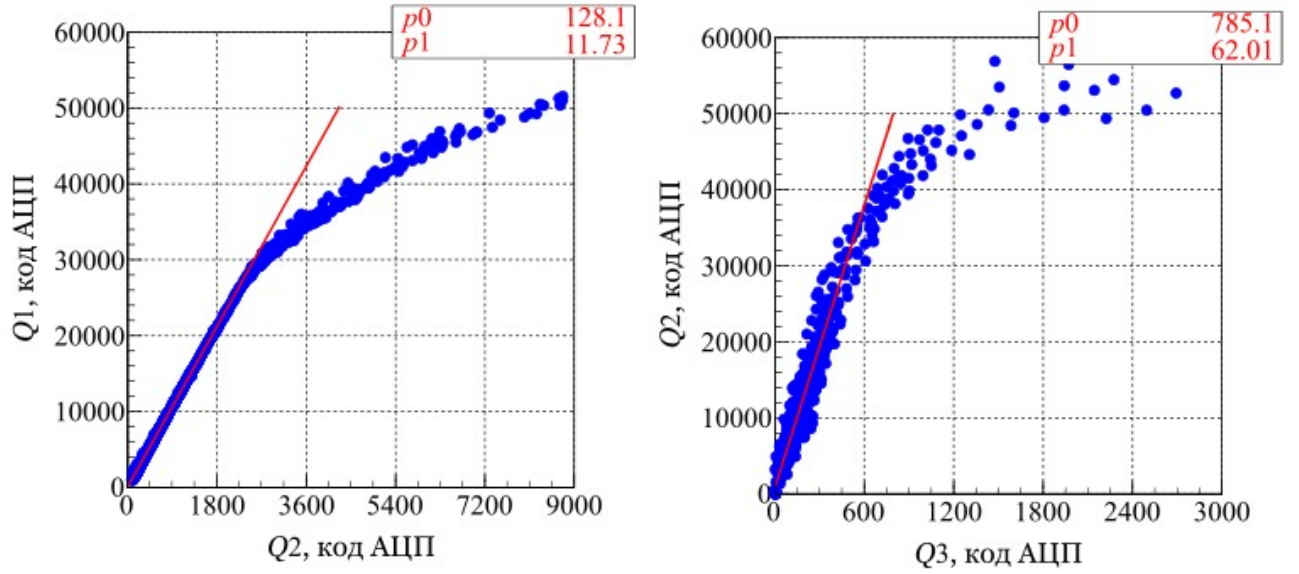


Рисунок 4.2 — Значения площадей импульсов зарегистрированных событий в зависимости от используемых динамических диапазонов на примере отдельно взятой станции.

4.1.2 Направление прихода оси ШАЛ

Нулевое приближение для зенитного и азимутального углов прихода оси ШАЛ восстанавливается в предположении плоского фронта ливня по времени срабатывания трех наземных частей станций, которые имеют наибольшую зарегистрированную плотность частиц и оптимальную геометрию. Для этого составляются уравнения вида:

$$c \cdot (T_{event\ i} - T_0) = X_i \cdot \alpha + Y_i \cdot \beta + Z_i \cdot \gamma, \quad (4.3)$$

где c - скорость света; i — номер станции; T_{event} - время регистрации события (см. формулу (3.3)); T_0 — время, соответствующее началу события; X , Y и Z — координаты положения наземной части станции; α , β и γ — направляющие косинусы, связанные с направлением прихода оси ШАЛ:

$$\alpha = \sin \theta \cdot \cos \varphi, \quad (4.4a)$$

$$\beta = \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad (4.4б)$$

$$\gamma = \cos \theta. \quad (4.4в)$$

Решение системы уравнений (4.3) состоит в нахождении числовых значений α , β и γ [52], через которые затем рассчитываются искомые углы:

$$\theta = \arccos \gamma, \quad (4.5a)$$

$$\varphi = \begin{cases} \arctg(\beta/\alpha), & \alpha > 0 \text{ и } \beta > 0 \\ \pi - \arctg(\beta/\alpha), & \alpha < 0 \text{ и } \beta > 0 \\ \pi + \arctg(\beta/\alpha), & \alpha < 0 \text{ и } \beta < 0 \\ 2\pi - \arctg(\beta/\alpha), & \alpha > 0 \text{ и } \beta < 0 \end{cases} \quad (4.5b)$$

4.1.3 Координаты положения оси ШАЛ

Нулевое приближение для координат положения оси ШАЛ в плоскости установки представляет собой среднее арифметическое взвешенное значений координат до шести наземных частей сработавших станций X_i , Y_i с наибольшей зарегистрированной плотностью частиц ρ_{Ei} :

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{Ei} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n \rho_{Ei}}, \quad (4.6a)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{Ei} \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n \rho_{Ei}}, \quad (4.6b)$$

где i — номер станции, n — количество сработавших станций.

4.1.4 Число частиц электрон-фотонной компоненты ШАЛ

Как было отмечено выше, ключевым элементом при нахождении N_E является ФПР. Для задач установки Tunka-Grande была выбрана экспериментально полученная на установке ШАЛ-МГУ функция [155; 156], схожая с ФПР Нишимуры-Каматы-Грейзена [157; 158]:

$$\rho_E(r) = N_E \cdot f_E(r) = N_E \cdot C_{norm} \cdot \left(\frac{r}{R_m}\right)^{s+\alpha(r)-2} \cdot \left(1 + \frac{r}{R_m}\right)^{s+\alpha(r)-4.5}, \quad (4.7)$$

где C_{norm} — нормировочный коэффициент, r — расстояние от станции до оси ШАЛ, $R_m = 80$ м — радиус Мольера, s — параметр возраста ШАЛ, $\alpha(r)$ — эмпирическая поправка к параметру s , изображенная на рисунке 4.3.

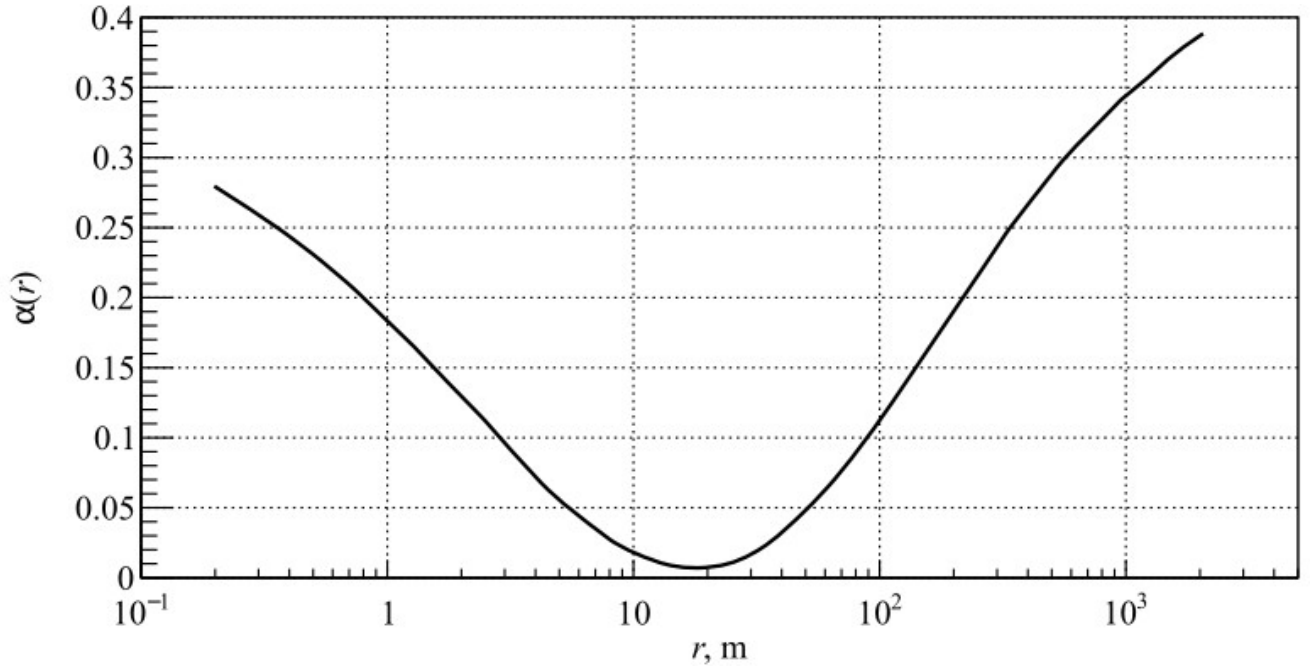


Рисунок 4.3 — Эмпирическая поправка $\alpha(r)$ к параметру возраста ШАЛ.

Для вычисления нулевого приближения N_E для каждой сработавшей станции при фиксированном параметре $s = 1$ определяется величина $f_E(r_i)$, при помощи которой затем рассчитывается искомое число частиц:

$$N_E = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_E(r_i)} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_{Ei}}, \quad (4.8a)$$

$$r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}. \quad (4.8b)$$

где i — номер станции, n — количество сработавших станций. Здесь, как и в случае координат положения оси ШАЛ, отбираются до шести наземных частей станций с наибольшей зарегистрированной плотностью частиц.

4.2 Второй этап реконструкции параметров ШАЛ

На втором этапе используются данные, полученные на предыдущей стадии реконструкции. Все вычисления ведутся в плоскости установки, пер-

пендикулярной направлению прихода оси ливня. Для этого определяются ортогональные расстояния r'_i от положения оси ливня до i -й станции:

$$\Delta x'_i = (X_i - x) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\theta + (Y_i - y) \cdot \sin\varphi \cdot \cos\theta - Z_i \cdot \sin\theta, \quad (4.9a)$$

$$\Delta y'_i = (Y_i - y) \cdot \cos\varphi - (X_i - x) \cdot \sin\varphi, \quad (4.9б)$$

$$r'_i = \sqrt{\Delta x'_i{}^2 + \Delta y'_i{}^2}. \quad (4.9в)$$

Далее для углов θ и φ учитывается кривизна фронта ШАЛ с использованием выражения, аналогично применяемому на установке KASCADE-Grande [43]:

$$T_{EAS}(r') = a \left(1 + \frac{r'}{30} \right)^b, \quad (4.10)$$

где r' — расстояние от станции до оси ШАЛ, $a = 0.05$ и $b = 2.251$.

Переопределение значений x , y и N_E при помощи ФПР (см. формулу (4.6)), при которых наблюдается наилучшее согласие с экспериментальными данными, производится с фиксированным параметром $s = 1$ и метода максимального правдоподобия [52].

4.3 Третий этап реконструкции параметров ШАЛ

В рамках третьего этапа выполняются следующие расчеты:

1. Переопределяются значения параметров x , y и N_E ;
2. Вычисляется значение параметра s ;
3. Определяются значения параметров ρ_{200} и N_M ;
4. Пересчитываются значения параметров N_E , ρ_{200} и N_M с учетом зенитного направления прихода оси ШАЛ.

Переопределение значений параметров x , y и N_E происходит аналогично второму этапу. Отличие заключается в том, что в этом случае при реализации метода максимального правдоподобия параметр s является свободным. Для вычисления плотности частиц на расстоянии 200 м от оси ШАЛ применяется выражение (4.6) с фиксированным расстоянием $r = 200$ м.

Процедура оценки числа мюонов ШАЛ полностью повторяет этапы вычисления N_E с той лишь разницей, что в качестве ФПР выбрана функция

Грейзена [13; 158]:

$$\rho_M(r) = N_M \cdot f_M(r) = N_M \cdot C_{norm} \cdot \left(\frac{r}{R_G}\right)^{-a} \cdot \left(1 + \frac{r}{R_G}\right)^{-b}, \quad (4.11)$$

где C_{norm} — нормировочный коэффициент, $R_G = 180$ м — радиус Грейзена, $a = 0.61$ — фиксированный параметр, b — варьируемый параметр со средним значением 2.6 и среднеквадратичным отклонением 0.3 [49].

Пересчет значений параметров N_E , ρ_{200} и N_M с учетом зенитного направления прихода оси ШАЛ производится согласно выражению:

$$f(\theta) = \exp\left(\frac{t}{\lambda} (\sec(\theta) - 1)\right), \quad (4.12)$$

где $t = 960$ г/см² — глубина атмосферы, $\lambda = 260$ г/см² и $\lambda = 1050$ г/см² — пробег поглощения электронов и мюонов соответственно [49].

4.4 Совместные события установок Тунка-133 и Tunka-Grande

Установка Тунка-133 обладает высокой, экспериментально подтвержденной точностью реконструкции параметров ШАЛ и КЛ [38]. Заявленные ошибки определения направления прихода оси ливня и ее положения в плоскости установки составляют не более 0.12° и 6 м соответственно, а энергетическое разрешение соответствует $\sim 15\%$. Указанные величины справедливы при условии, что энергия КЛ выше 10^{16} эВ, зенитный угол прихода оси ШАЛ лежит в интервале $0 - 45^\circ$, а ее положение находится в пределах круга радиусом 450 м относительно центра установки. Для круга радиусом 800 м погрешность определения положения оси ШАЛ становится больше в ~ 2 раза. Основная идея анализа совместных событий установок Тунка-133 и Tunka-Grande заключается в предположении, что достоверность восстановления характеристик ШАЛ по данным установки Тунка-133 значительно выше, чем по данным сцинтилляционной установки. При прочих равных условиях это достигается за счет природы наблюдаемых явлений и плотности размещения детекторов. Действительно, главным преимуществом черенковской установки является регистрация потока света, интегрированного по всем глубинам развития ливня в атмосфере, что, в свою очередь, обеспечивает значительное сглаживание флуктуаций,

присущих развитию заряженной компоненты ШАЛ. Исходя из этого, значения восстановленных параметров ШАЛ и КЛ по экспериментальным данным установки Тунка-133 могут быть приняты как опорные. При таком подходе появляется возможность решить две первостепенные задачи установки Tunka-Grande. Во-первых, оценить точность восстановления параметров ШАЛ, во-вторых, определить методику реконструкции энергии КЛ. Для достижения указанных целей за период с октября 2016 г по апрель 2017 г был проведен поиск совместных событий, отвечающих следующим критериям:

1. Восстановленный зенитный угол прихода оси ШАЛ по данным установки Tunka-Grande находится в интервале $0 - 35^\circ$.
2. Восстановленное положение оси ШАЛ по данным установки Tunka-Grande располагается в круге радиусом 350 м относительно центра установки.
3. Восстановленная энергия КЛ по данным установки Тунка-133 выше 10^{16} эВ.

С учетом этих требований за ~ 475 часов наблюдений было выделено 6226 событий. На рисунке 4.4 показано распределение их числа в зависимости от количества сработавших станций.

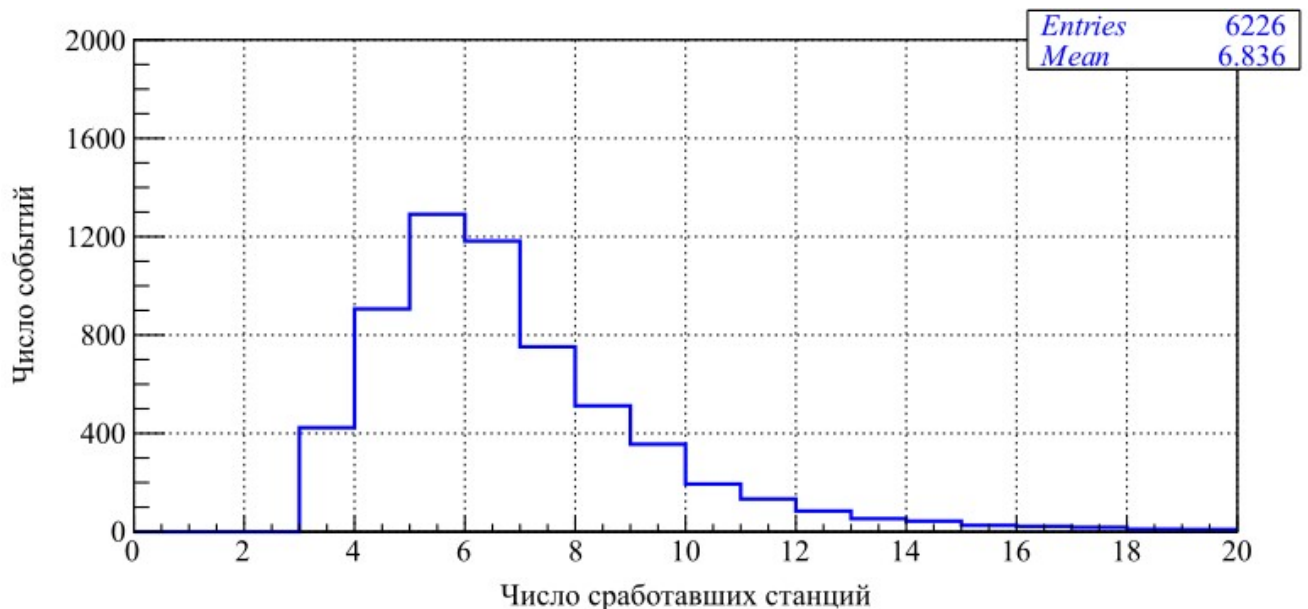


Рисунок 4.4 — Распределение числа совместных событий установок Тунка-133 и Tunka-Grande в зависимости от количества сработавших станций.

Выбор нижнего энергетического порога 10^{16} эВ основан на модельных расчетах, которые показали, что эффективность регистрации ШАЛ от первичных

частиц с указанным значением энергии $\sim 95\%$ [47—49]. Обоснование критериев отбора событий, связанных с параметрами ШАЛ, приведено ниже.

4.4.1 Сравнение значений восстановленных параметров ШАЛ

Направление прихода оси ШАЛ и координаты ее положения в плоскости установок являются реконструируемыми параметрами совместных событий, которые возможно использовать для взаимного сравнения. Так, на рисунке 4.5 представлены распределения разницы зенитных $\Delta\theta = \theta_G - \theta_T$ и азимутальных $\Delta\varphi = (\varphi_G - \varphi_T) \cdot \sin \theta_G$ углов, аппроксимированные функцией Гаусса с параметрами C , μ и σ (см. формулу (Б.5)). Здесь и далее нижние индексы T и G принадлежат характеристикам ШАЛ и КЛ, восстановленным по данным установок Тунка-133 и Tunka-Grande соответственно.

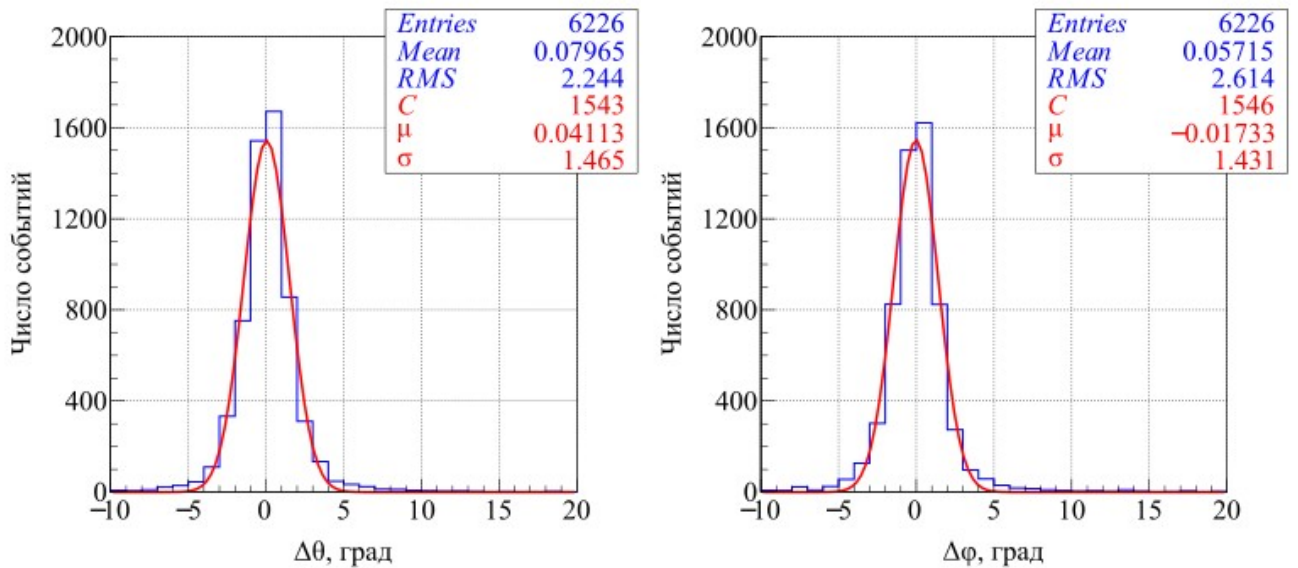


Рисунок 4.5 — Сравнение значений углов θ и φ , восстановленных по данным установок Тунка-133 и Tunka-Grande.

Из рисунка 4.5 следует, что исследуемые углы достаточно хорошо согласуются по своим средним значениям. Среднеквадратичное отклонение (RMS) для $\Delta\theta$ составляет $\sim 2.24^\circ$, для $\Delta\varphi \sim 2.61^\circ$. Учет $\sin \theta_G$ при определении $\Delta\varphi$ связан с тем, что ошибка реконструкции азимутального угла в значительной

степени зависит от зенитного направления прихода оси ШАЛ, что явно прослеживается в случае вертикальных и около вертикальных событий.

Более универсальным подходом оценки точности восстановления направления прихода оси ШАЛ, по сравнению с оценкой среднеквадратичных отклонений распределений $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$, является определение параметра ψ_{68} из распределения углов ψ :

$$\psi = \arccos \left(\frac{\alpha_G \cdot \alpha_T + \beta_G \cdot \beta_T + \gamma_G \cdot \gamma_T}{\sqrt{\alpha_G^2 + \beta_G^2 + \gamma_G^2} \cdot \sqrt{\alpha_T^2 + \beta_T^2 + \gamma_T^2}} \right), \quad (4.13)$$

где α , β и γ — направляющие косинусы, рассчитываемые согласно формуле (4.4). Параметр ψ_{68} представляет собой величину угла, меньше которой находится 68% значений искомого распределения.

На рисунке 4.6 приведено распределение по углу ψ и указаны интегральные значения параметра ψ_{68} в зависимости от количества сработавших станций. Аппроксимация реализована в предположении рэлеевского распределения угла ψ (см. формулу (Б.6)).

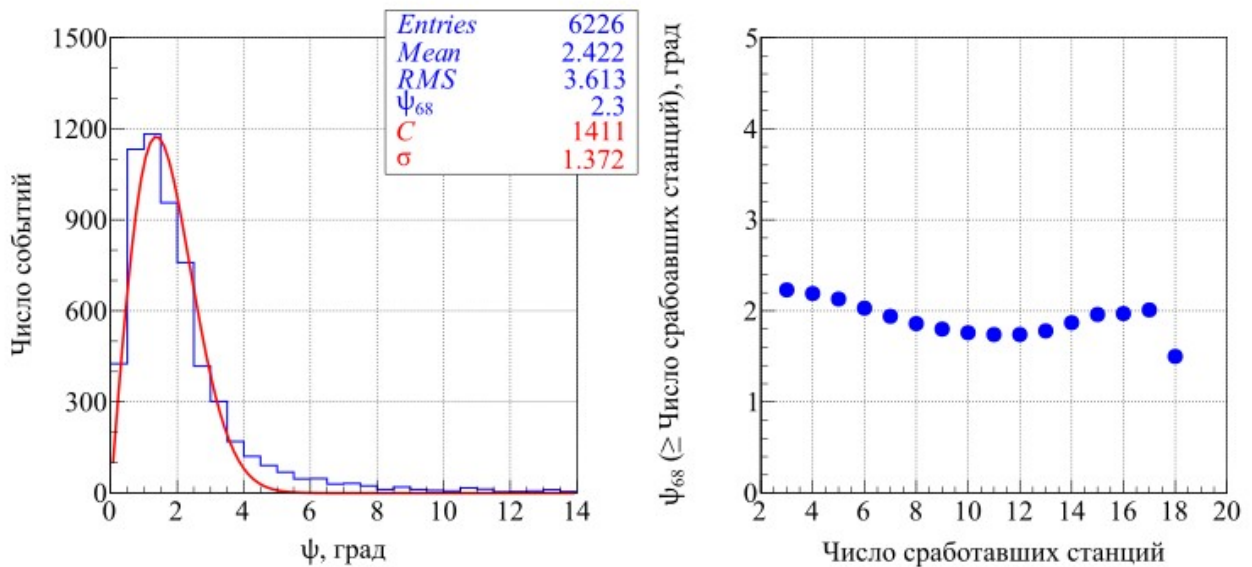


Рисунок 4.6 — Распределение по углу ψ (слева) и интегральные значения параметра ψ_{68} в зависимости от количества сработавших станций (справа).

Рисунок 4.6 демонстрирует, что точность восстановления направления прихода оси ШАЛ по данным установки Tunka-Grande не превышает 2.3° и слабо зависит от числа сработавших станций.

Распределение разницы координаты положения оси ШАЛ в плоскости установок $\Delta x = x_G - x_T$ и $\Delta y = y_G - y_T$ изображено на рисунке 4.7. Здесь

также, как и в случае углов, наблюдается хорошее согласие по их средним значениям. Величина среднеквадратичных отклонений (RMS) для Δx составляет 23.27 м, для Δy — 25.85 м.

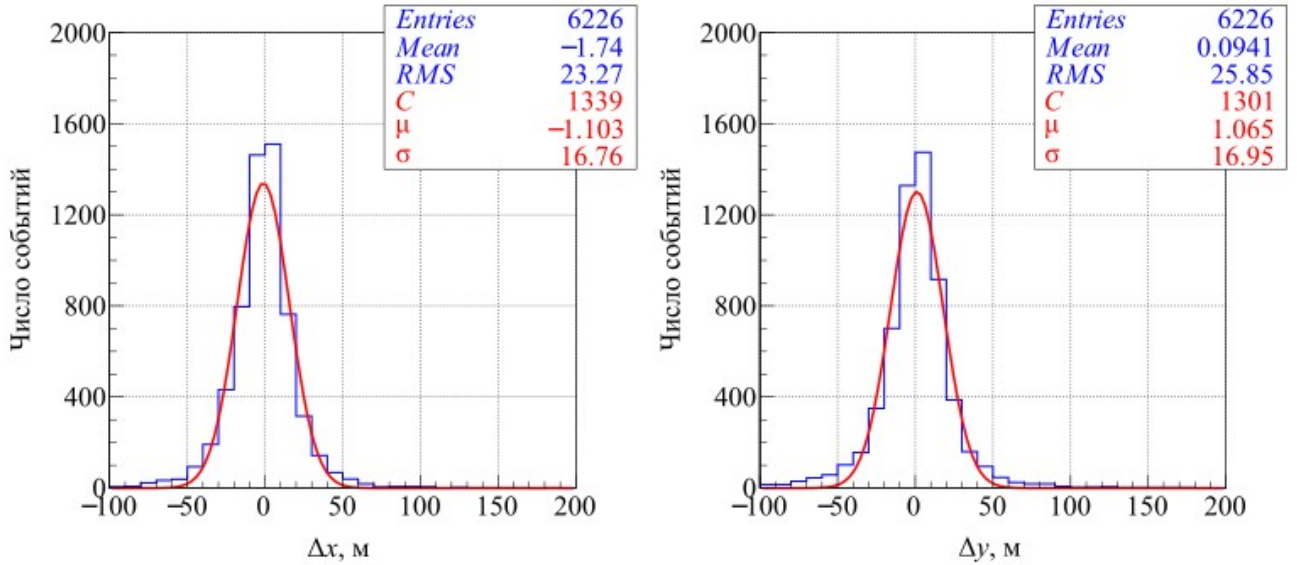


Рисунок 4.7 — Сравнение значений координат x и y , восстановленных по данным установок Тунка-133 и Tunka-Grande.

Точность восстановления положения оси ШАЛ, по аналогии с направлением ее прихода, возможно характеризовать параметром R_{68} , которое вычисляется из распределения расстояний R :

$$R = \sqrt{(x_G - x_T)^2 + (y_G - y_T)^2}. \quad (4.14)$$

На рисунке 4.8 приведено распределение по расстоянию R и указаны интегральные значения параметра R_{68} в зависимости от количества сработавших станций. Гистограмма также аппроксимирована в предположении рэлеевского распределения расстояния R (см. формулу (Б.6)). Из рисунка следует, что точность восстановления положения оси ШАЛ по данным установки Tunka-Grande не хуже 26 м. При этом значение параметра R_{68} значительно уменьшается с увеличением числа сработавших станций.

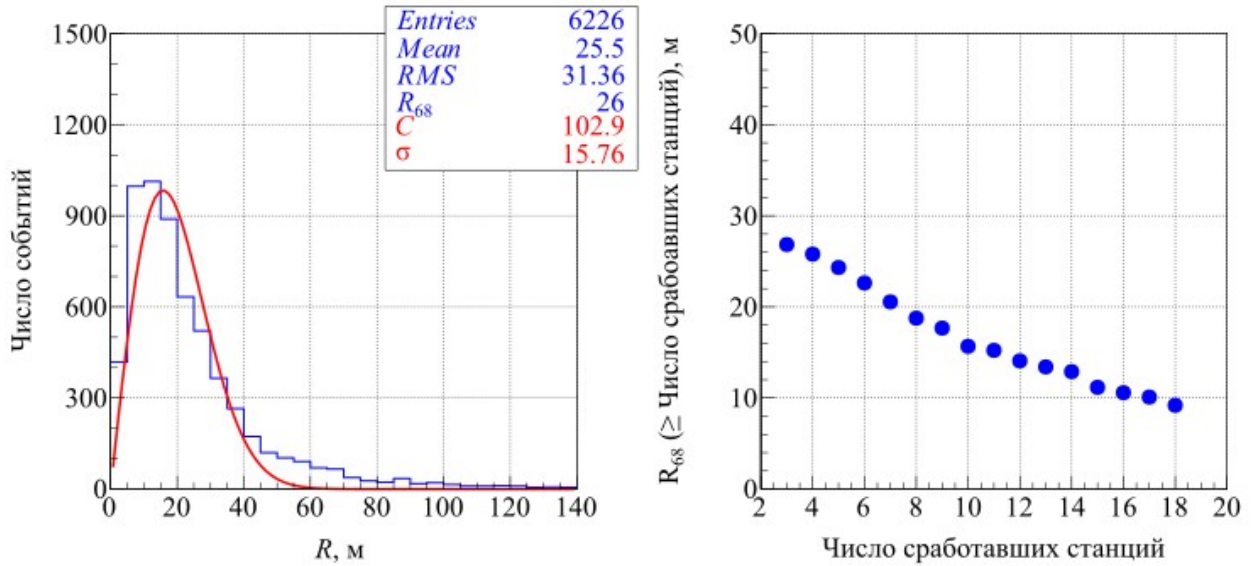


Рисунок 4.8 — Распределение по расстоянию R (слева) и интегральные значения параметра R_{68} в зависимости от количества сработавших станций (справа).

4.4.2 Методика реконструкции энергии КЛ

При анализе экспериментальных данных в качестве основной характеристики необходимо иметь измеряемый параметр, с помощью которого с достаточной точностью возможно определить энергию КЛ. Так, на компактных сцинтилляционных установках с детекторами, находящимися на относительно небольших расстояниях друг от друга, таким параметром часто является полное восстановленное число заряженных частиц ШАЛ. На установках же, где наблюдается значительное разнесение регистрационных пунктов между собой, принято определять плотность частиц на некотором удалении от оси ШАЛ. Для установки Tunka-Grande были апробированы обе методики. В первом случае энергия КЛ определялась через число частиц электрон-фотонной компоненты ШАЛ N_E . Полученные результаты показали, что реконструируемая энергия сильно зависит от формы используемой ФПР и ее флуктуаций. В связи с этим, по аналогии с установкой Тунка-133, была применена вторая методика, заключающаяся в использовании плотности частиц ρ_{200} на расстоянии 200 м от оси ШАЛ. На рисунке 4.9 показана экспериментальная зависимость энергии E_T , восстановленной по данным установки Тунка-133, от параметров ρ_{200} и N_E ,

восстановленных по данным установки Tunka-Grande. Аппроксимация реализована степенной функцией вида (Б.2) с параметрами p_0 и p_1 .

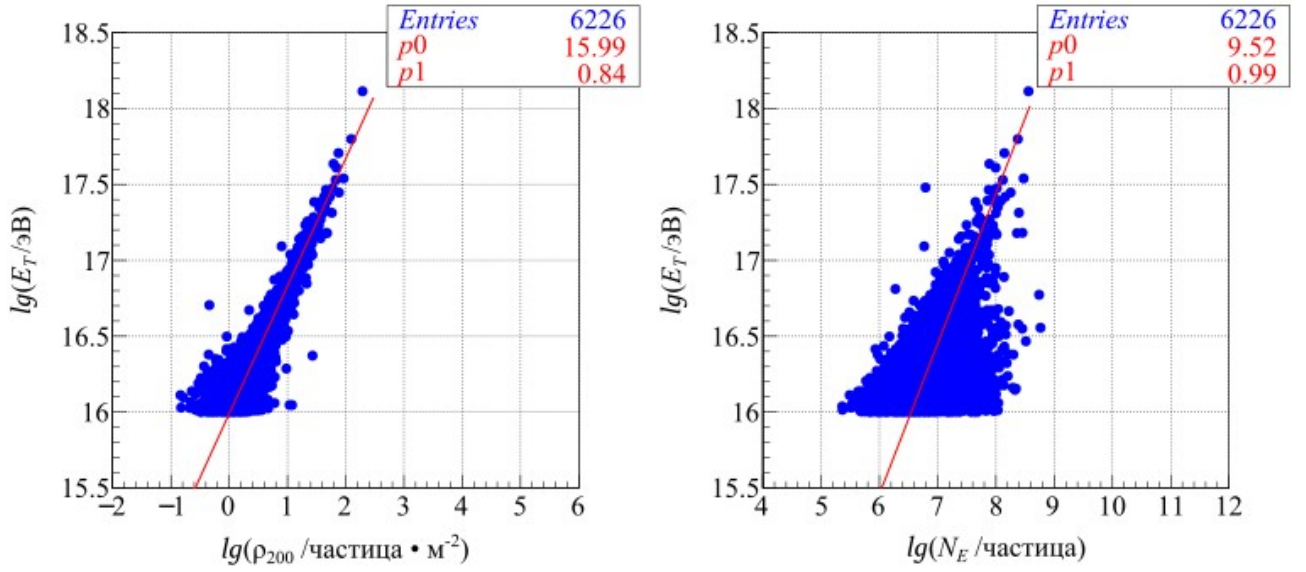


Рисунок 4.9 — Зависимость восстановленной энергии КЛ по данным установки Тунка-133 от параметров ρ_{200} (слева) и N_E (справа).

Исходя из рисунка 4.9 для определения энергии КЛ по данным установки Tunka-Grande было предложено использование параметра ρ_{200} :

$$\lg(E_G/\text{эВ}) = \lg(\rho_{200}/\text{частица} \cdot \text{м}^{-2}) \cdot 0.84 + 15.99. \quad (4.15)$$

Точность восстановления E_G была оценена по среднеквадратичному отклонению (RMS) распределения логарифмической разницы энергии $\lg(\Delta E) = \lg(E_G/\text{эВ}) - \lg(E_T/\text{эВ})$, приведенной на рисунке 4.10. Из рисунка следует, что в случае применения параметра ρ_{200} наблюдается хорошее согласие по средним значениям энергий, восстановленных по данным установки Тунка-133 и Tunka-Grande. Энергетическое разрешение установки Tunka-Grande не хуже 36%.

4.4.3 Оптимальные критерии отбора ШАЛ

Для оценки возможности увеличения статистики зарегистрированных ШАЛ были рассмотрены дополнительные совместные события установок Тунка-133 и Tunka-Grande, выделенные в отдельные банки данных под номером 2

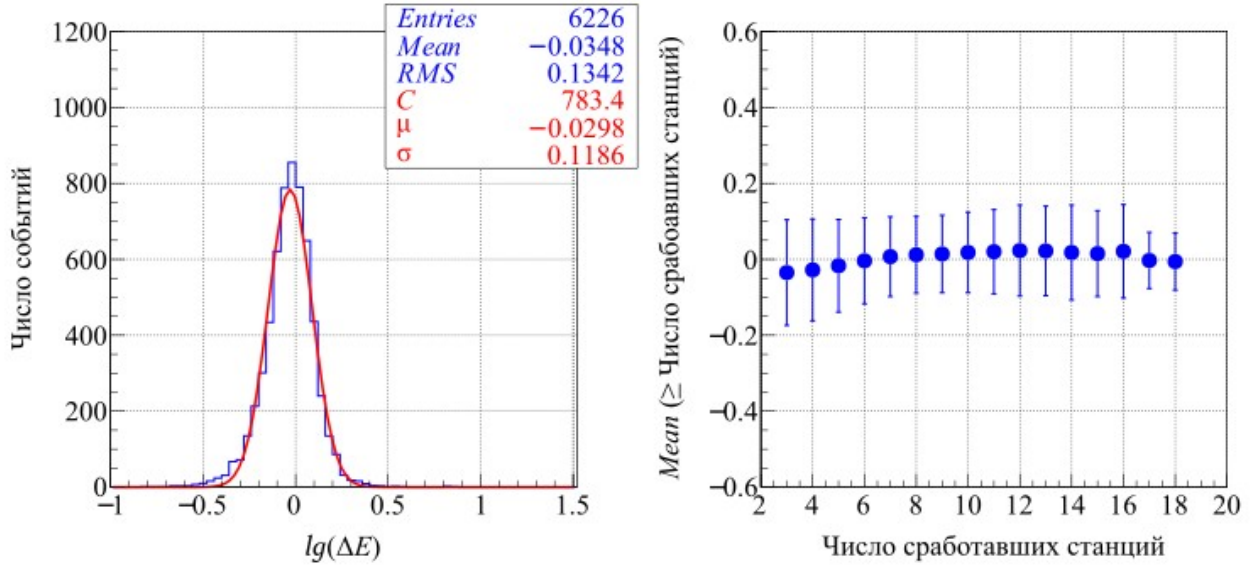


Рисунок 4.10 — Распределение по $\lg(\Delta E)$ (слева) и интегральные средние значения $Mean$ в зависимости от количества сработавших станций (справа).

и 3. Условия их отбора, в совокупности с вышеописанными критериями (банк данных №1), приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Критерии отбора событий. N - количество зарегистрированных ШАЛ, θ_G - восстановленный зенитный угол прихода оси ШАЛ по данным установки Tunka-Grande, R_G - восстановленное положение оси ШАЛ по данным установки Tunka-Grande относительно ее центра, $\lg(E_T/\text{эВ})$ — восстановленная энергия КЛ по данным установки Тунка-133.

Номер банка данных	N	θ_G , град	R_G axis, м	$\lg(E_T/\text{эВ})$
1	6226	0 – 35	0 – 350	≥ 16
2	2424	35 – 45	0 – 350	≥ 16
3	210	0 – 35	350 – 600	≥ 17

На рисунке 4.11 представлены интегральные значения параметров ψ_{68} и R_{68} в зависимости от количества сработавших станций для первого и второго банков данных. Из рисунка следует, что точность восстановления направления прихода оси ШАЛ по данным установки Tunka-Grande не зависит от выбранных интервалов зенитных углов. При этом ошибка восстановления положения оси ШАЛ для второго банка данных возрастает по сравнению с первым на ~ 10 м и является весьма существенной.

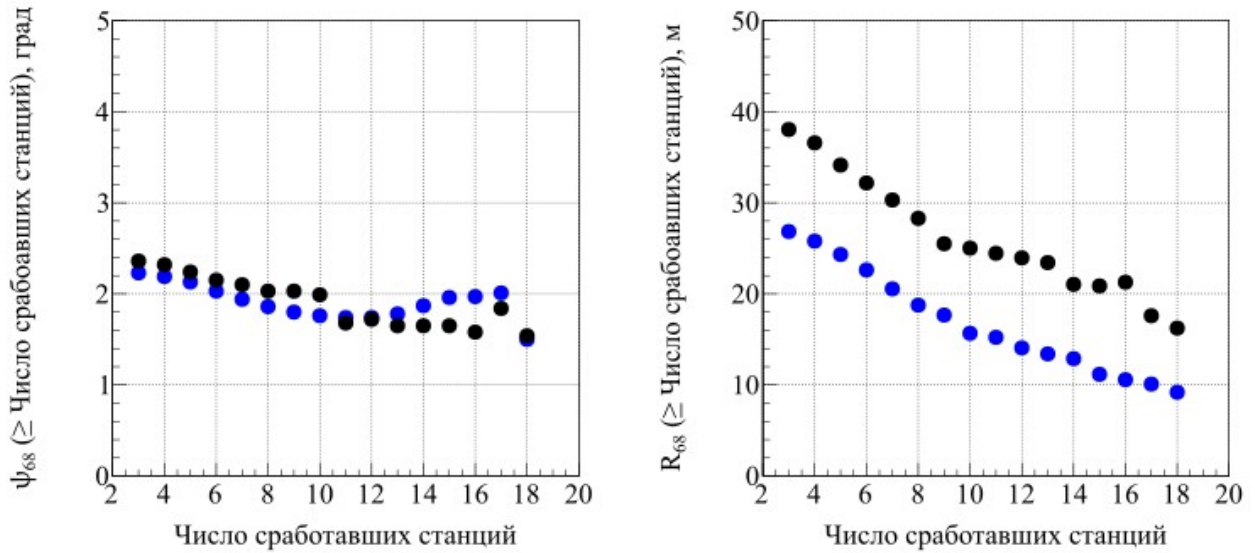


Рисунок 4.11 — Интегральные значения параметров ψ_{68} (слева) и R_{68} (справа) в зависимости от количества сработавших станций. Синие и черные кружки соответствуют первому и второму банкам данных.

Для третьего банка данных, в силу малого количества зарегистрированных ШАЛ, на рисунке 4.12 приведены только распределение параметров ψ и R для трех и более сработавших станций. Тем не менее эти распределения показывают, что реконструкция параметров ШАЛ, положение осей которых находится за геометрическими пределами установки Tunka-Grande, может приводить к значительным ошибкам. Здесь необходимо отметить, что масштабный параметр σ аппроксимирующих функций в обоих случаях фиксирован и его численные значения взяты из соответствующих рисунков 4.8 и 4.6.

Исходя из рисунков 4.11 и 4.12 можно сделать заключение о том, что при существующей процедуре реконструкции оптимальными критериями отбора ШАЛ являются условия, отвечающие первому банку данных.

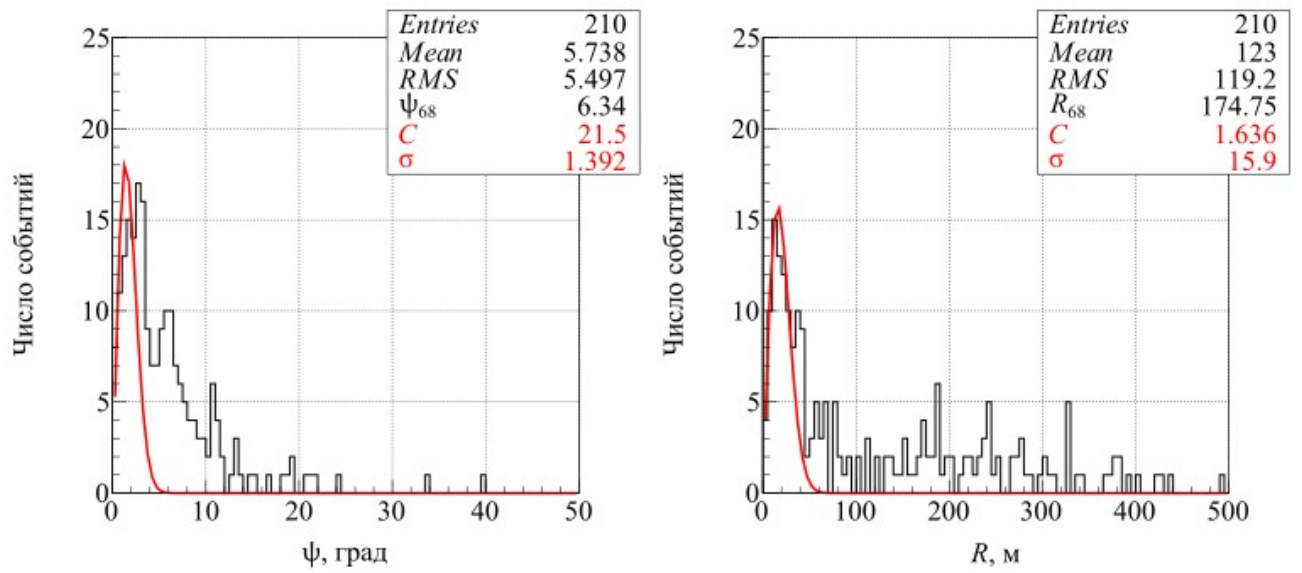


Рисунок 4.12 — Распределение параметров ψ (слева) и R (справа) для третьего банка данных.

Глава 5. Результаты за первые 5 лет работы установки Tunka-Grande

В рамках настоящей главы приведены основные научные результаты, полученные за первые 5 сезонов измерений установки Tunka-Grande. Представлены дифференциальный энергетический спектр КЛ, методика выделения гамма-квантов из фона заряженных КЛ и ограничение на поток диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Материалы главы опубликованы в работах [56; 61–64].

5.1 Общая информация по экспериментальным данным

Для восстановления дифференциального энергетического спектра КЛ и поиска диффузного гамма-излучения был проведен анализ экспериментальных данных установки Tunka-Grande, полученных за период наблюдений 2017—2021 гг в режиме работы станций «ЛОКАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР». Критерии отбора событий приведены в разделе 4.4. Данные, полученные за сезон измерений 2016—2017 гг, не рассматривались из-за значительного влияния мертвого времени системы сбора данных на достоверность получаемой информации. Ливни, зарегистрированные в режиме работы станций «ВНЕШНИЙ ТРИГГЕР», также не были включены в конечный анализ в связи с техническим неисправностями некоторых кластеров установки Тунка-133 в период 2017—2021 гг. Таким образом за ~ 8900 часов наблюдений было отобрано ~ 240000 ШАЛ, из них ~ 2000 ливней с восстановленной энергией КЛ выше 10^{17} эВ. На рисунке 5.1 показано интегральное распределение числа этих событий в зависимости от энергии КЛ.

Распределение ШАЛ по их зенитному θ и азимутальному φ углам прихода показано на рисунке 5.2. Гистограмма, выделенная черным цветом, приведена для сравнения и соответствует всем реконструированным значениям угла θ . На рисунке видно, что в восстановленном потоке КЛ отсутствуют выделенные направления прихода оси ШАЛ. Среднее значение (*Mean*) для углов θ и φ составляют 32.98° и 181.3° соответственно.

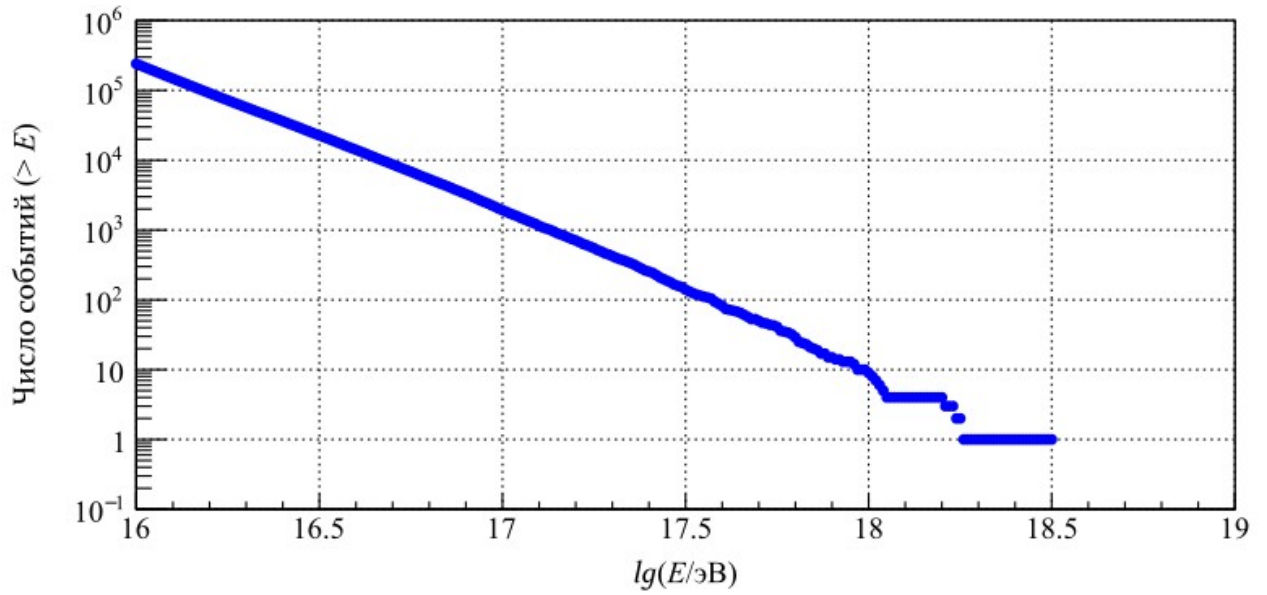


Рисунок 5.1 — Зависимость числа отобранных событий от энергии КЛ.

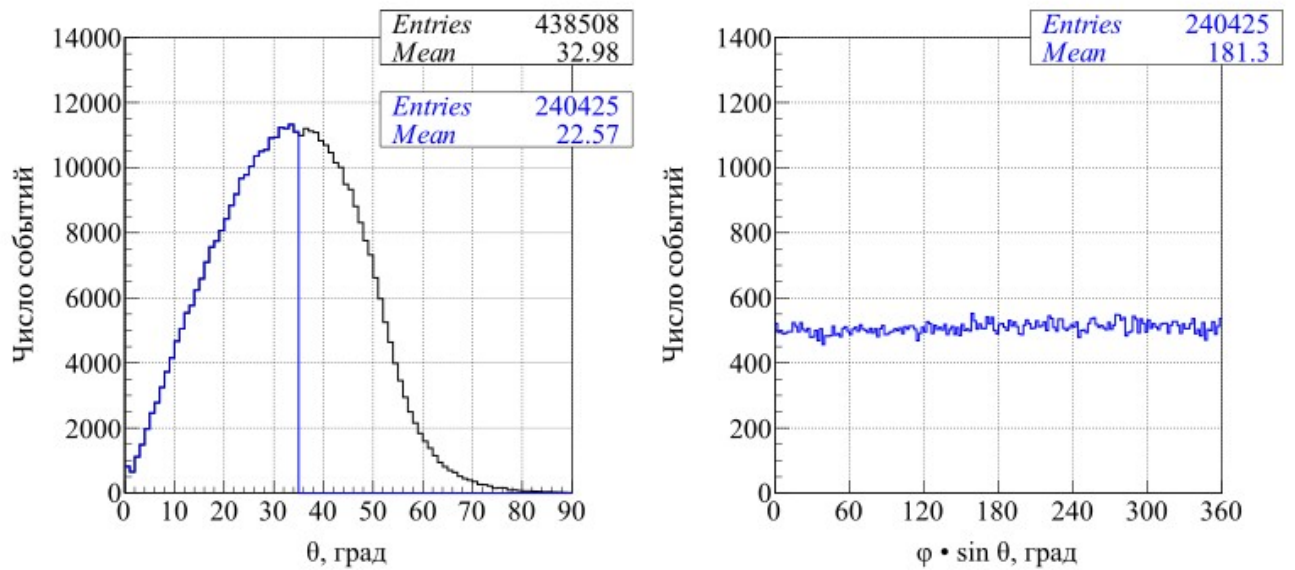


Рисунок 5.2 — Распределение реконструированных углов θ (слева) и φ (справа). Синим цветом выделены значения, соответствующие критериям отбора ШАЛ.

5.2 Дифференциальный энергетический спектр КЛ

Интенсивность потока первичных частиц $I(E)$ в энергетическом интервале ΔE при их средней энергии E в рамках установки Tunka-Grande была

рассчитана следующим образом:

$$I(E) = \frac{N}{S \cdot T \cdot \Omega \cdot \Delta E}, \quad (5.1)$$

где N — количество зарегистрированных событий в интервале ΔE , $S = \pi R^2 \approx 385000 \text{ м}^2$ — площадь установки, $T \approx 8900$ часов — время набора экспериментальных данных, $\Omega = \pi \sin^2 \theta \approx 1 \text{ ср}$ — телесный угол.

Восстановленный по экспериментальным данным установки Tunka-Grande энергетический спектр КЛ и его сравнение с результатами других экспериментов представлены на рисунках 5.3 и 5.4.

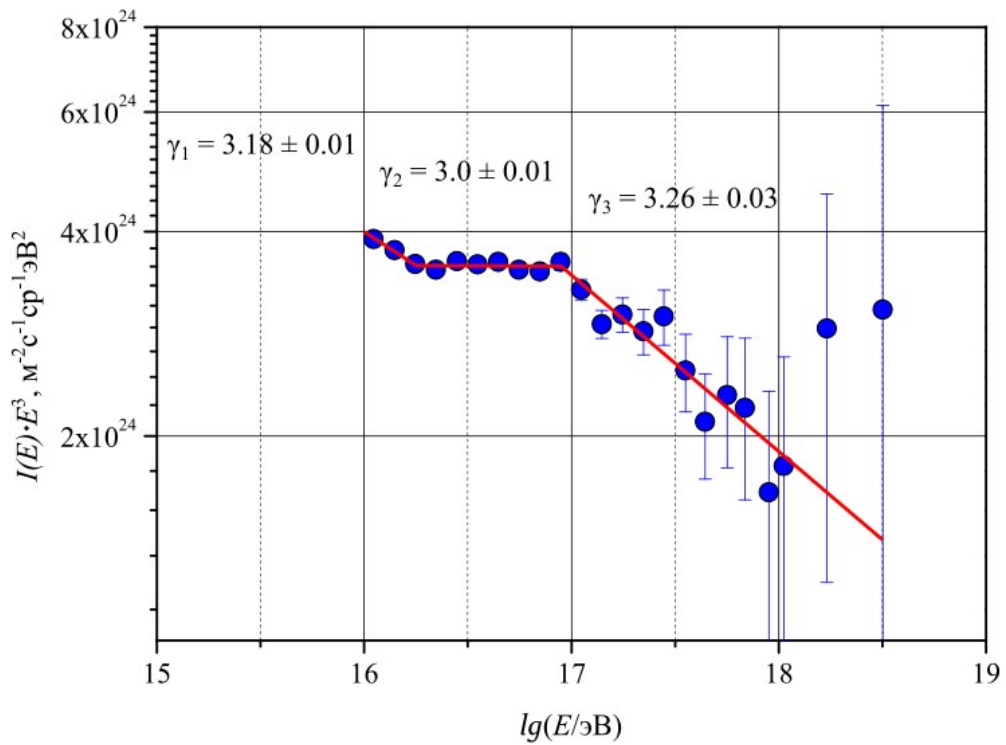


Рисунок 5.3 — Дифференциальный энергетический спектр КЛ, восстановленный по экспериментальным данным установки Tunka-Grande.

Из рисунка 5.3 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 5.4 видно, что полученный спектр не противоречит измерениям других экспериментов. Все приведенные результаты демонстрируют статистически обеспеченные особенности в области $\sim 2 \cdot 10^{16}$ эВ и 10^{17} эВ.

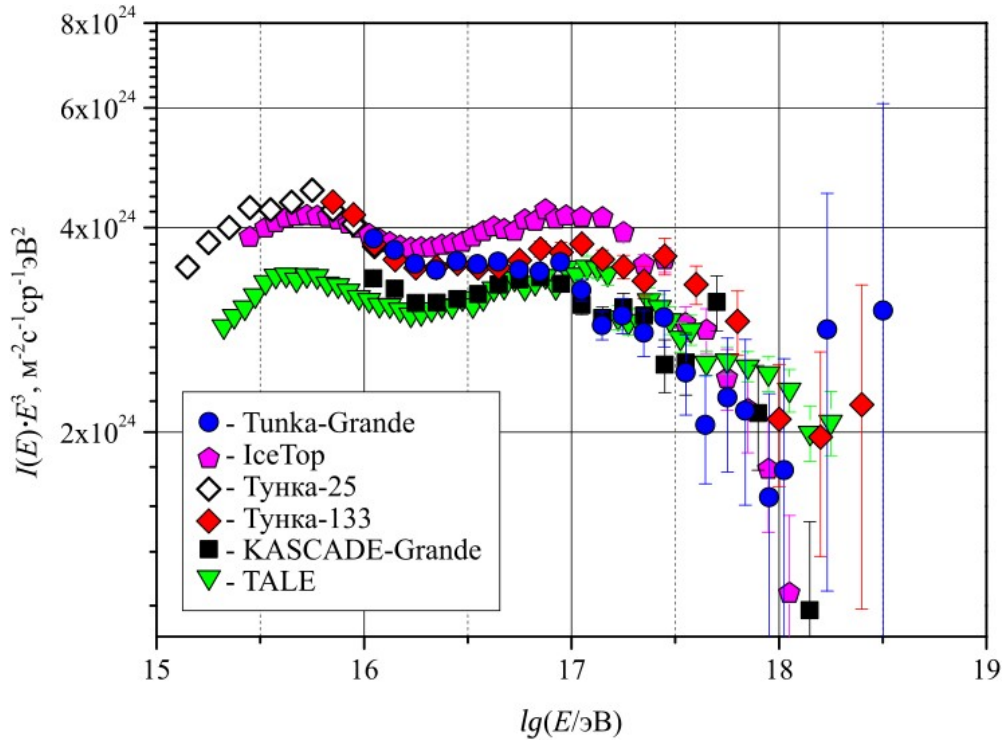


Рисунок 5.4 — Сравнение дифференциальных энергетических спектров КЛ, восстановленных по экспериментальным данным установок Tunka-Grande, Тунка-25 [69], Тунка-133 [39], IceTop (SIBYLL 2.1) [120], KASCADE-Grande (QGSJET-II) [97] и TALE (QGSJET-II-03) [128].

5.3 Ограничение на поток диффузного гамма-излучения

За всю историю поиска космических гамма-квантов, не было обнаружено частиц от локальных источников с энергией выше $1.6 \cdot 10^{15}$ эВ и диффузного излучения выше 10^{15} эВ. Эта ситуация, помимо астрофизических аспектов, также обусловлена тем, что сам процесс выделения гамма-квантов из фона заряженных КЛ является весьма нетривиальным. На данный момент существует несколько экспериментальных методов гамма-адронного разделения. Один из них был предложен французским и польским физиками Р. Мазе и А. Завадски еще в 1960 г [159] и основан на регистрации и анализе мюонной компоненты ШАЛ. Идея метода состоит в том, что число мюонов в ливне, порожденном гамма-квантом, на порядок меньше, чем в адронном ливне. Это различие обусловлено тем, что фотонные ШАЛ развиваются за счет электромагнитного

взаимодействия и единственным источником мюонов в них являются фотоядерные реакции. Исходя из этого, с целью поиска диффузных гамма-квантов с энергией выше 10^{16} эВ по данным установки Tunka-Grande был проведен анализ обедненных мюонами событий. 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 определялся отклик сцинтилляционных счетчиков и станций при прохождении через них частиц искусственных ливней. Для решения этих задач в качестве программного обеспечения были выбраны пакеты CORSIKA (версия 7.7401) [53] и Geant4 (версия 10.04) [54; 55], которые в настоящее время являются широко используемыми инструментами в области физики высоких энергий.

5.3.1 Моделирование установки Tunka-Grande

Банк искусственных ШАЛ был создан со следующими основными входными параметрами, доступными в программном пакете CORSIKA:

1. Модель электромагнитных взаимодействий: EGS4 [160];
2. Модели адронных взаимодействий: GHEISHA [161] и QGSJET-II-04 [162];
3. Тип первичных частиц: протоны, ядра железа и гамма-кванты;
4. Количество ШАЛ: 1080 ливней на каждый тип первичной частицы;
5. Спектр первичных частиц: E^{-3} ;
6. Энергетический диапазон: $16.5 \leq \lg(E/eV) \leq 17.5$;
7. Зенитный угол прихода оси ШАЛ: $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$;
8. Азимутальный угол прихода оси ШАЛ: $0^\circ \leq \varphi < 360^\circ$;
9. Модель атмосферы: центральная Европа 14 октября 1993;
10. Уровень регистрации: 675 м над уровнем моря;
11. Магнитное поле: $B_x = 14.3$ мкТл, $B_z = 40.8$ мкТл;
12. Энергия адронов и мюонов в ШАЛ: $E > 50$ МэВ;
13. Энергия электронов и гамма-квантов в ШАЛ: $E > 1$ МэВ;
14. Параметр статистического прореживания: без прореживания.

После окончания процедуры генерации искусственных ШАЛ ось каждого ливня 10 раз сдвигалась случайным образом в пределах круга радиусом 400 м относительно центра установки, что повысило статистику событий. С учетом применения критериев отбора ШАЛ, аналогично используемых в экспериментальных данных, итоговое количество ливней составило ~ 4600 на каждый тип первичных частиц.

Программный пакет Geant4 известен своим большим практическим потенциалом. Этот инструмент позволяет создавать точную компьютерную модель детекторов (или их массивов) и рассчитывать их взаимодействие с различными типами частиц. В компьютерной модели установки Tunka-Grande [61] была задана полная геометрия сцинтилляционных станций, максимально приближенная к реальности (см. рисунок 5.5). В качестве моделей взаимодействий использовался встроенный список физических процессов FTFP_BERT. В приложении В представлено описание использованной в исследовании компьютерной модели.

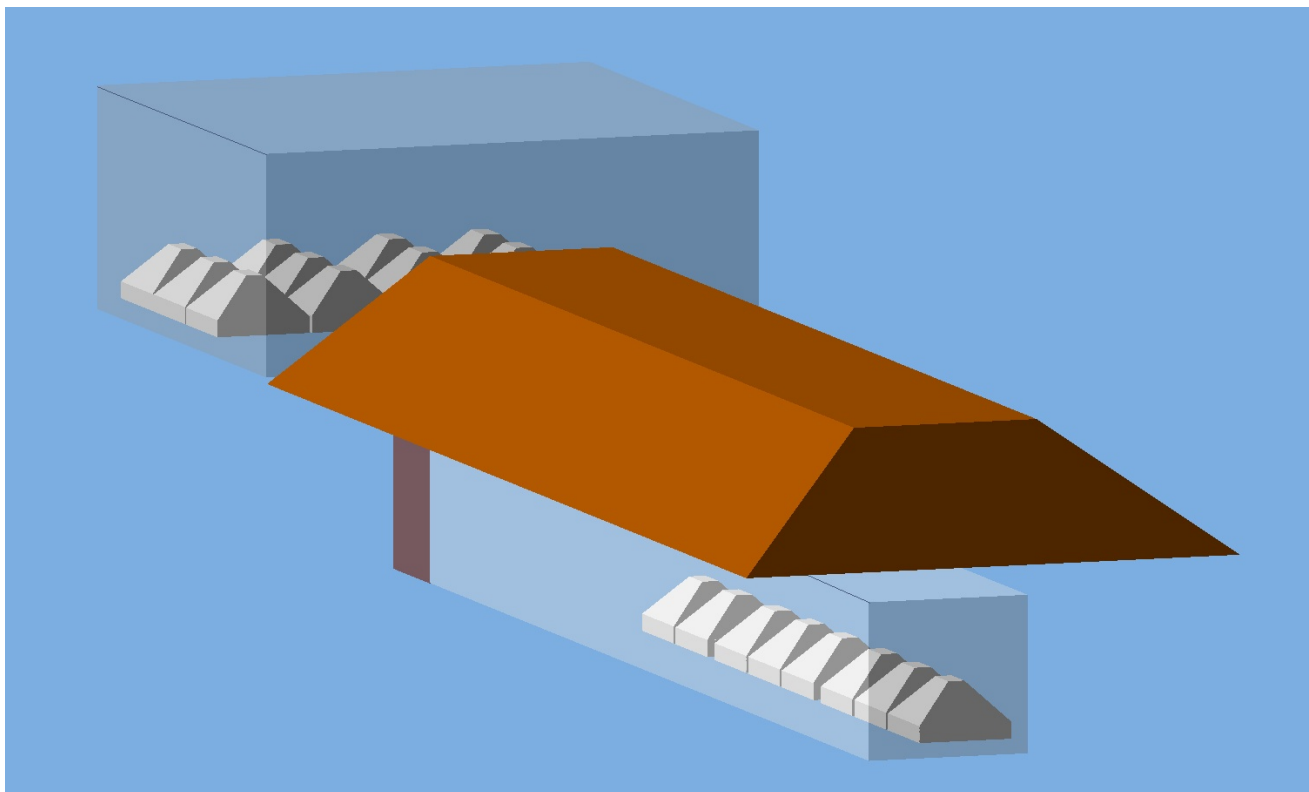


Рисунок 5.5 — Визуализация Geant4-модели сцинтилляционной станции установки Tunka-Grande.

Отклик счетчиков при регистрации частиц сгенерированных ШАЛ определялся как значение их энергетических потерь в объеме сцинтилляционных

пластин. На рисунке 5.6 приведен пример таких потерь при взаимодействии с наземной частью отдельно взятой станции мюонов с энергией 1 ГэВ и зенитным углом прихода $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60° .

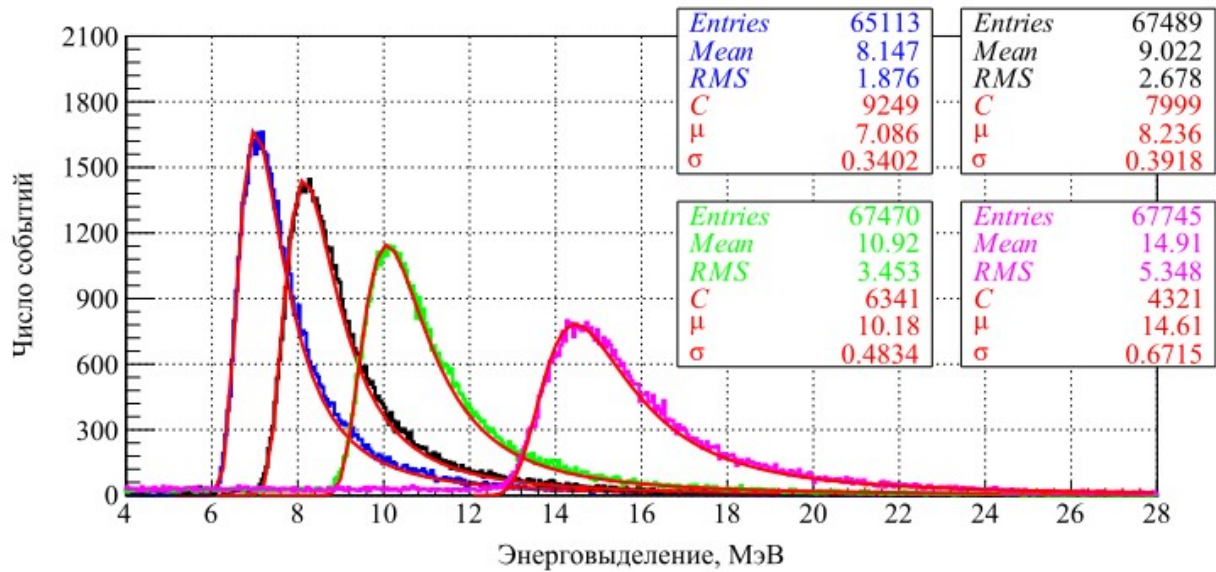


Рисунок 5.6 — Смоделированный спектр энерговыведения наземной части станции при прохождении через нее мюонов с энергией 1 ГэВ и зенитным углом $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60° .

Рисунок 5.6 демонстрирует, что спектры энерговыведения имеют характерный вид распределения Ландау и аппроксимированы функцией Мюла с параметрами C , μ и σ (см. формулу (Б.3)). При этом наиболее вероятное значение потерь в случае вертикально падающих частиц составляет ~ 7.2 МэВ и далее, в зависимости от угла, растет пропорционально $\sim 1/\cos\theta$.

5.3.2 Методика поиска кандидатов в фотонные ШАЛ

Для поиска кандидатов в фотонные ШАЛ был определен критерий их отбора. За эквивалент числа мюонов N_{sum} было принято суммарное энерговыведение в подземных частях сработавших станций в каждом событии, отнесенное к наиболее вероятному энерговыведению, которое, в свою очередь, соответствует прохождению одиночного вертикального мюона через сцинтилляционный счетчик. Следует отметить, что 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 ШАЛ (см. приложение Г). На рисунке 5.7 представлена зависимость числа N_{sum} , полученная как из искусственно сгенерированных, так и из экспериментальных данных, от параметра ρ_{200} . Безмюонные ливни 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 (Б.2) с параметрами p_0 и p_1 .

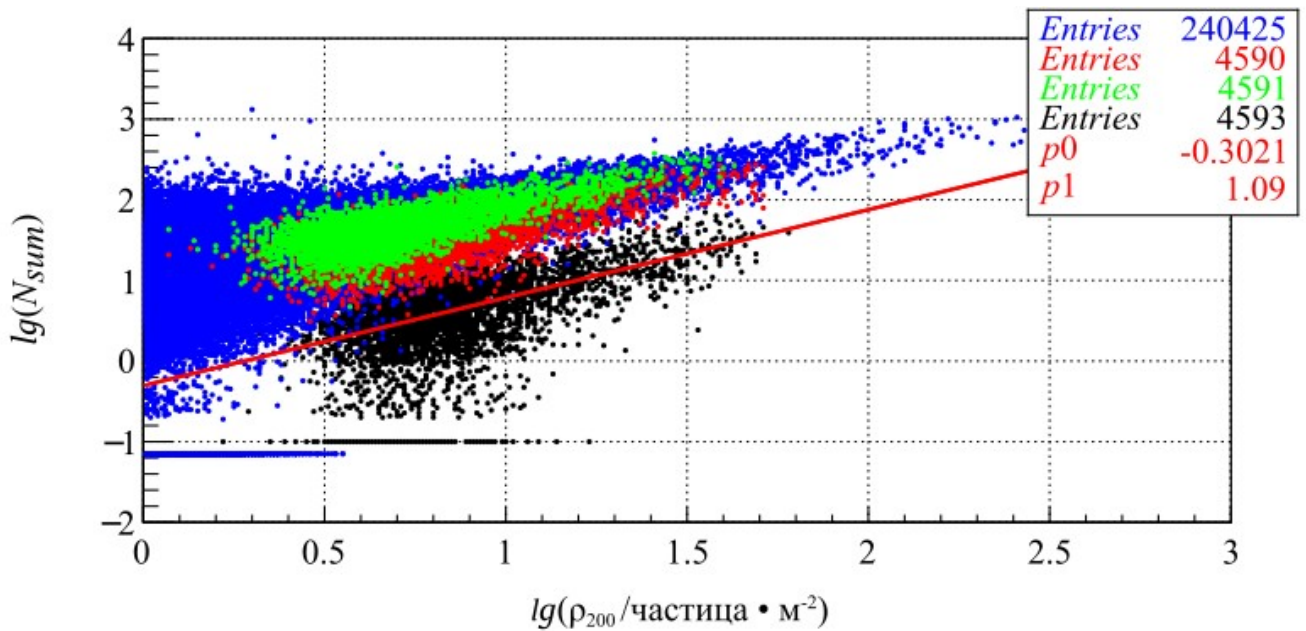


Рисунок 5.7 — Зависимость числа N_{sum} от параметра ρ_{200} . Синим цветом выделены экспериментальные данные, красным, зеленым и черным — события от искусственных ШАЛ, инициированных протонами, ядрами железа и гамма-квантами соответственно.

Из рисунка 5.7 следует, что смоделированные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются между собой. Аппроксимирующая 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 $\sim 50\%$.

После определения критерия отбора кандидатов в фотонные ШАЛ была установлена зависимость энергии первичных гамма-квантов от параметра ρ_{200} (см. рисунок 5.8). Необходимость этого шага связана с тем, что при одинаковой энергии гамма-кванты производят ШАЛ с большим числом частиц на уровне наблюдения, чем заряженные КЛ.

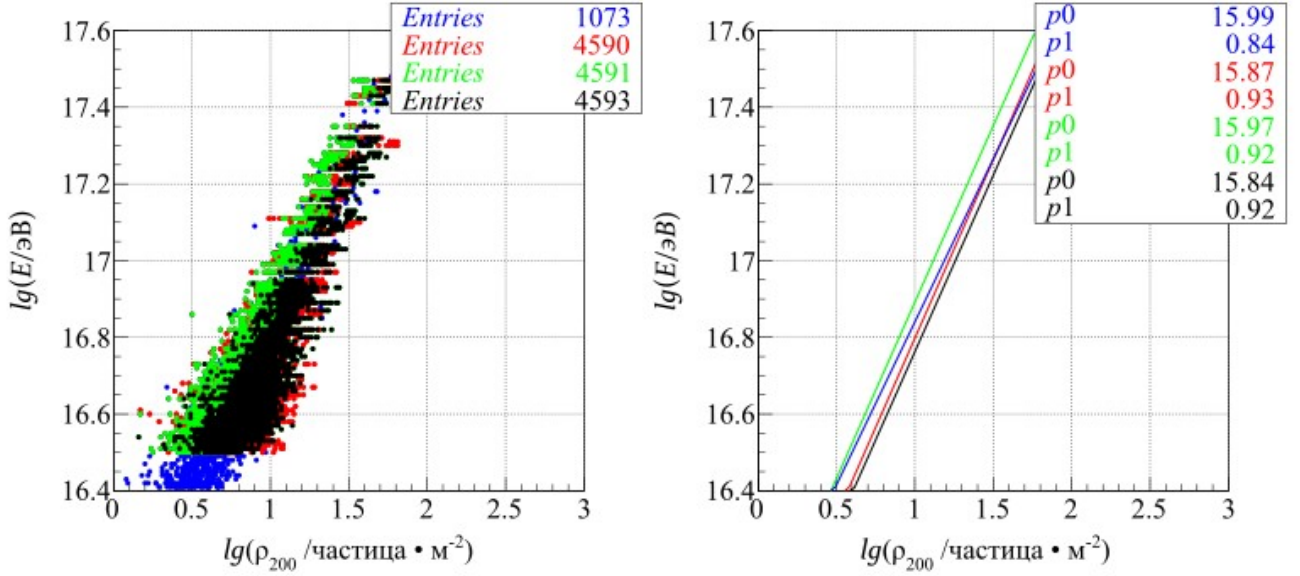


Рисунок 5.8 — Зависимости числа N_{sum} от параметра ρ_{200} (слева) и результаты их аппроксимации (справа). Синим цветом выделены экспериментальные данные (произвольная выборка событий), красным, зеленым и черным — события от искусственных ШАЛ, инициированных протонами, ядрами железа и гамма-квантами соответственно.

На рисунке 5.8 видно, что искусственно сгенерированные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются между собой. Исходя из результатов линейной аппроксимации вида (Б.2) с параметрами p_0 и p_1 для определения энергии гамма-квантов было принято следующее выражение:

$$\lg(E_\gamma/\text{эВ}) = \lg(\rho_{200}/\text{частица} \cdot \text{м}^{-2}) \cdot 0.92 + 15.84. \quad (5.2)$$

5.3.3 Полученные результаты

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 CASA-MIA [148] и KASCADE-Grande [99]:

$$\frac{F_\gamma}{F_{CR}} < \frac{N_{90}}{N_{tot} \cdot \varepsilon_\gamma} \left(\frac{E_{CR}}{E_\gamma} \right)^{-\beta}, \quad (5.3)$$

где N_{90} — верхний предел на число первичных гамма-квантов при использовании стандартного метода Фельдмана-Казинса [163] на уровне достоверности 90%, N_{tot} — общее количество зарегистрированных событий, ε_γ — эффективность отбора кандидатов в фотонные ШАЛ, E_γ и E_{CR} — средняя энергия гамма-квантов и КЛ, β — спектральный индекс интегрального потока КЛ. Для всех 4 выбранных значений параметра ρ_{200} параметр $\varepsilon_\gamma \approx 0.5$, индекс $\beta = 2$ и эффективность регистрации гамма-квантов $\approx 100\%$. Полученные результаты, в том числе их сравнение с измерениями других экспериментов, приведены в таблице 3 и на рисунке 5.9.

Таблица 3 — 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}	N_{90}	$lg(E_{CR}/\text{эВ})$	$lg(E_\gamma/\text{эВ})$	F_γ/F_{CR}	$F_\gamma \cdot 10^{-13}$
> 0.75	12548	2.44	16.62	16.53	< 0.00026	< 3.84
> 1	4584	2.44	16.83	16.76	< 0.00077	< 3.84
> 1.25	1565	2.44	17.04	16.99	< 0.0025	< 3.84
> 1.5	551	2.44	17.25	17.22	< 0.0077	< 3.84

Из рисунка 5.9 следует, что полученные верхние пределы по порядку величины находятся на одном уровне с аналогичными измерениями экспериментов KASCADE-Grande, ШАЛ-МГУ и Pierre Auger Observatory. Следует также подчеркнуть, что все представленные ограничения базируются на компьютерном

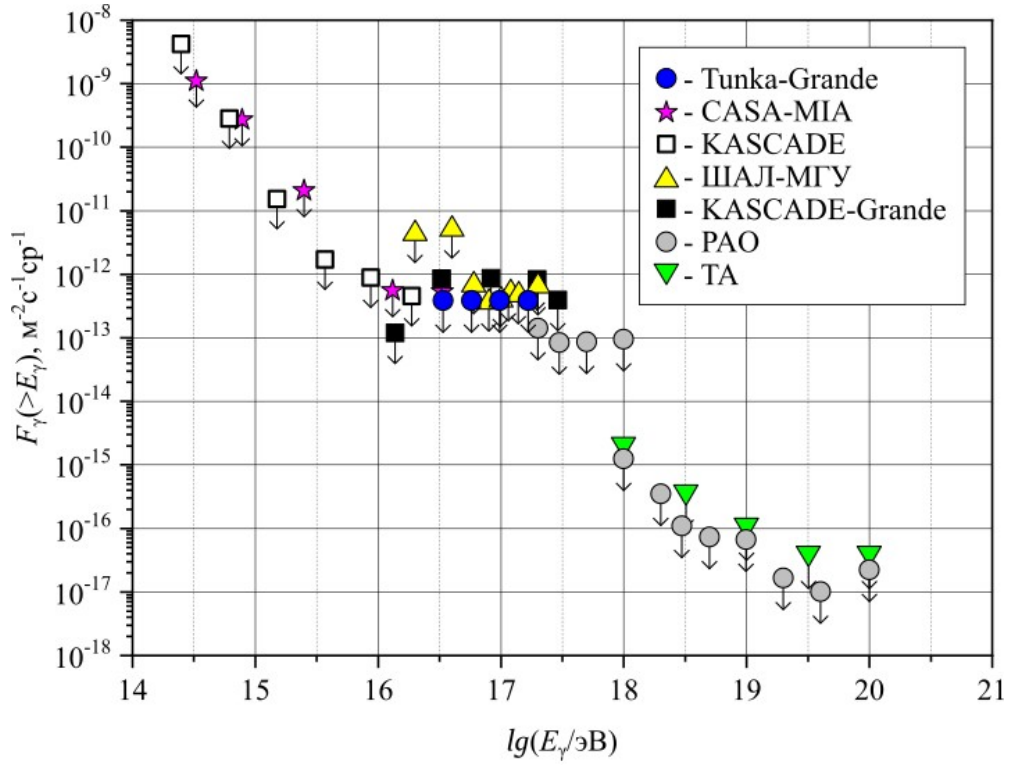


Рисунок 5.9 — Ограничение на интегральный поток диффузных гамма-квантов по экспериментальным данным установки Tunka-Grande (90% C.L., QGSJET-II-04) и его сравнение с аналогичными измерениями экспериментов CASA-MIA (90% C.L.) [148], KASCADE (90% C.L., QGSJET-II-02) [99], ШАЛ-МГУ (90% C.L., QGSJET-II-04) [91], KASCADE-Grande (90% C.L., QGSJET-II-02) [99], Pierre Auger Observatory (95% C.L., EPOS LHS) [139] и Telescope Array (95% C.L., QGSJET-II-03) [149].

моделировании ШАЛ и в значительной степени зависят от используемых моделей адронных взаимодействий. Дополнительный вклад в систематические ошибки измерений вносят погрешность реконструкции энергии и существующая неопределенность массового состава КЛ (см. рисунок 1.16).

Заключение

Основные результаты работы заключаются 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.

В заключение автор выражает благодарность научному руководителю Кузьмичеву Л.А. за теплое отношение, процесс обучения, обсуждение результатов диссертационной работы и научное руководство. Также автор отдельно благодарит Буднева Н.М. за моральную поддержку, ценные указания, неоценимую помощь при проведении исследований. Автор искренне признателен всем сотрудникам НИИЯФ МГУ, НИИПФ ИГУ и ИЯФ СО РАН, и, в особенности, Просину В.В., Коростелевой Е.Е., Миргазову Р.Р., Гресь О.А., Ивановой А.Л., Ивановой А.Д., Загородникову А.В., Гафарову А.Р., Пахорукову А.Л., Терновому М.Ю и Кравченко Е.А., без которых эта работа бы не состоялась. Автор безгранично благодарен своим родителям Монхоеву Д.С. и Михалевой В.Н. за понимание и поддержку при написании настоящей работы.

Список сокращений и условных обозначений

C.L.	Confidence Level
GPS	Global Positioning System
MPV	Most Probable Value
TCP	Transmission Control Protocol
UTC	Universal Time Coordinated
VME	VersaModule Eurocard bus
АЦП	Аналогово-Цифровой Преобразователь
КЛ	Космические Лучи
ПК	Персональный Компьютер
ПЛИС	Программируемая Логическая Интегральная Схема
ТАЦКП	Тункинский Астрофизический Центр Коллективного Пользования ИГУ
ФПР	Функция Пространственного Распределения (частиц)
ФЭУ	ФотоЭлектронный Умножитель
ЦСД	Центр Сбора Данных
ШАЛ	Широкий Атмосферный Ливень
н.у.м.	Над Уровнем Моря (высота)

Список литературы

1. *Hess, V. F.* Uber Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten / V. F. Hess // *Phys. Z.* — 1912. — Jg. 13. — S. 1084–1091.
2. *Ткачев, Л.* К столетию открытия космических лучей, или История, полная загадок / Л. Ткачев // Дубна. — 2013. — Т. 5/6. — С. 7–10.
3. *Росси, Б.* Космические лучи / Б. Росси ; пер. Н. Зелевинская, В. Максименко. — М. : Атомиздат, 1966. — 236 с.
4. *Pacini, D.* Penetrating Radiation at the Surface of and in Water / D. Pacini // *Nuovo Cim.* — 1912. — Vol. 8. — P. 93–100.
5. *Carlson, P.* Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays / P. Carlson, A. De Angelis // *Eur. Phys. J. H.* — 2010. — Vol. 35. — P. 309–329.
6. *De Angelis, A.* Domenico Pacini and the discovery of cosmic rays / A. De Angelis, P. Carlson, N. Giglietto // 32nd International Cosmic Ray Conference. Vol. 1. — 2011. — P. 2.
7. *Millikan, R. A.* High Frequency Rays of Cosmic Origin / R. A. Millikan // *Science.* — 1925. — Vol. 62, no. 1612. — P. 445–448.
8. *Friedlander, M.* Physics: A century of cosmic rays / M. Friedlander // *Nature.* — 2012. — Vol. 483N7390. — P. 400–401.
9. *Greisen, K.* End to the cosmic ray spectrum? / K. Greisen // *Phys. Rev. Lett.* — 1966. — Vol. 16. — P. 748–750.
10. *Zatsepin, G. T.* Upper limit of the spectrum of cosmic rays / G. T. Zatsepin, V. A. Kuzmin // *JETP Lett.* — 1966. — Vol. 4. — P. 78–80.
11. *Никольский, С. И.* Широкие атмосферные ливни космического излучения / С. И. Никольский // *Усп. физ. наук.* — 1962. — Т. 78, № 11. — С. 365–410.
12. *Kampert, K.* Extensive Air Showers and Ultra High-Energy Cosmic Rays: A Historical Review / K. Kampert, A. A. Watson // *Eur. Phys. J. H.* — 2012. — Vol. 37. — P. 359–412.

13. *Grieder, P.* Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects — A Tutorial, Reference Manual and Data Book / P. Grieder. — Springer Berlin Heidelberg, 2010. — 1118 p.
14. *Skobelzyn, D.* Über eine neue Art sehr schneller β -Strahlen / D. Skobelzyn // Zs. Phys. — 1929. — Jg. 54. — S. 686–702.
15. *Zatsepin, G.* Dmitri V. Skobeltsyn / G. Zatsepin, G. Khristiansen // Physics Today. — 1992. — Vol. 45, no. 5. — P. 74–76.
16. Extensive cosmic ray showers / P. Auger [et al.] // Rev. Mod. Phys. — 1939. — Vol. 11. — P. 288–291.
17. *Blasi, P.* Origin of very high- and ultra-high-energy cosmic rays / P. Blasi // Comptes Rendus Physique. — 2014. — Vol. 15. — P. 329–338.
18. *Drury, L. O.* Origin of Cosmic Rays / L. O. Drury // Astropart. Phys. — 2012. — Vol. 39/40. — P. 52–60.
19. *Птускин, В. С.* Происхождение космических лучей / В. С. Птускин // Усп. физ. наук. — 2010. — Т. 180, № 9. — С. 1000–1004.
20. *Гинзбург, В. Л.* Некоторые проблемы гамма-астрономии / В. Л. Гинзбург, В. А. Догель // Усп. физ. наук. — 1989. — Т. 158, № 5. — С. 3–58.
21. *Lee, S.* On the propagation of extragalactic high-energy cosmic and gamma-rays / S. Lee // Phys. Rev. D. — 1998. — Vol. 58. — P. 043004.
22. *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.
23. Diffuse radiation from cosmic ray interactions in the galaxy / V. S. Berezhinsky [et al.] // Astropart. Phys. — 1993. — Vol. 1. — P. 281–288.
24. Cosmology With 100-Tev gamma-ray Telescopes / F. Halzen [et al.] // Phys. Rev. D. — 1990. — Vol. 41. — P. 342–346.
25. *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.
26. *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.

27. 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.
28. *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.
29. *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.
30. *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.
31. 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.
32. 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.
33. Peta-electron volt gamma-ray emission from the Crab Nebula / Z. Cao [et al.] // *Science.* — 2021. — Vol. 373, no. 6553. — P. 425—430.
34. 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.
35. 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.
36. TAIGA—A hybrid array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics / N. Budnev [et al.] // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2022. — Vol. 1039. — P. 167047.
37. The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: Status of 2011 / S. Berezhnev [et al.] // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2012. — Vol. 692. — P. 98—105.

38. The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array / N. M. Budnev [et al.] // *Astropart. Phys.* — 2020. — Vol. 117. — P. 102406.
39. 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.
40. *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.
41. 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.
42. 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.
43. The KASCADE-Grande experiment / W. D. Apel [et al.] // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2010. — Vol. 620, no. 2. — P. 202—216.
44. Cluster type EAS array of the NEVOD experimental complex / M. B. Amelchakov [et al.] // *JINST.* — 2017. — Vol. 12, no. 06. — P. C06033.
45. EAS array of the NEVOD Experimental Complex / I. Yashin [et al.] // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 632. — P. 012029.
46. *Sciutto, S. J.* The AIRES system for air shower simulations: An Update / S. J. Sciutto // 27th International Cosmic Ray Conference. — 06/2001.
47. Моделирование сцинтилляционного эксперимента Тунка-133 / Н. М. Буднев [и др.] // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* — 2014. — № 4. — С. 80.
48. 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.

49. *Иванова, А. Л.* Исследование возможностей сцинтилляционной установки Tunka-Grande для изучения первичных космических лучей в области энергий 10^{16} - 10^{18} эВ : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.23 / А. Л. Иванова. — И., 2015. — С. 114.
50. A LED flasher for TUNKA experiment / В. К. Lubsandorzhev [et al.] // 30th International Cosmic Ray Conference. Vol. 5. — 2007. — P. 1117—1120.
51. 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.
52. *Сулаков, В. П.* Исследование массового состава первичного космического излучения в области сверхвысоких энергий : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.23 / В. П. Сулаков. — М., 1999. — С. 132.
53. 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.
54. GEANT4-a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 506. — P. 250.
55. Recent developments in Geant4 / J. Allison [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2016. — Vol. 835. — P. 186—225.
56. *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.
57. Установка Tunka-Grande — статус и перспективы / Р. Д. Монхоев [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. — 2017. — Т. 81, № 4. — С. 504—506.
58. The Tunka-Grande experiment / R. D. Monkhoev [et al.] // JINST. — 2017. — Vol. 12, no. 6. — P. C06019.
59. 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.
60. 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.

61. Geant4 simulation of the Tunka-Grande experiment / R. Monkhoev [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2021. — Vol. 2103, no. 1. — P. 012001.
62. *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.
63. *Монхоев, Р. Д.* Сцинтилляционная установка Tunka-Grande: статус, результаты и планы / Р. Д. Монхоев // Письма в ЭЧАЯ. — 2023. — Т. 20, № 5. — С. 1117—1136.
64. Основные результаты эксперимента Tunka-Grande / Р. Д. Монхоев [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 954—961.
65. *Kulikov, G.* On the Size Spectrum of Extensive Air Showers / G. Kulikov, G. Khristiansen // JETP. — 1959. — Vol. 8, no. 3. — P. 441—444.
66. *Castellina, A.* Cosmic rays and high energy physics: The EAS-TOP data / A. Castellina // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. — 2003. — Vol. 122. — P. 243—246.
67. A Large air shower array to search for astrophysical sources emitting gamma-rays with energies $\geq 10^{14}$ eV / A. Borione [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 1994. — Vol. 46. — P. 329—352.
68. Investigation of the main characteristics of the superhigh energy primary cosmic radiation in the GAMMA experiment (Mt. Aragats, Armenia) / A. P. Garyaka [et al.] // J. Contemp. Phys. — 2013. — Vol. 48. — P. 51—61.
69. Tunka-25 Air Shower Cherenkov array: The main results / N. Budnev [et al.] // Astropart. Phys. — 2013. — Vol. 50—52. — P. 18—25.
70. *Романенко, В.* Гамма-астрономия сверхвысоких энергий на установке «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН / В. Романенко, В. Петков, А. Лидванский // ЖЭТФ. — 2022. — Т. 161, № 4. — С. 523—532.
71. Установка «Андырчи» для регистрации ШАЛ над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом / Е. Алексеев [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. — 1993. — Т. 57, № 4. — С. 99.
72. Highlights from the GRAPES-3 experiment / P. Mohanty [et al.] // PoS. — 2022. — Vol. ICRC2021. — P. 003.

73. New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station / A. P. Chubenko [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2016. — Vol. 832. — P. 158—178.
74. The Cosmic ray experiment KASCADE / T. Antoni [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 513. — P. 490—510.
75. The cosmic ray energy spectrum measured with the new Tibet hybrid experiment / M. Amenomori [et al.] // EPJ Web Conf. — 2019. — Vol. 208. — P. 03001.
76. Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays Between $10^{14.5}$ and 10^{18} eV / M. Nagano [et al.] // J. Phys. G. — 1984. — Vol. 10. — P. 1295.
77. The cosmic ray spectrum at energies above 10^{17} eV / D. M. Edge [et al.] // J. Phys. A. — 1973. — Vol. 6. — P. 1612—1634.
78. The Cosmic Ray Energy Spectrum Above 10^{17} eV / M. M. Winn [et al.] // J. Phys. G. — 1986. — Vol. 12. — P. 653—674.
79. IceTop: The surface component of IceCube / R. Abbasi [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2013. — Vol. 700. — P. 188—220.
80. Status of the Yakutsk Air Shower Array and Future Plans / A. K. Alekseev [et al.] // Phys. At. Nucl. — 2021. — Vol. 84, no. 6. — P. 893—906.
81. *Nagano, M.* Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays / M. Nagano, A. A. Watson // Rev. Mod. Phys. — 2000. — Vol. 72. — P. 689—732.
82. *Shinozaki, K.* AGASA results / K. Shinozaki // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. — 2006. — Vol. 151. — P. 3—10.
83. Recent results from the Fly's Eye experiment / M. A. Huang [et al.] // NATO Sci. Ser. C. — 1995. — Vol. 458. — P. 123—134.
84. *Sokolsky, P.* Recent results from the High Resolution Fly's Eye experiment: An introduction / P. Sokolsky // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. — 2007. — Vol. 165. — P. 11—18.
85. The Status of the Telescope Array experiment / H. Tokuno [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2011. — Vol. 293. — P. 012035.
86. The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory / A. Aab [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2015. — Vol. 798. — P. 172—213.

87. Energy Spectrum of Cosmic Rays at Energies of $5 \cdot 10^{15}$ - $5 \cdot 10^{17}$ eV / Y. Fomin [et al.] // International Cosmic Ray Conference. Vol. 2. — 1991. — P. 85.
88. Nuclear composition of primary cosmic rays in the 'knee' region according MSU EAS array data / Y. Fomin [et al.] // J. Phys. G. — 1999. — Vol. 22. — P. 1839.
89. Спектр и состав космических лучей при энергиях 10^{15} - 10^{18} эВ / Н. Н. Калмыков [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. — 2010. — № 4. — С. 40.
90. Спектр широких атмосферных ливней по числу мюонов в области за изломом в энергетическом спектре космических лучей / Н. Н. Калмыков [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. — 2011. — № 1. — С. 84.
91. 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.
92. Final results of the LOPEs radio interferometer for cosmic-ray air showers / W. D. Apel [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 2. — P. 176.
93. A warm-liquid calorimeter for cosmic-ray hadrons / J. Engler [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 1999. — Vol. 427, no. 3. — P. 528—542.
94. Muon tracking detector for the air shower experiment KASCADE / P. Doll [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2002. — Vol. 488, no. 3. — P. 517—535.
95. Status and Future Prospects of the KASCADE Cosmic-ray Data Centre KCDC / A. Haungs [et al.] // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 422.
96. KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems / T. Antoni [et al.] // Astropart. Phys. — 2005. — Vol. 24. — P. 1—25.
97. The spectrum of high-energy cosmic rays measured with KASCADE-Grande / W. D. Apel [et al.] // Astropart. Phys. — 2012. — Vol. 36. — P. 183—194.
98. Kneelike Structure in the Spectrum of the Heavy Component of Cosmic Rays Observed with KASCADE-Grande / W. D. Apel [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2011. — Vol. 107. — P. 171104.

99. 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.
100. NEVOD — An experimental complex for multi-component investigations of cosmic rays and their interactions in the energy range 1 — 10^{10} GeV / I. I. Yashin [et al.] // *JINST.* — 2021. — Vol. 16, no. 08. — T08014.
101. Cosmic ray neutrino detection on the ground level / V. M. Ainautdinov [et al.] // *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* — 1998. — Vol. 66. — P. 235—238.
102. *Петрухин, А. А.* Черенковский водный детектор НЕВОД / А. А. Петрухин // *Усп. физ. наук.* — 2015. — Т. 185, № 5. — С. 521—530.
103. Modern status of the Tien-Shan cosmic ray station / V. A. Ryabov [et al.] // *EPJ Web Conf.* — 2017. — Vol. 145. — P. 12001.
104. Performance of the Horizon-10T detector system in Physics Run 1 / R. Beisembaev [et al.] // *EPJ Web Conf.* — 2019. — Vol. 208. — P. 08008.
105. The composition of cosmic rays according to the data on EAS cores / S. B. Shaulov [et al.] // 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions. — 06/2022.
106. Spatial and Temporal Characteristics of EAS with Delayed Particles. / R. Beisembaev [et al.] // *PoS.* — 2020. — Vol. ICRC2019. — P. 195.
107. The TAIGA experiment: from cosmic ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley / N. Budnev [et al.] // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 718. — P. 052006.
108. The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results / I. A. Belolaptikov [et al.] // *Astropart. Phys.* — 1997. — Vol. 7, no. 3. — P. 263—282.
109. The optical module of the Baikal deep underwater neutrino telescope / R. Bagdjev [et al.] // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 1999. — Vol. 420, no. 1. — P. 138—154.
110. *Lubsandorzhev, B.* Photodetectors of Lake Baikal Neutrino experiment and Tunka Air Cherenkov Array / B. Lubsandorzhev // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2000. — Vol. 442, no. 1. — P. 368—373.

111. The Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays by the Data of Tunka Cherenkov Array / S. Bryanski [et al.] // 24th International Cosmic Ray Conference. Vol. 2. — 1995. — P. 724.
112. Measurement of cosmic-ray air showers with the Tunka Radio Extension (Tunka-Rex) / P. Bezyazeev [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2015. — Vol. 802. — P. 89—96.
113. Towards gamma-ray astronomy with timing arrays / M. Tluczykont [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2015. — Vol. 632. — P. 012042.
114. The hybrid installation TAIGA: design, status and preliminary results / N. Lubsandorzhev [et al.] // PoS. — 2019. — Vol. ICRC2019. — P. 729.
115. Design features and data acquisition system of the TAIGA-Muon scintillation array / A. Ivanova [et al.] // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 06. — P. C06057.
116. Scintillation detectors for the TAIGA experiment / I. Astapov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2019. — Vol. 936. — P. 254—256.
117. Primary Cosmic Rays Energy Spectrum and Mean Mass Composition by the Data of the TAIGA Astrophysical Complex / V. Prosin [и др.] // 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions. — 2022.
118. The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems / M. Aartsen [et al.] // JINST. — 2017. — Vol. 12, no. 03. — P03012.
119. The Surface Array planned for IceCube-Gen2 / F. Schroeder [et al.] // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 407.
120. 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.
121. Cosmic ray spectrum from 250 TeV to 10 PeV using IceTop / M. G. Aartsen [et al.] // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102. — P. 122001.
122. The surface detector array of the Telescope Array experiment / T. Abu-Zayyad [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2012. — Vol. 689. — P. 87—97.
123. New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array experiment / H. Tokuno [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2012. — Vol. 676. — P. 54—65.

124. *Ogio, S.* Telescope Array Low energy Extension(TALE) Hybrid / S. Ogio // PoS. — 2020. — Vol. ICRC2019. — P. 375.
125. *Ogio, S.* The status of the TALE surface detector array and TALE infill project / S. Ogio // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 255.
126. NICHE detector and operations / Y. Omura [et al.] // PoS. — 2020. — Vol. ICRC2019. — P. 379.
127. FADC-based DAQ for HiRes Fly’s Eye / J. H. Boyer [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2002. — Vol. 482, no. 1. — P. 457—474.
128. 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.
129. The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode / R. U. Abbasi [et al.] // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 909, no. 2. — P. 178.
130. The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory / J. Abraham [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2010. — Vol. 620, no. 2. — P. 227—251.
131. Performance of the 433 m surface array of the Pierre Auger Observatory / P. Abreu [et al.] // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 224.
132. *Huege, T.* Radio detection of cosmic rays with the Auger Engineering Radio Array / T. Huege // EPJ Web Conf. — 2019. — Vol. 210. — P. 05011.
133. Antennas for the Detection of Radio Emission Pulses from Cosmic-Ray induced Air Showers at the Pierre Auger Observatory / P. Abreu [et al.] // JINST. — 2012. — Vol. 7. — P10011.
134. *Castellina, A.* AugerPrime: the Pierre Auger Observatory Upgrade / A. Castellina // EPJ Web Conf. — 2019. — Vol. 210. — P. 06002.
135. Status and performance of the underground muon detector of the Pierre Auger Observatory / P. Abreu [et al.] // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 233.
136. *Verzi, V.* Measurement of the energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays using the Pierre Auger Observatory / V. Verzi // PoS. — 2020. — Vol. ICRC2019. — P. 450.

137. *Novotny, V.* Measurement of the spectrum of cosmic rays above $10^{16.5}$ eV with Cherenkov-dominated events at the Pierre Auger Observatory / V. Novotny // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2019. — P. 374.
138. *Yushkov, A.* Mass Composition of Cosmic Rays with Energies above $10^{17.2}$ eV from the Hybrid Data of the Pierre Auger Observatory / A. Yushkov // PoS. — 2020. — Vol. ICRC2019. — P. 482.
139. 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.
140. Introduction to Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) / C. Zhen [et al.] // Chin. Astron. Astrophys. — 2019. — Vol. 43. — P. 457—478.
141. *He, H.* Design of the LHAASO detectors / H. He // Radiat. Detect. Technol. Methods. — 2018. — Vol. 2.
142. Operations of the LHAASO-WCDA / C. Liu [et al.] // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 750.
143. The Giant Radio Array for Neutrino Detection (GRAND): Science and Design / J. Alvarez-Muniz [et al.] // Sci. China Phys. Mech. Astron. — 2020. — Vol. 63, no. 1. — P. 219501.
144. *Zhang, Y.* Self-trigger radio prototype array for GRAND / Y. Zhang // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 1035.
145. Performance of SKA as an air shower observatory / S. Buitink [et al.] // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 415.
146. A comparison of the cosmic-ray energy scales of Tunka-133 and KASCADE-Grande via their radio extensions Tunka-Rex and LOPES / W. D. Apel [et al.] // Phys. Lett. B. — 2016. — Vol. 763. — P. 179—185.
147. *Deligny, O.* The energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays measured at the Pierre Auger Observatory and at the Telescope Array / O. Deligny // PoS. — 2020. — Vol. ICRC2019. — P. 234.
148. 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.

149. 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.
150. Investigating the characteristics of scintillation detectors for the NEVOD-EAS experiment / O. Likiy [et al.] // *Instrum. Exp. Tech.* — 2016. — Vol. 59. — P. 781—788.
151. Data acquisition system for the TUNKA-133 array / N. M. Budnev [et al.] // 10th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications. — 2008. — P. 287—291.
152. *Landau, L.* On the energy loss of fast particles by ionization / L. Landau // *J. Phys. (USSR)*. — 1944. — Vol. 8. — P. 201—205.
153. *Moyal, J. E.* Theory of ionization fluctuations / J. E. Moyal // *Phil. Mag. Ser. 7*. — 1955. — Vol. 46, no. 374. — P. 263—280.
154. *Cecchini, S.* Atmospheric muons: experimental aspects / S. Cecchini, M. Spurio // *Geosci.Instrum.Meth.Data Syst.* — 2012. — Vol. 1. — P. 185—196.
155. On the choice of the lateral distribution function for EAS charged particles / N. N. Kalmykov [et al.] // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* — 2007. — Vol. 71, no. 4. — P. 522—524.
156. Full Monte-Carlo description of the Moscow State University Extensive Air Shower experiment / Y. A. Fomin [et al.] // *JINST*. — 2016. — Vol. 11, no. 08. — T08005.
157. *Kamata, K.* The Lateral and the Angular Structure Functions of Electron Showers / K. Kamata, J. Nishimura // *Prog.Theor.Phys.Suppl.* — 1958. — Vol. 6. — P. 93—155.
158. *Greisen, K.* Cosmic Ray Showers / K. Greisen // *Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.* — 1960. — Vol. 10, no. 1. — P. 63—108.
159. *Maze, R.* On an attempt of detection of primary cosmic photons of very high energy / R. Maze, A. Zawadzki // *IL Nuovo Cimento*. — 1960. — Vol. 17, no. 5. — P. 625—633.
160. *Nelson, W. R.* The Egs4 Code System / W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers. — 1985. — Dec.

161. *Heck, D.* Low energy hadronic interaction models / D. Heck // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. — 2006. — Vol. 151. — P. 127—134.
162. *Ostapchenko, S.* QGSJET-II: physics, recent improvements, and results for air showers / S. Ostapchenko // EPJ Web Conf. — 2013. — Vol. 52. — P. 02001.
163. *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.

Приложение А

Координаты станций установки Tunka-Grande

Приложение содержит таблицу 4 с информацией об относительном расположении станций установки Tunka-Grande. Точка ($x = 0, y = 0, z = 0$) соответствует положению первого оптического детектора первого кластера установки Тунка-133. Ось абсцисс направлена на восток, ось ординат — на север, ось аппликат — в зенит.

Таблица 4 — Координаты станций установки Tunka-Grande.

Номер станции	Наземная часть			Подземная часть		
	x , м	y , м	z , м	x , м	y , м	z , м
1	-1,36	36,85	-0,23	4,40	35,68	-1,78
2	178,86	-94,65	-0,22	167,72	-91,93	-1,81
3	6,21	-234,92	0,03	15,83	-241,29	-1,53
4	-164,26	-169,61	1,10	-154,65	-175,94	-0,35
5	-207,97	108,60	-0,45	-216,83	115,98	-1,77
6	-67,49	236,83	-0,04	-79,08	236,63	-1,48
7	170,34	116,11	0,37	178,47	108,14	-1,42
8	438,09	-145,40	0,40	430,31	-136,86	-1,13
9	270,12	-287,70	-0,44	259,22	-284,11	-2,14
10	66,60	-416,57	-1,51	77,52	-420,22	-2,54
11	-135,31	-378,66	-0,50	-145,83	-374,06	-2,37
12	-334,49	-266,75	0,20	-344,99	-262,09	-1,64
13	-386,86	-81,92	-0,13	-398,21	-80,04	-1,93
14	-420,81	138,13	-0,46	-413,00	135,07	-0,18
15	-278,68	262,28	0,36	-289,74	265,48	-1,21
16	-87,80	391,87	1,32	-98,88	397,47	-0,37
17	127,73	363,27	0,68	116,45	365,84	-1,02
18	311,17	233,67	0,26	321,52	228,53	-1,25
19	381,44	47,42	0,31	392,06	42,92	-1,4

Приложение Б

Аппроксимирующие функции

В приложении приведены функции, используемые в настоящей работе для аппроксимации полученных зависимостей и распределений:

1. Линейная функция:

$$f(x) = p_0 + p_1 \cdot x, \quad (\text{Б.1})$$

2. Степенная функция:

$$f(x) = 10^{p_0} \cdot x^{p_1}, \quad (\text{Б.2})$$

3. Функция Мюллера:

$$f(x) = C \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} + \exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right)\right), \quad (\text{Б.3})$$

4. Экспоненциальная функция:

$$f(x) = \exp(C + p \cdot x), \quad (\text{Б.4})$$

5. Функция Гаусса:

$$f(x) = C \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (\text{Б.5})$$

6. Функция Рэлея:

$$f(x) = C \cdot x \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right). \quad (\text{Б.6})$$

Приложение В

Geant4-модель установки Tunka-Grande

Компьютерная модель станции установки Tunka-Grande реализована в программном пакете Geant4. Геометрия элементов станции максимально приближена к их реальным размерам, описанным в разделе 2.3. Конструктивные особенности станций №1 и №14 не были учтены в рамках настоящей работы. Описание основных материалов, используемых в модели, приведены в таблице 5.

Таблица 5 — Описание Geant4-модели станции установки Tunka-Grande

Материал	Состав	Плотность, г/см ³
Воздух	78% N, 21% O, 1% Ar	$1.225 \cdot 10^{-3}$
Грунт	57.2% O, 35.5% Si, 5.4% Al, 1.9% H	1.7
Сцинтиллятор	52.7% C, 47.3% H	1.032
Дюралюминий	93.5% Al, 4.4% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn	2.8
Сталь	70.25% Fe, 18.75% Cr, 9.25% Ni, 1% Mn, прочее 0.75%	7.8
Бетон	52.9% O, 33.7% Si, 4.4% Ca, 3.4% Al, 1.6% Na, 1.4% Fe, прочее 2.6%	2.3

Приложение Г

Условие на удаленность положения оси ШАЛ относительно станций установки Tunka-Grande

В приложении на рисунках Г.1 и Г.2 показана зависимость суммарного числа всех частиц N_{sum} и суммарного числа мюонов N_{mu} от параметра ρ_{200} при разном удалении оси ШАЛ относительно станций установки Tunka-Grande. Рассматриваемые зависимости получены из компьютерного моделирования для первичных протонов (красный цвет), ядер железа (зеленый цвет) и гамма-квантов (черный цвет). Под суммарным числом понимается количество частиц в каждом ливне, зарегистрированных всеми подземными частями станций. Диапазон расстояний, приведенный на графиках, определяет удаленность положения оси ШАЛ относительно координат станций в пределах указанных значений. События без зарегистрированных частиц в подземных частях станций соответствуют $lg(N_{sum}) = -1$ и $lg(N_{mu}) = -1$.

На рисунке Г.3 представлена зависимость среднего значения числа частиц N_{sum} (кружки) и N_{mu} (крестики) от положения оси ШАЛ относительно координат станций. Средняя величина вычислялась по данным рисунков Г.1 и Г.2 в интервале значений параметра $lg(\rho_{200}/\text{частица} \cdot \text{м}^{-2})$ от 0.75 до 1.

Из приведенных рисунков следует, что вблизи оси ШАЛ и вплоть до 80 м значимую часть в суммарное энерговыделение подземных частей станций вносят высокоэнергичные частицы электрон-фотонной и адронной компонент ШАЛ. Поэтому при используемой в настоящей работе методике поиска диффузного гамма-излучения целесообразно рассматривать экспериментальные данные, начиная только с некоторого расстояния относительно положения оси ливня. В качестве порогового было выбрано значение 70 м, так как оно является близким к максимальному, при котором еще возможно исключение из анализа данных только одной станции.

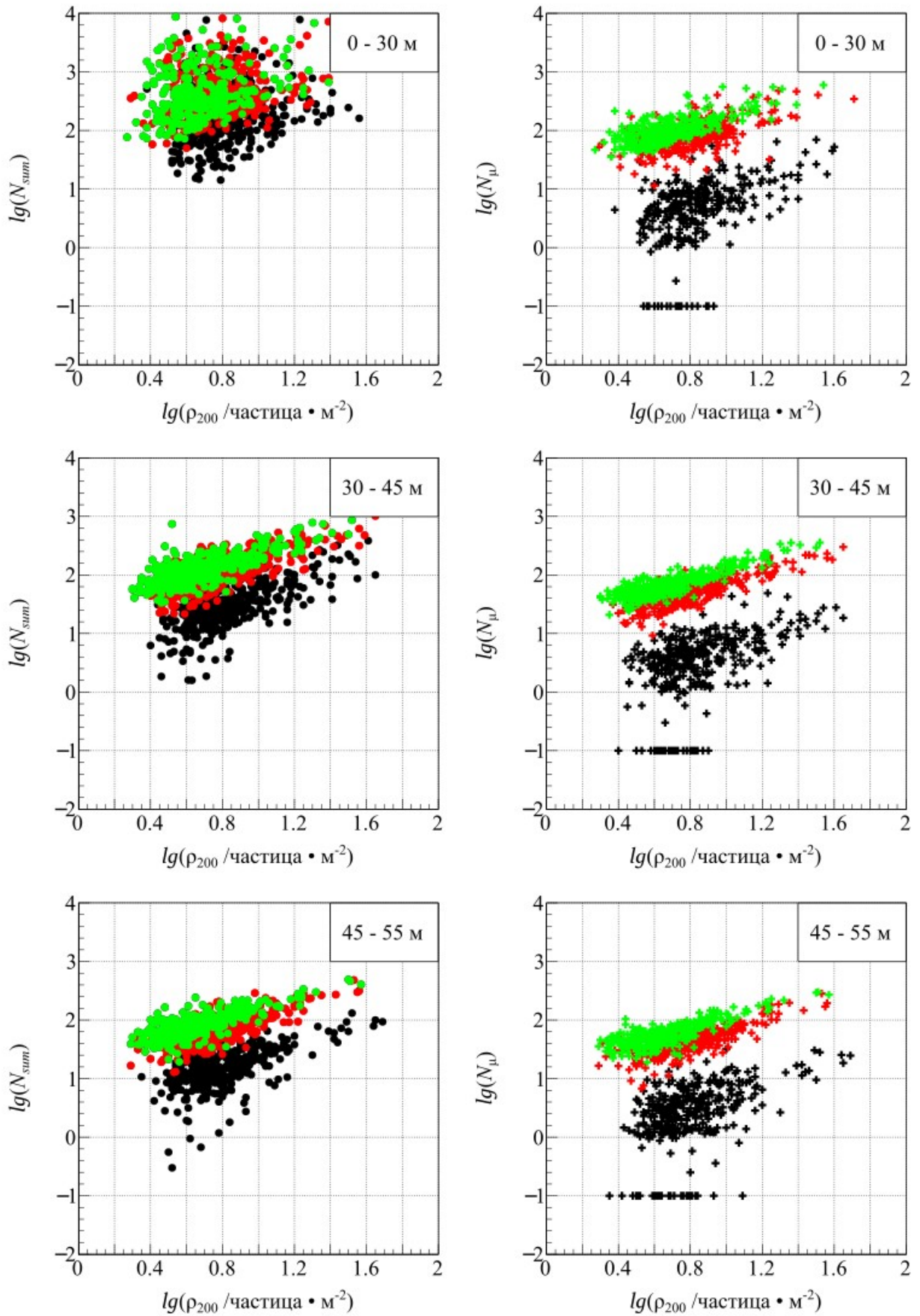


Рисунок Г.1 — Зависимость числа частиц N_{sum} и N_{μ} от параметра ρ_{200} на расстоянии от 0 до 55 м.

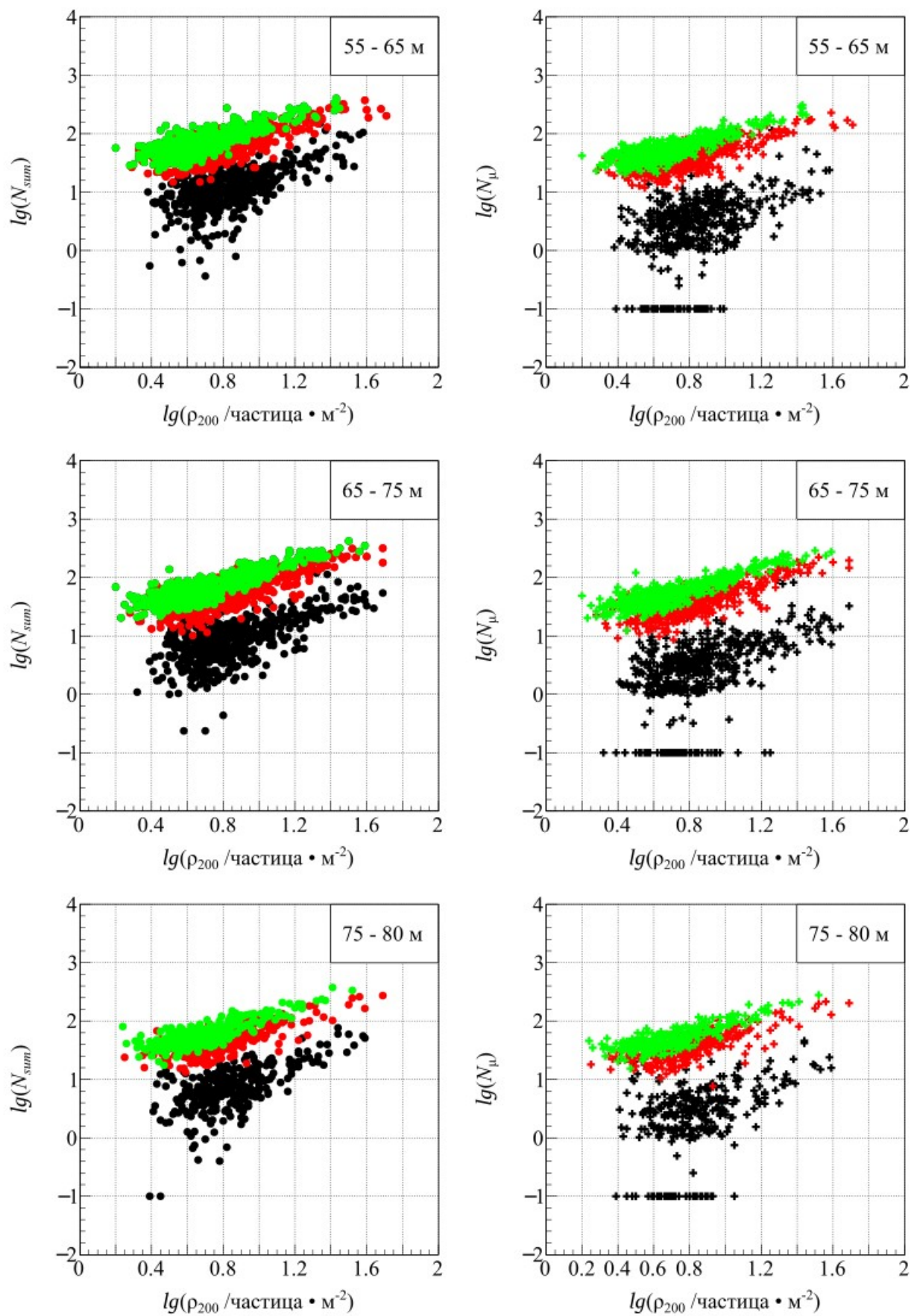


Рисунок Г.2 — Зависимость числа частиц N_{sum} и N_{μ} от параметра ρ_{200} на расстоянии от 55 до 80 м.

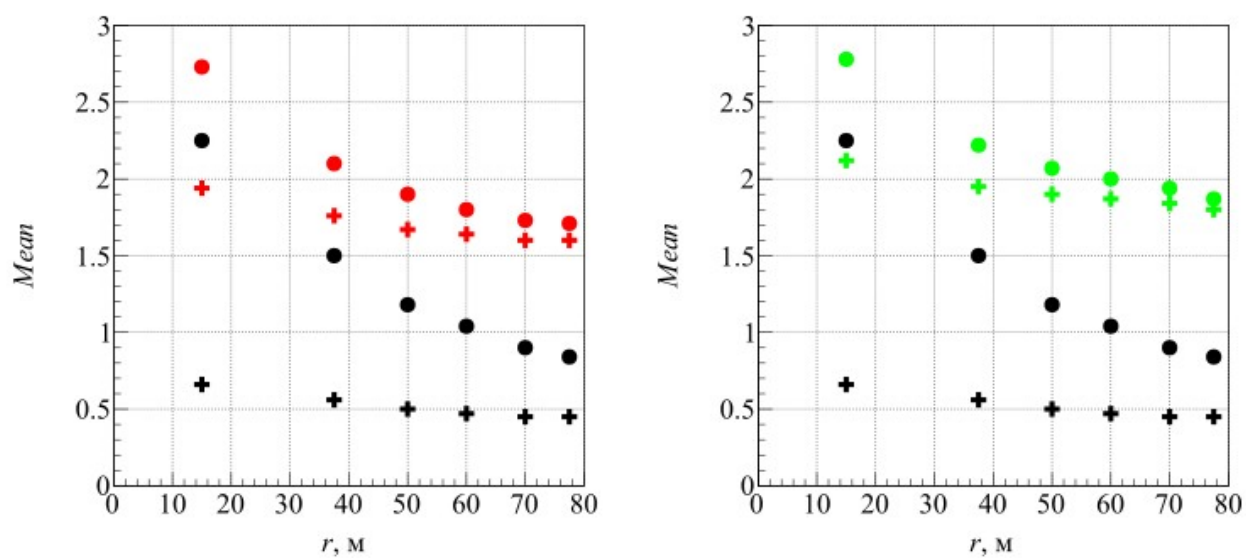


Рисунок Г.3 — Среднее число частиц N_{sum} и N_{μ} в зависимости от положения оси ШАЛ относительно станций установки Tunka-Grande. Красным, зеленым и черным цветом выделены значения, соответствующие первичным протонам, ядрам железа и гамма-квантам.