

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Безъязыков Павел Александрович

**Восстановление глубины максимума ШАЛ по данным  
установки Tunka-Rex**

Специальность 1.3.4. —  
«Радиофизика»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н.  
Буднев Николай Михайлович

Иркутск – 2022

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> . . . . .	4
<b>Глава 1. Космические лучи и широкие атмосферные ливни</b> . . . . .	12
1.1 Природа космических лучей . . . . .	14
1.1.1 Энергетический спектр . . . . .	17
1.1.2 Массовый состав . . . . .	18
1.2 Широкие атмосферные ливни . . . . .	19
1.2.1 Способы регистрации . . . . .	20
1.2.2 Эволюция и морфология ШАЛ . . . . .	23
1.3 Радиоизлучение ШАЛ . . . . .	26
1.3.1 Механизмы радиоизлучения . . . . .	27
1.3.2 Обзор радиодетекторов . . . . .	29
1.4 Резюме . . . . .	36
<b>Глава 2. Tunka-Rex</b> . . . . .	38
2.1 Тункинская астрофизическая обсерватория . . . . .	39
2.1.1 Историческая справка и общие сведения . . . . .	41
2.1.2 Тунка-133 . . . . .	42
2.1.3 Tunka-GRANDE . . . . .	44
2.1.4 Пилотный комплекс детекторов ШАЛ от гамма-квантов . . . . .	45
2.2 Tunka-Rex . . . . .	48
2.2.1 Параметры и геометрия детектора . . . . .	48
2.2.2 Моделирование . . . . .	53
2.2.3 Стандартная процедура набора и обработки данных . . . . .	54
2.2.4 Восстановление параметров ШАЛ стандартным методом . . . . .	56
2.3 Резюме . . . . .	58
<b>Глава 3. Модель эффективной апертуры антенной решетки, регистрирующей радиоизлучение ШАЛ</b> . . . . .	60
3.1 ФПР и расчет отпечатка ливня . . . . .	63
3.2 Расчет эффективности регистрации ШАЛ . . . . .	65

	Стр.
3.3 Верификация модели . . . . .	67
<b>Глава 4. Подавление шумов с помощью автоэнкодера . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1 Выбор оптимальной конфигурации и процесс обучения . . . . .	74
4.2 Восстановление низкоамплитудных импульсов . . . . .	78
<b>Глава 5. Восстановление глубины максимума . . . . .</b>	<b>83</b>
5.1 Восстановление импульса ШАЛ . . . . .	83
5.2 Восстановление параметров ШАЛ . . . . .	85
5.3 Систематические эффекты . . . . .	87
5.4 Оценка точности восстановления . . . . .	88
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>91</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>Словарь терминов . . . . .</b>	<b>94</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>95</b>

## Введение

Космические лучи (КЛ) представляют собой ускоренные заряженные частицы, движущиеся в космическом пространстве. Наблюдаемый энергетический спектр таких частиц простирается достаточно широко – вплоть до энергий порядка  $10^{20}$  эВ. Большая часть низкоэнергетичных КЛ (до  $\approx$  сотен ТэВ), наблюдаемых в околоземном пространстве, в силу большого потока доступны для прямых наблюдений [1].

КЛ высоких энергий ассоциируются с удаленными источниками, расположенными как в нашей галактике, так и за ее пределами. Существует множество моделей происхождения и ускорения таких КЛ - например, ускорение на ударных волнах в результате взрывов сверхновых, также среди возможных источников упоминаются квазары, активные ядра галактик и пр.

Исследование параметров таких высокоэнергетичных КЛ позволяет найти ответы на многие вопросы, стоящие перед современной астрофизикой и астрономией – такими как: механизмы роста и развития звезд, распределение крупномасштабных магнитных полей вблизи Солнечной системы и в масштабах галактики. Знание массового состава КЛ необходимо для понимания состава и природы их источников и механизмов ускорения.

Поток КЛ падает с ростом энергии по степенному закону. Для энергии в  $10^{15}$  эВ поток КЛ составляет порядка 1 частицы/м<sup>2</sup>/год, поэтому для исследования КЛ высоких энергий используются наземные установки, которые регистрируют различные компоненты каскадов (широких атмосферных ливней, ШАЛ), развивающихся в результате взаимодействия КЛ и гамма-квантов с земной атмосферой на больших высотах. Для проведения эффективных наблюдений и набора достаточной статистики для таких энергий требуются установки значительной площади. Размеры отпечатка ШАЛ (геометрического сечения ШАЛ плоскостью земной поверхности, внутри которой интенсивность потока частиц и электромагнитного излучения достаточно высока для его регистрации) может достигать десятков км. Свойства каскада (такие, как геометрия, распределение вторичных частиц, черенковского и радиоизлучения) связаны с параметрами первичной частицы (тип, энергия, направление движения), что позволяет восстанавливать их путем наблюдения ШАЛ.

Одним из эффективных подходов к наблюдению каскадов с поверхности Земли является использование комплексных обсерваторий, регистрирующих различные компоненты каскада. Такие обсерватории состоят из массивов детекторов различных типов - например, детекторов черенковского света, флуоресцентных телескопов, детекторов частиц, радиодетекторов, расположенных на общем полигоне. Т.к. детекторы разных типов обладают разной чувствительностью к разным компонентам ШАЛ, комплексный подход позволяет восстанавливать каждый параметр ШАЛ с максимально возможной точностью в разных энергетических диапазонах, что, в свою очередь, повышает точность восстановления характеристик потоков заряженных КЛ и гамма-квантов.

Основными типами детекторов, используемыми для регистрации ШАЛ на поверхности, являются оптические детекторы (черенковское и флуоресцентное излучение) и детекторы частиц. Эти детекторы обладают двумя существенными недостатками. Первый из них характерен только для черенковских детекторов - они могут работать только в ясные безлунные ночи при отсутствии светового загрязнения. Таким образом, эффективное время наблюдений с помощью черенковских детекторов не превышает 10% от календарного, что влияет на объем набранной статистики. Так, для детектора Тунка-133, работающего в Восточной Сибири, эффективное время наблюдений по данным 2009-2021 составило порядка 300-400 часов в год [2].

Второй существенный недостаток, характерный как для оптических детекторов, так и для детекторов частиц, заключается в их высокой стоимости, сложности развертывания и обслуживания. Фотоумножители, используемые в составе этих детекторов, являются сложными устройствами, чувствительными к режиму работы и внешним условиям. В случае использования сцинтилляторов также необходимо учитывать постепенную деградацию их материала, ведущую к уменьшению световых выходов и необходимости перекалибровки детекторов.

Радиоустановки для регистрации ШАЛ лишены этих недостатков. Отдельная антенная станция является простым и недорогим устройством, что позволяет, в сравнении с детекторами других типов и при прочих равных условиях строить детекторы большей площади и плотности, что позволяет увеличить точность восстановления параметров ШАЛ и количество восстановленных событий. Эффективность работы радиодетектора мало зависит от погодных условий (за исключением гроз). Обслуживание радиодетектора также сравнительно незатратно по временным и человеческим ресурсам. Методики цифровой обработки радиосиг-

налов позволяют восстанавливать параметры ШАЛ с высокой точностью. В силу этих преимуществ радиометод регистрации ШАЛ представляет особый интерес для задач регистрации КЛ высоких и сверхвысоких энергий. Однако, существующие методы восстановления параметров ШАЛ по данным радиоустановок развиты недостаточно для достижения точности, сравнимой с оптическими детекторами и детекторами частиц.

Теоретическая база для исследования ШАЛ радиометодом разработана более полувека назад[3], однако прогресс в практическом использовании радиодетекторов ШАЛ начал активно развиваться только в 2000-х годах вместе с развитием элементной базы и вычислительной техники. Сложность восстановления параметров ШАЛ по данным радиоустановок сопряжена с низкими отношениями сигнал/шум и сложностью определения апертуры радиоустановок, что требует специальных методов обработки данных и фильтрации шума. При выборе места для развертывания радиодетектора в радио-тихом регионе (например, таком, как Антарктида), влияние проблемы зашумленности данных снижается. Однако, таких мест на Земле не так много и с каждым годом становится все меньше. Кроме того, радио-тихие места, как правило, характеризуются отсутствием инфраструктуры, что обуславливает дополнительные сложности в развертывании и обслуживании детектора. Таким образом, важной задачей, решение которой необходимо для эффективного использования радиометода регистрации ШАЛ, является разработка методов фильтрации шумов и выделения сигналов ШАЛ на их фоне.

При восстановлении таких статистических характеристик КЛ, как энергетический спектр и массовый состав, необходимо точное знание потока КЛ с заданными параметрами. Регистрируемый на радиоустановке ШАЛ поток событий может значительно отличаться от реального, т.к. эффективность регистрации зависит как от параметров установки и ее окружения, так и от параметров первичной частицы (в первую очередь, энергии и массы). Таким образом, для количественного восстановления потока КЛ необходимо знать эффективную апертуру радиоустановки.

**Актуальность** данной работы определяется необходимостью разработки специализированных интеллектуальных методов фильтрации шума и выделения сигналов ШАЛ на их фоне, расчета эффективной апертуры радиоустановки и детального исследования параметров радиосигнала ШАЛ.

**Целью** данной работы является разработка комплекса методик: расчета эффективной апертуры установок для исследования КЛ путем регистрации радио-

излучения ШАЛ; обработки радиосигналов ШАЛ, позволяющих восстанавливать глубину максимума ШАЛ; применение этих методик для обработки данных, полученных на установке Tunka-Rex.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику расчета эффективности регистрации ШАЛ на антенной решетке, и применить эту методику для расчета эффективной апертуры установки Tunka-Rex в зависимости от энергии КЛ.
2. Провести моделирование набора сигналов ШАЛ с учетом передаточной функции радиодетекторов установки Tunka-Rex.
3. Разработать методику выделения низкоамплитудных радиосигналов ШАЛ на фоне шума в данных установки Tunka-Rex с использованием сверточных нейросетей.
4. Разработать методику восстановления энергии первичной частицы по данным, обработанным сверточной нейросетью.
5. Определить связь формы импульса ШАЛ и глубины максимума ШАЛ.
6. Разработать программное обеспечение, необходимое для внедрения разработанных методик в процедуру обработки данных Tunka-Rex.
7. Восстановить глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex с использованием разработанных методик, сравнить результаты восстановления с результатами восстановления по данным установки Tunka-133, оценить точность восстановления.

**Научная новизна:**

1. Разработана оригинальная методика расчета эффективной апертуры антенных решеток, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ. Методика применена для расчета эффективной апертуры установки Tunka-Rex.
2. Впервые для обработки экспериментальных данных радиодетектора ШАЛ использована методика выделения сигнала ШАЛ на фоне шума с использованием сверточной нейросети. Методика протестирована на данных установки Tunka-Rex. По результатам тестирования установлено, что методика позволяет восстанавливать временные отметки подпороговых низкоамплитудных сигналов ШАЛ. Для восстановления энергии первичной частицы по данным, обработанным нейросетью, разработана оригинальная методика, основанная на когерентном сум-

мировании сигналов с отдельных антенных станций в соответствии с временными отметками сигналов, восстановленных нейросетью.

3. Разработана новая методика восстановления глубины максимума ШАЛ с учетом формы его радиоимпульса и систематических факторов, позволяющая повысить точность восстановления с 38 до 25-35 г/см<sup>2</sup> (в зависимости от энергии первичной частицы) по данным установки Tunka-Rex.

**Практическая значимость** Разработанные методики применены для обработки данных установки Tunka-Rex и могут быть использованы для обработки данных как существующих, так и будущих установок, предназначенных для исследования потоков КЛ путем регистрации радиосигналов ШАЛ.

**Методология и методы исследования.** Настоящая работа базируется на моделировании процесса регистрации ШАЛ антенной решеткой и анализе экспериментальных данных, набранных на установке Tunka-Rex. В ходе данной работы было проведено численное моделирование эффективной апертуры радиоустановки Tunka-Rex и верификация модели на экспериментальных данных. Для выделения низкоамплитудных импульсов ШАЛ на фоне шума были использованы методы машинного обучения (сверточный автоэнкодер). Для восстановления энергии ШАЛ по данным, обработанным автоэнкодером, была разработана методика восстановления амплитуды сигнала ШАЛ по обработанным данным и проведена эмпирическая подгонка функции пространственного радиоизлучения ШАЛ для низкоэнергетических событий. Для восстановления глубины максимума ШАЛ разработана методика подгонки огибающей радиоимпульса с использованием шаблонов по данным моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная модель расчета энергетической и угловой зависимости эффективности регистрации радиоизлучения ШАЛ антенной решеткой применена для расчета эффективной апертуры установки Tunka-Rex и проверена на данных совместных измерений с установкой Tunka-133. Результаты работы модели находятся в согласии с экспериментальными результатами.
2. Разработанная методика применения сверточной нейросети архитектуры “автоэнкодер” для выделения радиосигналов ШАЛ на фоне шума позволяет восстанавливать временные отметки импульсов ШАЛ в условиях низкого отношения сигнал/шум. Результаты апробации методики для обработки и анализа данных установки Tunka-Rex показывают возмож-

ность применения методики для восстановления энергии первичной частицы.

3. Разработанная методика восстановления глубины максимума ШАЛ по данным антенной решетки, учитывающая форму импульса ШАЛ и систематические эффекты, использована для восстановления глубины максимума ШАЛ от КЛ с энергиями  $10^{17} - 10^{18}$  эВ по данным установки Tunka-Rex. Методика обладает большей точностью в сравнении с методикой восстановления глубины максимума, ранее использовавшейся в обработке данных установки Tunka-Rex. Результаты, полученные с использованием методики, находятся в согласии с результатами, полученными в других экспериментах (Тунка-133, LOFAR, Auger).

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается их согласием с результатами других экспериментов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на: European Cosmic Rays Symposium 2016 (Torino, Italy), European Cosmic Rays Symposium + Russian Cosmic Rays Conference 2018 (Барнаул, Россия), Байкальской Школе Фундаментальной Физики 2017 (Иркутск, Россия), DPG-Frühjahrstagung 2019 (Aachen, Germany), Data Life Cycle Workshop 2019 (Иркутск, Россия), Data Life Cycle Workshop 2020 (Иркутск, Россия), International Cosmic Rays Conference 2021 (Berlin, Germany), семинарах IAP KIT (2019-2020) и НИИПФ ИГУ (2020-2021).

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в развертывании, обслуживании, технической поддержке и проведении измерений на установке Tunka-Rex; разработке базовой методики восстановления параметров ШАЛ по данным установки Tunka-Rex; создании программного обеспечения для обработки экспериментальных данных и восстановления параметров ШАЛ; разработке модели апертуры радиодетектора; разработке и отладке программного обеспечения для очистки экспериментальных данных от шумов и восстановления исходных сигналов; разработке методики восстановления глубины максимума ШАЛ. Представленные результаты получены либо самим автором, либо в ходе совместной работы в составе коллаборации Tunka-Rex.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 из которых – в журналах, рекомендованных ВАК либо внесенных в базы индексирования Web of Science и Scopus, 2 — в тезисах докладов.

**Структура диссертации:**

**Введение.** Обоснована актуальность исследования массового состава космических лучей высоких энергий, показан контекст и современное состояние исследований, сформулированы задачи, показана научная новизна и практическая значимость предлагаемых подходов, сформулированы защищаемые положения и дан обзор структуры диссертации.

**Глава 1.** Дан обзор природы космических лучей и широких атмосферных ливней. Проведен обзор мировой теоретической базы, описывающей динамику развития ШАЛ. Освещены способы регистрации ШАЛ. Представлены основные механизмы генерации радиоизлучения ШАЛ и связь наблюдаемого радиоизлучения с параметрами первичной частицы. Проведен обзор радиодетекторов ШАЛ.

**Глава 2.** Описаны основные инструменты Тункинского Астрофизического Центра Коллективного Пользования ИГУ, история их развития и полученные результаты. Приведено детальное описание детектора Tunka-Rex: аппаратная часть, программное обеспечение, процедура набора данных и методика восстановления параметров ШАЛ путем анализа функции пространственного распределения зарегистрированного радиоизлучения. Показаны сравнение результатов восстановления с восстановлением по данным хост-детектора Тунка-133.

**Глава 3.** Описана модель расчета эффективности регистрации ШАЛ на радиоустановке. Эффективность рассчитывается в зависимости от энергии и направления прихода ШАЛ с учетом расстояния до глубины максимума. Приведены результаты сравнения модели с экспериментальными данными установки Tunka-Rex.

**Глава 4.** Описан подход к удалению шума и восстановлению сигнала ШАЛ в данных детектора Tunka-Rex с помощью сверточной нейросети архитектуры ”автоэнкодер”. Описана процедура выбора оптимальной конфигурации нейросети и предварительных оценок эффективности ее работы. Приведены примеры восстановления импульсов ШАЛ по модельным и реальным данным. Описана новая методика восстановления энергии подпороговых событий с использованием данных, обработанных нейросетью.

**Глава 5.** Описана новая методика восстановления глубины максимума ШАЛ по данным Tunka-Rex путем подгонки импульса ШАЛ модельными шаблонами. Проведен учет систематических эффектов сдвига регистрируемой глубины максимума, вносимых динамикой рефракции атмосферы. Проведено восстановление глубины максимума ШАЛ в зависимости от энергии для данных Tunka-Rex

2012-2014 сезонов измерений. Приведено сравнение результатов восстановления с результатами других экспериментов.

**Заключение.** В заключении сформулированы основные результаты и подведены итоги проведенной работы.

## Глава 1. Космические лучи и широкие атмосферные ливни

История изучения космических лучей насчитывает более 100 лет. Космические лучи были впервые зарегистрированы Виктором Хессом [4] в начале прошлого века в ходе подъемов на воздушном шаре с использованием электроскопов (Рис. 1.1). Он обнаружил, что интенсивность ионизирующего излучения, разряжающего электроскопы, растет с высотой, начиная от 1000 м над уровнем моря, и сделал вывод, что это излучение идет из космоса. Позже это предположение было подтверждено В. Кольхёрстером, который, желая опровергнуть теорию Гесса, создал более совершенный прибор и провел серию измерений на высотах до 9300 м; на высоте 9000 м скорость ионизации в 40 раз превышала таковую на уровне моря [5; 6]. Первое указание на наличие в составе космических лучей заряженных частиц было получено Клеем в 1927 [7]. Он обнаружил зависимость интенсивности излучения от геомагнитной широты – так, на геомагнитном экваторе она была на 10-15% меньше, чем на высоких широтах. Правильная интерпретация этого эффекта была дана только в 1929 г Боте и Кольхёрстером в опытах по обнаружению высокопроникающих заряженных частиц с помощью счетчиков Гейгера-Мюллера [8]. Счетчики работали на совпадениях высокопроникающих заряженных частиц. В дальнейшем важную роль в наблюдениях быстрых заряженных частиц и геомагнитного эффекта сыграли опыты Росси, усовершенствовавшего метод совпадений [9]. Он предсказал различие между интенсивностями лучей с востока и с запада, связанное со знаком заряда первичных частиц. Позже было выяснено, что с запада частиц больше, так как большая часть первичных частиц положительна. Как позже выяснилось, первичное космическое излучение не является собственно излучением, но представляет собой в основном заряженные частицы – преимущественно ядра атомов, с массами от протона до железа, однако по устоявшейся терминологии их до сих пор называют космическими лучами (КЛ). В дальнейшем на долгое время КЛ стали основным поставщиком новых для физики элементарных частиц. Так, в 1932 Андерсеном были открыты позитроны [10]; им же в 1936 - мюоны [11]; в 1937 Пауэллом в ходе поиска мюонов обнаружены ранее предсказанные Юкавой пионы [12; 13]; после этого были открыты К-мезоны и другие элементарные частицы. В 1938 Оже, Мазе и Гривет-Майером был обнаружен эффект одновременного срабатывания детекторов, расположенных на расстоянии друг от друга. Наблюдения проводились с помощью



Рисунок 1.1 — Так выглядел первый мировой эксперимент по изучению космических лучей. Группа В. Хесса перед вылетом. 1912 год.

камер Вильсона на высотах 3500 и 2000 метров над уровнем моря. Максимальное расстояние между одновременно сработавшими детекторами составило 300 метров [14]. Это наблюдение стало шагом к пониманию того, что регистрируемые на поверхности Земли частицы являются вторичными продуктами каскадных процессов, широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных КЛ.

С 1950-х гг. основной интерес в исследованиях ШАЛ начинает представлять задача изучения источников высокоэнергетичных первичных частиц КЛ. В то время единственным изначально доступным инструментом для регистрации ШАЛ были детекторы заряженных частиц. В дальнейшем начали развиваться другие методы исследования ШАЛ и восстановления параметров первичных КЛ, в которых атмосфера играет роль калориметра. При этом усредняются флуктуации и появляется возможность повысить точность измерений. Примерами таких методов являются регистрация черенковского излучения частиц ШАЛ и флуоресценции атмосферы после прохождения ШАЛ, а также регистрация радиоизлучения ШАЛ. В 1966 появляются первые работы по теоретическому расчету радиоиз-

лучения ШАЛ [15], и почти сразу же начинаются экспериментальные исследования на установках МГУ [16] и Haverah Park [17], в ходе которых было накоплено значительное количество экспериментальных данных. Однако, несовершенство экспериментальной техники и недостаток вычислительных мощностей на то время не позволяли эффективно обрабатывать эти данные, и интерес к радиометоду как инструменту изучения ШАЛ на некоторое время угас.

С 1990-х годов началось возрождение радиометода, связанное с двумя основными причинами. С одной стороны, для регистрации КЛ наиболее высоких энергий (выше  $10^{18}$  эВ) необходимо развертывание установок значительных площадей, требующего больших затрат материальных и человеческих ресурсов. В сравнении с установками других типов, массив радиодетекторов позволяет решить эту задачу эффективнее в силу более простого устройства и обслуживания детекторов. С другой стороны, развитие вычислительной техники начало позволять использовать радиометод для решения реальных задач регистрации и восстановления параметров ШАЛ. С возрождением радиометода связано строительство радиоустановок нового поколения, представляющих собой цифровые интерферометры, среди которых можно упомянуть LOPES [18] и его дальнейшее развитие LOFAR [19], а также CODALEMA [20]. Эти установки показали применимость радиометода для исследования ШАЛ и восстановления параметров КЛ. Подробный обзор этих и других установок приведен ниже.

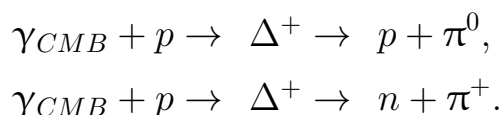
В настоящей работе мы будем фокусироваться на использовании радиометода для изучения каскадов от КЛ высоких энергий (от единиц ПэВ до сотен ЭэВ), традиционно связываемых с галактическими и внегалактическими источниками.

## 1.1 Природа космических лучей

Космическими лучами называются ускоренные заряженные частицы с энергиями от МэВ до, как минимум, сотен ЭэВ, движущиеся в космосе. Основную часть потока космических лучей составляют ядра атомов. Также в потоке присутствует небольшая доля электронов и позитронов, характеризующихся меньшими энергиями в сравнении с ядрами атомов. Вблизи Земли значительную часть КЛ составляют солнечные КЛ с энергиями, как правило, ниже десятков МэВ. В целом поток КЛ убывает по степенному закону, за исключением ряда

особенностей, например, в районе “колена” (около  $10^{15}$  эВ) и “лодыжки” (около  $10^{19}$  эВ) и др. Состав и поток КЛ с энергиями ниже  $10^{14}$  эВ достаточно хорошо измерен в баллонных и спутниковых экспериментах [21—23]. Для более высоких энергий малый поток не дает возможности набрать достаточную статистику для получения достоверных результатов с использованием данных прямых наблюдений. В то же время, исследование КЛ высоких энергий возможно путем наблюдения различных компонент ШАЛ. На настоящий момент не существует общей подтвержденной теории, описывающей источники КЛ высоких энергий и взаимодействий КЛ с межзвездным веществом. Задача поиска источников и механизмов ускорения КЛ до релятивистских скоростей - одна из нерешенных проблем, над которой работают современные астрофизики.

После начального ускорения частица какое-то время движется в космическом пространстве. В процессе движения она меняет направление движения вследствие взаимодействия с межгалактическими магнитными полями, магнитными полями галактик и других крупномасштабных объектов (также она может дополнительно ускоряться). Кроме того, согласно расчетам Грейзена, Зацепина и Кузьмина [24; 25], высокоэнергетичные протоны ( $> 50$  ЭэВ, предел ГЗК), при движении постепенно тормозятся вследствие взаимодействия с фотонами реликтового излучения и рождения пионов через дельта-резонанс:



На современных экспериментах наблюдается резкое падение потока КЛ при энергиях порядка  $3 \cdot 10^{20}$  эВ, однако, на текущий момент нет единого мнения, является ли это следствием обрезания ГЗК или же характеристик источников КЛ. Таким образом, имеющиеся наблюдения охватывают энергетический диапазон КЛ до энергий порядка  $10^{20}$  эВ.

Наблюдения КЛ с энергиями до 100 ТэВ могут проводиться путем прямой регистрации потока с помощью орбитальных детекторов [26—28]. На больших энергиях единственным доступным методом наблюдения КЛ становится регистрация продуктов взаимодействия КЛ с земной атмосферой.

При входе в атмосферу КЛ начинает взаимодействие с атмосферными частицами. Этот процес сопровождается разрушением ядер, образованием вторичных частиц и широкополосным электромагнитным излучением, обусловленным различными механизмами. Вторичные частицы, в свою очередь, взаимодейству-

ют с новыми частицами в атмосфере и, таким образом, запускают каскад, называемый широким атмосферным ливнем (ШАЛ). Если энергия первичной частицы велика, то ШАЛ проникает достаточно глубоко в атмосферу и становится доступен для регистрации с поверхности Земли. Энергетический порог зависит от метода регистрации, условий местности и специфики конкретного детектора. Подробное описание ШАЛ и их регистрации приведено в следующих разделах.

Первичные КЛ обладают высокой степенью изотропии вследствие взаимодействия с магнитными полями, в результате которых они теряют первоначальное направление на источник, и происходит усреднение по направлениям. Анизотропия на высоких энергиях была обнаружена на экспериментах AGASA [29] и на обсерватории им. Пьера Оже [30; 31] (см. Рис. 1.2).

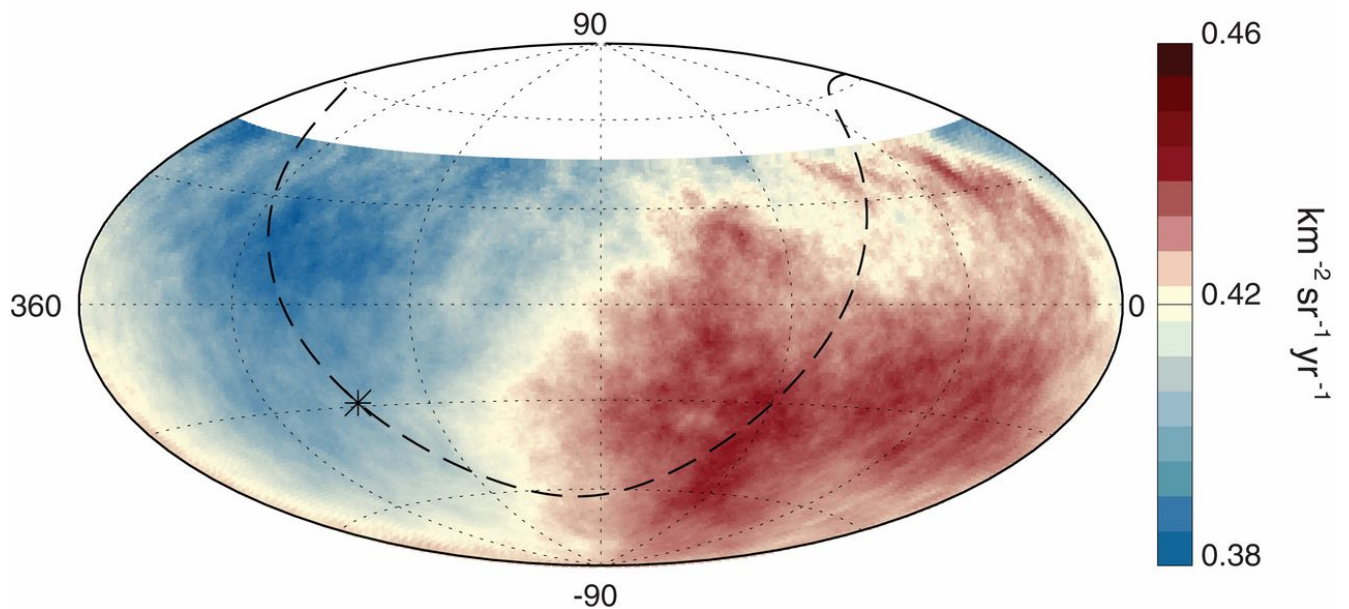


Рисунок 1.2 — Анизотропия высокоэнергетических КЛ. Карта неба в экваториальных координатах (проекция Хаммера), поток КЛ с энергиями выше 8 ЭэВ по данным обсерватории им. Пьера Оже [30]. Галактический диск отмечен пунктирной линией, центр галактики отмечен крестом.

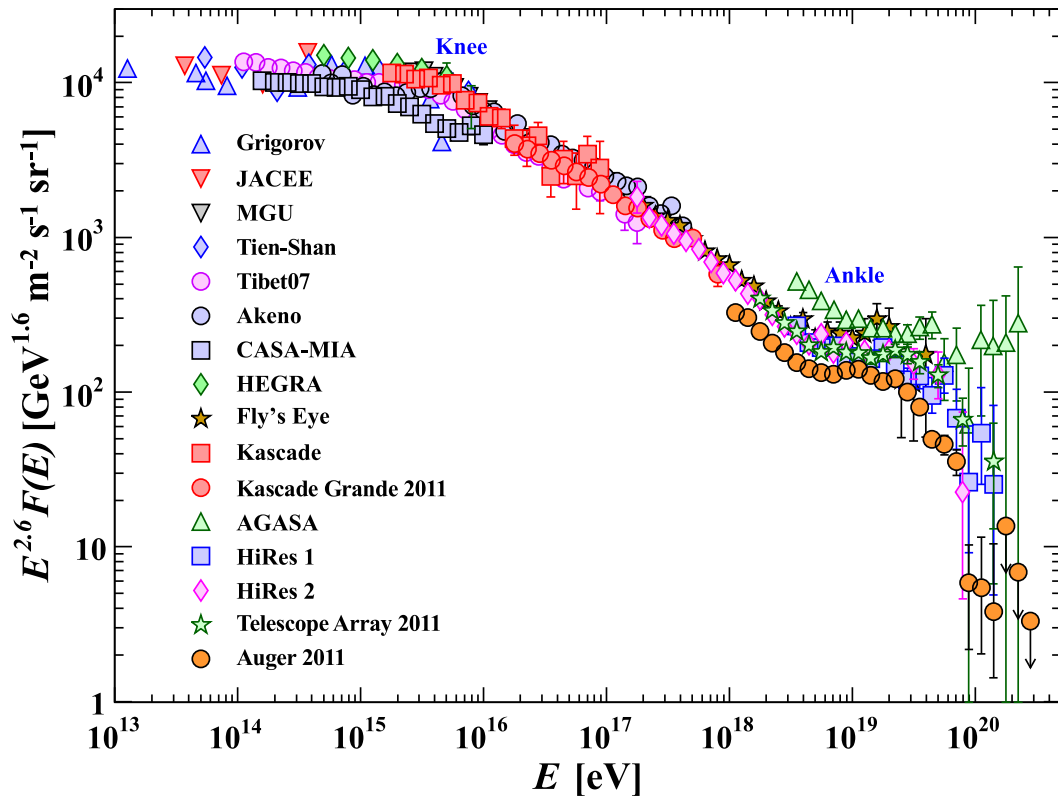


Рисунок 1.3 — Энергетический спектр космических лучей по данным различных экспериментов.

### 1.1.1 Энергетический спектр

Наблюдаемый энергетический спектр космических лучей охватывает диапазон от  $10^6$  до  $10^{20}$  эВ (Рис. 1.3). Поток КЛ значительно падает с ростом энергии: так, для энергий  $E < 10^{14}$  эВ он достаточен для проведения прямых наблюдений (спутниковые и баллонные эксперименты), однако уже при энергии  $10^{15}$  падает до 1 частицы на  $m^2$  в год. В большей части высокоэнергетического диапазона энергетический спектр КЛ может быть описан степенным законом с переменным показателем степени:

$$J(E) = \frac{d^4 N}{dE dA d\Omega dt} \propto E^{-\gamma}, \quad (1.1)$$

где  $J(E)$  - поток КЛ,  $N$  - число первичных частиц,  $E$  - энергия,  $A$  - площадь детектора,  $\Omega$  - телесный угол наблюдений,  $\gamma$  - показатель степени.

В зависимости от энергии  $\gamma$  меняется следующим образом:

– До  $E < 3 \cdot 10^{15}$ : соответствует  $\gamma \approx 2.7$ .

- От  $E \approx 3 \cdot 10^{15}$  до  $E \approx 6 \cdot 10^{17}$ :  $\gamma \approx 3.1$ . На этом диапазоне наблюдается излом спектра (классическое колено), открытое на установке МГУ [16]. Есть различные теории объяснения этого изменения, чаще все оно связывается с пределом максимального ускорения частиц в остатках сверхновых[32—34]. На энергии  $3 \cdot 10^{17}$  наклон спектра увеличивается (второе колено). Кроме того, наблюдается ряд других особенностей спектра.
- От  $E \approx 6 \cdot 10^{17}$  до  $E \approx 3 \cdot 10^{18}$ :  $\gamma \approx 3.3$ , слабо выраженное изменение, наблюдаемое на экспериментах Akeno[35], Fly’s Eye[36], Haverah Park[37] и HiRes[38]. Чаще всего связывается с изменением массового состава лучей с преимущественно легкого к преимущественно тяжелому.
- От  $E \approx 3 \cdot 10^{18}$  до  $E \approx 3 \cdot 10^{19.7}$ :  $\gamma \approx 2.8$ . Этот диапазон энергий связывается с переходом от галактических КЛ к внегалактическим.
- От  $E \approx 3 \cdot 10^{19.7}$ :  $\gamma \approx 5$ . Резкое падение потока, возможно связанное с пределом ГЗК или с характеристиками источников и механизмов ускорения КЛ. Ясность в вопрос о природе особенностей спектра на этом диапазоне может внести точное определение массового состава КЛ.

### 1.1.2 Массовый состав

Массовый состав КЛ сильно зависит от природы источников и обладает существенными различиями на разных энергетических диапазонах. Так, для низкоэнергетичных КЛ солнечного происхождения характерно наличие большого числа электронов и легких элементов (водород и гелий). На высоких энергиях электронов практически не наблюдается. Также с ростом энергии падает доля легких элементов, что может быть объяснено высокой энергией ионизации этих элементов, подавляющей начальное ускорение.

Массовый состав КЛ низких энергий (порядка  $< \text{ГэВ}$ ) приблизительно соответствует химическому составу элементов в Солнечной системе, за исключением преобладания легких (Li, Be, B) и тяжелых (вблизи железа) ядер. На высоких энергиях массовый состав по большей части остается неизвестным. Определение массы первичной частицы на этих энергиях основано на восстановлении и интерпретации данных о максимуме ШАЛ (области каскада, в которой наблюда-

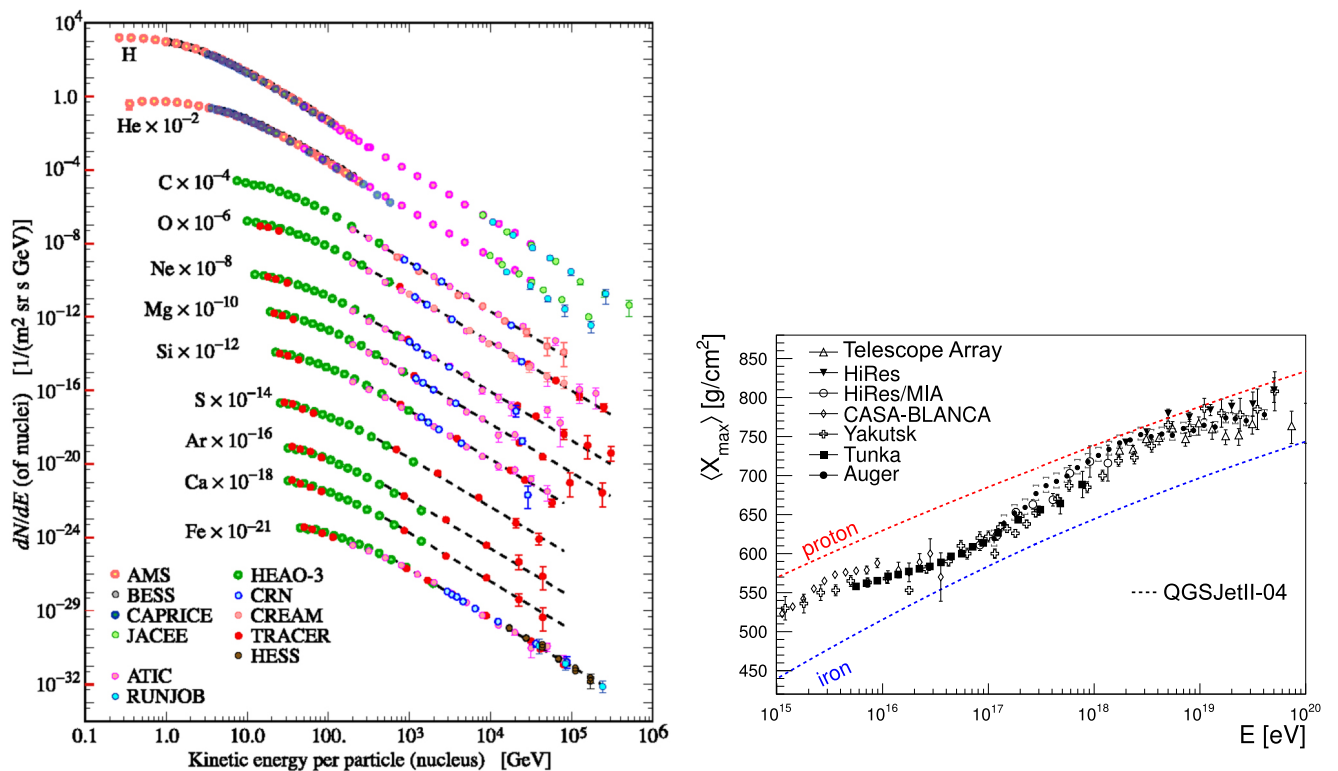


Рисунок 1.4 — Слева: Массовый состав космических лучей по данным различных экспериментов [39]. Справа: Средняя глубина максимума ШАЛ (как показатель, прямо связанный с массой первичной частицы) в зависимости от энергии по данным различных экспериментов. Пунктирной линией показаны предельные значения глубины максимума для протона и ядра железа по данным модели QGSJetII-04.

ется максимальное число частиц), отношении числа электронов к числу мюонов ШАЛ и черенковском излучении первичной частицы (для тяжелых ядер).

## 1.2 Широкие атмосферные ливни

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) – продукты взаимодействия КЛ с земной атмосферой, представляющий собой каскадный процесс, сопровождающийся рождением, превращением и распадом различных частиц и широкополосным электромагнитным излучением [14]. История исследований ШАЛ насчитывает чуть менее века. Впервые частицы, впоследствии ассоциированные с ШАЛ, были зарегистрированы и описаны Д. В. Скобельцыным в 1929 году [40] с помощью

камеры Вильсона. В 1938 году Пьером Оже проводилось исследование атмосферных ливней с помощью счетчиков, включенных в схему совпадений. Было обнаружено, что при увеличении расстояния между счетчиками число совпадений уменьшается сначала быстро, а затем – значительно медленнее; вплоть до расстояний порядка сотен метров число совпадений оставалось статистически заметным [41]. Оже удалось проследить ливни до расстояний между счетчиками в 300 м. В 1946 году на Памире благодаря новому методу регистрации ливней с помощью счетчиков, предложенному Д. В. Скобельциным, на высоте 3860 м были обнаружены сверхширокие ливни, покрывающие 1 км<sup>2</sup> и более. Впоследствии также проводились исследования высотного распределения ливней, в ходе которых было выяснено, что число ливней, регистрируемое какой-либо системой счетчиков, с увеличением высоты растет вплоть до 8-9 км, после чего начинает снижаться [42]. Как уже было сказано выше, изучение ливней сыграло важную роль в исследованиях элементарных частиц [43; 44]. На текущий момент регистрация ШАЛ является основным способом исследования КЛ и гамма-квантов высоких энергий.

В настоящем разделе дано описание структуры и основных составляющих ШАЛ, их динамика в процессе развития ШАЛ, а также связи параметров ШАЛ и параметров первичной частицы.

### 1.2.1 Способы регистрации

Исторически первым способом регистрации ШАЛ (успешно используемым до сих пор) является прямая регистрация вторичных частиц наземными или подземными детекторами. Также регистрацию ШАЛ возможно проводить путем измерения электромагнитного излучения ШАЛ. Такие измерения проводятся, например, с использованием флуоресцентных телескопов или детекторов черенковского излучения в оптическом и ультрафиолетовом диапазоне, а также с использованием радиодетекторов. Для всех описанных способов доступно восстановление направления прихода первичной частицы по времени регистрации сигнала, а также энергия - путем интегрирования силы измеренного сигнала (количества зарегистрированных частиц или амплитуды излучения для электромагнитных измерений). Чувствительные к массовому составу переменные  $X_{max}$  и от-

ношение числа электронов к числу мюонов более сложны для измерения. Для радиометода они недоступны для прямого измерения, однако могут быть восстановлены по параметрам принятого сигнала.

Проведем обзор инструментов, используемых для наблюдения ШАЛ:

1. **Детекторы частиц** являются первыми инструментами, которые использовались для регистрации ШАЛ. Исторически детекторы создавались на базе счетчиков Гейгера [45], пропорциональных счетчиков [46], фотоэмульсий [13]. Они регистрируют мюоны, электроны и адроны ШАЛ, достигающие поверхности Земли. Частицы могут быть зарегистрированы с помощью баков с водой, снабженных фотоумножителями и регистрирующих черенковское излучение, возникающее при прохождении частиц сквозь воду, либо с помощью сцинтилляционных детекторов. Основным преимуществом этих инструментов является слабая зависимость от внешних условий и возможность организации круглосуточных измерений. Однако, метод восстановления параметров ШАЛ с помощью детекторов частиц не позволяет получить полную информацию о структуре ШАЛ, т.к. установка состоит из отдельных детекторов, разнесенных на большие расстояния, и количество регистрируемых частиц подвержено большим флуктуациям. Кроме того, регистрируются только частицы на уровне детектора (т.н. отпечаток ШАЛ), и прямая информация о предыдущих этапах развития ШАЛ остается недоступной. В силу этого детекторы частиц обладают ограниченной чувствительностью к определению глубины максимума ливня. Кроме того, интерпретация экспериментальных данных сильно зависит от моделей адронных взаимодействий, используемых при восстановлении параметров ШАЛ, вследствие невозможности прямого наблюдения высокоэнергетичных взаимодействий на ускорительных экспериментах. Чувствительность к определению массы первичной частицы может быть улучшена с помощью разделения электронной и мюонной компоненты. В последние годы детекторы частиц используются не только в задачах исследования КЛ, но также в задачах гамма-астрономии высоких энергий [47—49]. В последние годы точность восстановления параметров ШАЛ, достигаемая с использованием данных детекторов частиц, сопоставима с точностью, достигаемой детекторами, регистрирующими оптическое изображение ливня [50].

2. **Методы с регистрацией оптического изображения (imaging methods)**  
ШАЛ заключаются в наблюдении развития ШАЛ с помощью телескопа с многопиксельной матрицей и анализа полученного изображения, отражающего эволюцию ливня. Для наблюдения такими методами доступны две основных компоненты электромагнитного излучения ШАЛ: флуоресцентная, возникающая при релаксации атмосферных молекул, возбужденных при прохождении ливня через атмосферу [51; 52], и черенковское излучение в видимом диапазоне [53; 54]. Преимущества методов с регистрацией изображения заключаются в прямом наблюдении развития ливня и, соответственно, высокой точности восстановления параметров ШАЛ. При использовании этих методов особое значение приобретает точная калибровка инструмента, а также мониторинг состояния атмосферы во время измерений. Основным недостатком заключается в низкой доли времени, доступного для наблюдений, т.к. измерения возможно проводить только в ясные безлунные ночи.
3. **Методы регистрации пространственно-временных характеристик ШАЛ (non-imaging methods)** представляют собой наблюдение электромагнитной компоненты ШАЛ с помощью массивов широкоугольных детекторов. Основное отличие от изображающих методов заключается в том, что наблюдения проводятся одновременно по всему небу, однако для анализа доступен только след ливня (пространственно-временные характеристики излучения на уровне детектора), поэтому прямое наблюдение развития ШАЛ невозможно. Тем не менее, с использованием неизображающих методов можно добиться точности, сравнимой с изображающими. Современные эксперименты, использующие неизображающие методы регистрации черенковского света ШАЛ, описаны в [55—58].
4. **Спутниковые и баллонные наблюдения** развития ливня сверху являются альтернативой для наземных наблюдений. В ходе таких наблюдений детектор регистрирует флуоресцентный свет или отраженное от поверхности (как правило, льда) черенковское излучение от ШАЛ с энергиями выше  $10^{19}$ . Планировавшиеся к запуску и уже проведенные эксперименты: TUS [59], KLYPVE [60], EUSO-Balloon [61], EUSO-SPB [62], JEM-EUSO [63], ANITA [64].

5. **Регистрация радиоизлучения** является методом, который был предложен и протестирован более 50 лет назад [65], но длительное время не использовался на практике. Возрождение метода происходит в последние 10-15 лет. Метод представляет собой неизображающую технику регистрации радиоимпульсов ШАЛ. Основные преимущества метода заключаются в хорошей чувствительности к энергии и глубине максимума ШАЛ и высокой доле времени, доступного для наблюдений. Более детальное описание метода приведено в следующей главе.

### 1.2.2 Эволюция и морфология ШАЛ

Каскады вторичных частиц, генерируемые космическими лучами в земной атмосфере, принципиально похожи на каскады, генерируемые в плотных средах (таких, как лед или вода) или в калориметрах, используемых в исследованиях физики высоких энергий.

Схематически развитие ШАЛ показано на Рис. 1.5. Поэтапно его можно представить следующим образом:

1. Первое взаимодействие и запуск каскада. КЛ высокой энергии входит в атмосферу и претерпевает столкновение с частицей атмосферы, в результате чего частица разрушается, и продукты взаимодействия, получившие высокую энергию от первичной частицы, начинают развивать каскадный процесс. Первое взаимодействие происходит на высоте порядка десятков км (в зависимости от типа частицы и угла прихода, для тяжелых частиц и/или больших углов прихода высота соответственно увеличивается).
2. Развитие каскада. Вторичные частицы, в свою очередь, взаимодействуют с атмосферными частицами. Число частиц в ливне начинает увеличиваться, а энергия каждой отдельной частицы - уменьшаться. Основная часть образующихся частиц - пионы. Пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы или распадаться, образуя мюонную и электронно-фотонную компоненты. Адронная компонента впоследствии превраща-

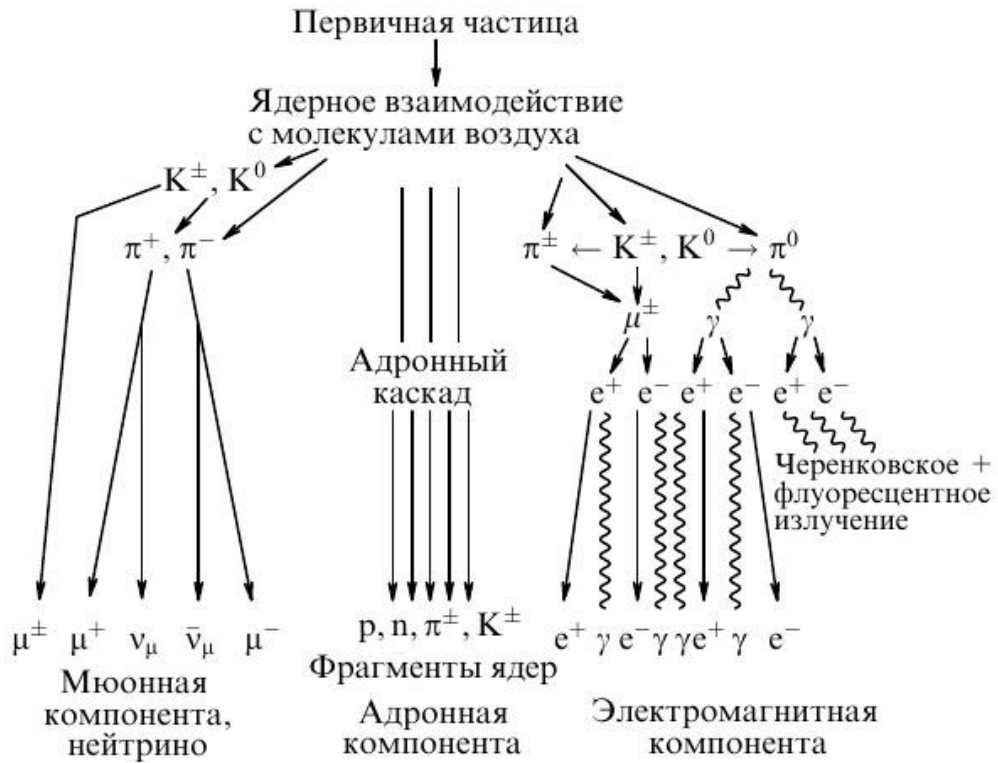


Рисунок 1.5 — Схематическое изображение эволюции ливня.

ется в мюоны, гамма-кванты, нейтрино и электроны:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma,$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Также в составе ШАЛ участвуют большое число других типов элементарных частиц. Адронное ядро ливня расположено преимущественно вдоль оси в компактной области диаметром порядка единиц метров.

3. Максимум ливня ( $X_{max}$ ). На определенном этапе развития ливня, зависящем от параметров первичной частицы, энергия вторичных частиц на фронте ливня становится недостаточной для продолжения развития каскада и каскад начинает затухать. Этот этап называется максимумом ливня и характеризуется максимальным числом частиц и максимальной интенсивностью электромагнитного излучения. Его положение является хорошим индикатором массы первичной частицы - чем глубже макси-

мум ливня расположен в атмосфере, тем меньше ее масса (атомный номер).

4. Затухание ливня. После прохода максимума количество частиц в ливне начинает снижаться вплоть до полного затухания адронной компоненты. Поверхности земли достигают в основном мюоны и электроны, а также электромагнитное излучение.

Морфология ШАЛ варьируется в зависимости от энергии и типа первичной частицы, а также от ее зенитного угла прихода. Из составляющих каскада выделяются адронная компонента, электромагнитная компонента, мюоны, нейтрино, а также излучение Вавилова-Черенкова и широкополосное радиоизлучение. Также каскад порождает флуоресцентное свечение атмосферы.

Рассмотрим основные составляющие каскада подробнее.

- **Адронная компонента.** Так как каждый ливень начинается с взаимодействия первичной частицы с атмосферной молекулой (точнее, с одним из ядер, входящих в ее состав), первой компонентой, образующейся в ливне, является адронная. Она состоит из тяжелых частиц с большим сечением взаимодействия - таких, как фрагменты ядер, отдельные нуклоны, мезоны. Поперечный импульс адронной компоненты сравнительно мал в сравнении с общим импульсом, что приводит к ее концентрации в области сечением порядка единиц-десятков метров вдоль оси ливня, называемой адронным ядром ШАЛ.
- **Электромагнитная компонента** состоит из электронов, позитронов и фотонов, первоначально возникающих преимущественно при распаде нейтральных пионов. В электромагнитной компоненте каскада высокоэнергетичные заряженные частицы превращаются друг в друга посредством рождения пар и тормозного излучения. В начале развития ливня каскад имеет в целом нейтральный заряд (если не брать во внимание заряд первичной частицы), однако, в процессе развития ШАЛ на его фронте происходит накопление отрицательного заряда, обусловленное аннигиляцией позитронов, рожденных в ливне, с электронами атмосферы. Электромагнитная компонента ШАЛ, запущенного гамма-квантом, как правило, состоит из одного электромагнитного каскада, в то время как для ШАЛ, запущенного адроном или ядром атома, она является суперпозицией множества электромагнитных каскадов.

- **Мюонная компонента.** Мюоны в ливне создаются при распаде заряженных пионов, каонов и других частиц. Сами мюоны распадаются на электроны/позитроны и нейтрино. Мюоны обладают относительно большим временем жизни в сравнении с пионами. Мюоны меньше теряют энергию при рассеянии и на тормозное излучение в сравнении с электронами. В силу релятивистского замедления времени для высокоэнергетического мюона его время жизни в системе отсчета Земли увеличивается. Таким образом, большинство мюонов, в отличие от электронов, достигают поверхности Земли.
- **Черенковское излучение** производится средой при движении в ней частицы со скоростью, превышающей скорость света в среде. Т.к. энергия первичных КЛ достаточно высока, скорость вторичных частиц может превышать этот порог, что приводит к генерации излучения.
- **Флуоресцентное излучение.** При прохождении через атмосферу частицы ШАЛ ионизируют атмосферные молекулы. Впоследствии молекулы релаксируют, что приводит к возникновению флуоресцентного излучения, которое можно зарегистрировать после прохождения ливня.
- **Радиоизлучение.** Т.к. значительная часть частиц в ливне заряжена, их движение в геомагнитном поле порождает линейно поляризованное излучение [66]. Кроме этого механизма генерации радиоизлучения, существует дополнительный механизм [3], обусловленный неравномерностью распределения заряда на фронте ШАЛ: электроны и позитроны в ходе развития ШАЛ образуются с равной вероятностью, но позитроны аннигилируют с электронами атмосферы, из-за чего на фронте ШАЛ возникает избыток отрицательного заряда. Этот эффект сопровождается радиоизлучением с радиальной поляризацией.

### 1.3 Радиоизлучение ШАЛ

В настоящем разделе дан обзор механизмов радиоизлучения ШАЛ, рассмотрены основные методики, используемые в радиометодике регистрации ШАЛ и восстановления его параметров, а также дан обзор современных радиодетекторов.

Радиоизлучение ШАЛ было теоретически предсказано [3; 66—68] и экспериментально зарегистрировано [65; 69; 70] в 1960–1970-х годах. Однако, несмотря на давние разработки в данной области, практическое использование радиометода для регистрации КЛ сопряжено с определенными сложностями. В первую очередь, радионаблюдения осложняются высоким уровнем помех антропогенно-техногенного происхождения. Кроме того, свое влияние вносит атмосферный и космический шум, в том числе галактического происхождения. В последние годы развитие методов цифровой обработки сигналов и аппаратной составляющей позволяет решать эти проблемы и проводить эффективные измерения.

### 1.3.1 Механизмы радиоизлучения

Радиоизлучение ШАЛ представляет собой излучение, генерируемое, в первую очередь, релятивистскими электронами и позитронами (с незначительным вкладом других частиц каскада). На мегагерцовых частотах радиоизлучение когерентно в силу ограниченных размеров фронта ШАЛ (порядка единиц метров). Радиоизлучение создается двумя основными механизмами: взаимодействием заряженных частиц с геомагнитным полем [66], и эффектом Аскарьяна [3], обусловленным вариациями заряда фронта ШАЛ вследствие аннигиляции позитронов.

Наибольший вклад вносится геомагнитным эффектом (порядка 90%). Геомагнитный эффект работает следующим образом: сила Лоренца, вызванная взаимодействием заряженной компоненты ШАЛ с геомагнитным полем, отклоняет электроны и позитроны в противоположных направлениях. Ток, возникающий таким образом, меняется во времени, т.к. в процессе эволюции каскада количество заряженных частиц на фронте ШАЛ меняется. Таким образом, геомагнитный эффект сопровождается линейно поляризованным излучением. Амплитуда радиоизлучения прямо пропорциональна силе Лоренца, соответственно, локальной напряженности геомагнитного поля, а также пропорциональна  $\sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между вектором геомагнитного поля и осью ливня. Общая энергия радиоизлучения увеличивается с увеличением длительности процесса излучения и для наклонных ливней немного увеличивается в сравнении с вертикальными (приходящими с малыми зенитными углами), т.к. первое взаимодействие и начало раз-

вития наклонного ливня начинается выше, в условиях более разреженной атмосферы. Так как амплитуда излучения, генерируемого благодаря этому эффекту, зависит от направления прихода, возникает соответствующая зависимость эффективности регистрации от направления прихода. Для направлений, близких к оси геомагнитного поля, эффективность регистрации ШАЛ падает.

В отличие от геомагнитного эффекта, эффект Аскарьяна слабо зависит от направления прихода, что позволяет на достаточно высоких энергиях проводить эффективную регистрацию ШАЛ с любых направлений. В условиях Tunka-Rex вклад эффекта Аскарьяна становится достаточным для регистрации ШАЛ, приходящих под малыми углами к вектору геомагнитного поля, начиная с энергий примерно  $10^{17.8}$  эВ и выше (по измерениям Tunka-Rex).

Схематически вышеупомянутые механизмы изображены на Рис. 1.6

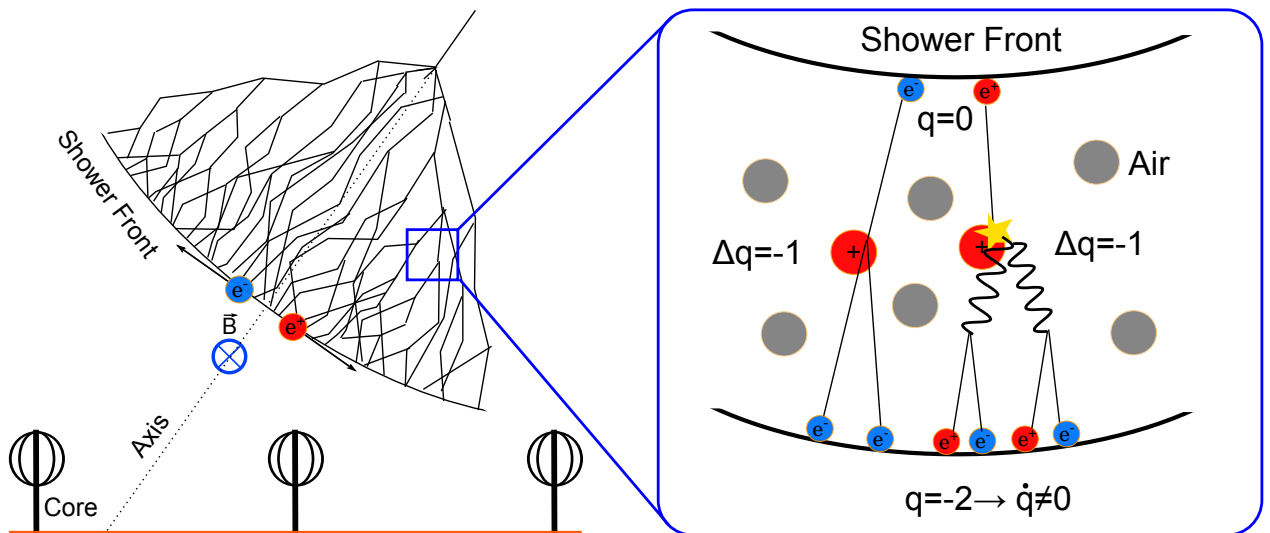


Рисунок 1.6 — Механизмы радиоизлучения ШАЛ. Слева: искривление заряженных частиц под действием геомагнитного поля. Справа: схематическое изображение эффекта Аскарьяна.

Эффект Аскарьяна связан с аннигиляцией образующихся в каскаде позитронов, что приводит к избытку электронов в плоскости фронта ливня и возникновению радиально поляризованного черенковского излучения в радиодиапазоне [3]. Исторически это был первый предсказанный эффект радиоизлучения ШАЛ. Излучение электронейтрального ливня, состоящий из равного количества позитронов и электронов, будет нейтрализовать само себя. Однако, в силу того, что в атмосфере содержится значительное количество свободных электронов и практически не содержится позитронов, позитроны ливня на его фронте аннигилируют с электронами атмосферы, что обуславливает избыток электронов на

фронте ливня. Движение электронов сопровождается когерентным черенковским излучением.

Этот эффект в среднем вносит меньший вклад (около 10%) в общее излучение, но практически не зависит от угла прихода частицы. Первая экспериментальная регистрация эффекта Аскарьяна была проведена в 2001 году [71]. При малых геомагнитных углах геомагнитный эффект становится ничтожным и учет эффекта Аскарьяна позволяет проводить восстановление параметров ШАЛ для таких событий.

Наиболее информативные параметры ШАЛ, позволяющие восстановить статистические параметры КЛ - энергия и глубина максимума. Как показано в [72—74], напряженность электромагнитного поля растет почти линейно с ростом энергии первичной частицы. Соответственно, выделяемая ливнем мощность растет квадратично. Таким образом, восстановление полной энергии ливня позволяет восстановить энергию первичной частицы.

Для восстановления этих параметров осуществляется подгонка пространственного распределения амплитуды радиоизлучения от расстояния до оси ливня (в плоскости фронта ШАЛ). Например, в эксперименте Tunka-Rex используется следующая параметризация функции пространственного распределения [75]:

$$\mathcal{E}(r) = \mathcal{E}_{r_0} \sin \alpha_g \exp[f_\eta(r - r_0)], \quad f_\eta(x) = \sum_{k=1}^N a_k x^k \quad (1.2)$$

где  $\mathcal{E}_{r_0}$  - амплитуда на детекторе на расстоянии  $r_0$  от оси ливня,  $\alpha_g$  - геомагнитный угол, то есть угол между направлением магнитного поля и осью ливня,  $r$  - расстояние до оси ливня,  $r_0$  - свободный параметр.

Масса первичной частицы связана с глубиной максимума ШАЛ, которую можно восстановить путем анализа наклона ФПР либо путем анализа формы импульса ШАЛ (см. главы 2 и 5).

### 1.3.2 Обзор радиодетекторов

В настоящее время в мире существует значительно количество радиодетекторов, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ в различных энергетических диапазонах, начиная от  $10^{16}$  эВ и вплоть до предельных ГЗК энергий в  $10^{20}$  эВ. В

общем случае радиодетектор представляет собой антенную решетку с синхронизацией по времени, внешним триггером (как правило, от расположенного в том же месте детектора частиц, либо оптического детектора) и совместной цифровой системой сбора данных. Рабочая полоса большинства радиодетекторов - 30-80 МГц. Это не лучшая полоса с точки зрения амплитуды радиоимпульса ШАЛ, но она характеризуется наименьшим числом внешних помех. В радио-тихих регионах, таких, как Антарктида, возможно использование более высоких частот. В настоящем разделе представлен обзор радиодетекторов первого и второго поколений, их особенностей и основных полученных на них результатов.

- **LOPES - LOFAR Prototype Station**, цифровой интерферометр [18], разработанный в Институте Технологий Карлсруэ и расположенный в северном кампусе института (Карлсруэ, Германия) совместно со сцинтилляторным детектором KASCADE-Grande[76]. Это был пилотный эксперимент, призванный проверить возможность восстановления параметров ШАЛ методами цифровой интерферометрии и отработать технику восстановления для будущего эксперимента LOFAR. В рамках работы над этим экспериментом было разработано программное обеспечение для Монте-Карло моделирования радиоизлучения ШАЛ - REAS [77], широко используемое во многих других экспериментах. На Рис. 1.7 изображена антенная станция LOPES.
- **LOFAR - Low Frequency Array** - радиотелескоп нового поколения, состоящий из сети отдельных станций (см. Рис. 1.8), включающей основное ядро, расположенное на севере Нидерландов, и дополнительные станции, распределенные по Европе [19]. Основной задачей LOFAR являются радиоастрономические наблюдения путем синтезирования апертуры, однако ШАЛ также могут регистрироваться на этом детекторе. Регистрация радиоизлучения осуществляется с помощью дипольных антенн, чувствительных в диапазоне 10 – 240 МГц. Отдельная станция включает в себя 96 низкочастотных антенн LBA (10-90 МГц) и 48 высокочастотных антенн HBA (110-240 МГц). Ядро LOFAR состоит из 24 станций, 6 из которых компактно собрано в центре и 18 разнесено вокруг; таким образом, радиус ядра достигает 2 км. Исследования радиоизлучения КЛ преимущественно проводятся по данным детекторов ядра, т.к. плотное расположение детекторов позволяет восстанавливать параметры КЛ с высокой точностью. Триггер на запись данных выдается по данным сцинтилляцион-



Рисунок 1.7 — Антенная станция LOPES

ных детекторов LORA [78], расположенных в центре станции. Регистрируемая энергия КЛ – от  $10^{16}$  эВ и выше. Длина записываемой дорожки данных – 2 мс.

- **CODALEMA** - эксперимент, расположенный в Nançay Radio Observatory и, наряду с LOPES, являющийся одним из путеводных экспериментов для радиометода регистрации ШАЛ [20]. В сравнении с LOPES, CODALEMA характеризуется более низким уровнем фонового шума. CODALEMA работала совместно с небольшим массивом сцинтилляторных счетчиков, используемых для генерации триггера и регистрации заряженной компоненты ШАЛ.

- **AERA** [79] (Расширение обсерватории им. Пьера Оже).

Обсерватория им. Пьера Оже [80] – комплексный детектор КЛ, осуществляющий регистрацию адронной и электромагнитной компоненты ШАЛ, состоящий из:

- 1) Наземных детекторов – 1660 баков с водой, регистрирующих черенковское излучение частиц ШАЛ и распределенных по площади в 3000



Рисунок 1.8 — Ядро LOFAR

км<sup>2</sup>;

2) Флуоресцентных детекторов – сеть из 27 телескопов, сгруппированных в четырех точках вокруг области, покрытой наземными детекторами, и регистрирующих флуоресцентное излучение молекул воздуха, возбужденных проходом ливня;

3) Радиодетекторов – сети из 124 антенных станций, покрывающих площадь в 6 км<sup>2</sup> и регистрирующих радиоизлучение ШАЛ в диапазоне 30-80 МГц. Первоначально использовались логопериодические антенны, однако в ходе модернизации 2019 года также начато использование антенн SALLA - таких же, как в Tunka-Rex (см. Рис. 1.9). Геометрия детектора обеспечивает чувствительность к частицам с энергиями выше  $3 \cdot 10^{18}$

– ANITA [64] - Antarctic Impulsive Transient Antenna – радиодетектор, предназначенный для изучения космических нейтрино сверхвысоких энергий. Исследования проводятся в Антарктиде. Детектор включает



Рисунок 1.9 — Антенная станция AERA. На заднем плане - детектор частиц на базе бака с водой.

массив рупорных антенн, систему сбора данных и сопутствующее оборудование, закрепленные на аэростате. Антенны проводят регистрацию

когерентного черенковского радиоизлучения, порожденного взаимодействием высокоэнергетичных нейтрино с антарктическим льдом в диапазоне 230-1200 МГц. Установка работает по внутреннему триггеру. Ко времени проведения данной работы было осуществлено 4 полета, в ходе которых был зарегистрирован ряд событий с восстановленным направлением прихода, находящимся ниже горизонта, а также получены оценки на пределы регистрируемого потока диффузных гамма-квантов.

- **ЯкуШАЛ** [81] - Якутская комплексная установка широких атмосферных ливней им. Д.Д. Красильникова включает антенную решетку и массив сцинтилляторов. Расположена вблизи г. Якутск. Регистрирует КЛ в энергетическом диапазоне  $10^{15} - 10^{20}$  эВ. По данным комплексной установки восстановлен энергетический спектр КЛ.
- **TREND** [82] - **TIANSHAN Radio Experiment for Neutrino Detection**, антенная решетка, расположенная в радио-тихом регионе в горах Тянь-Шаня (Китай) и осуществляющая независимую регистрацию ШАЛ от нейтрино и КЛ высоких энергий. Массив состоял из 50 дипольных антенн, покрывающих площадь в  $1.5 \text{ км}^2$ . Регистрация проводилась по внутреннему триггеру, настроенному на превышения амплитудного порога. События ШАЛ выделялись из записанных данных на этапе постобработки. Нарботки, полученные в ходе работы над этим экспериментом, позднее будут использованы на детекторе GRAND.
- **GRAND** [83] **GRAND (Giant Radio Array for Neutrino Detection)** - перспективная решетка, нацеленная на регистрацию КЛ, нейтрино и гамма-квантов с энергиями выше  $10^{17}$  эВ, расположенная на границе пустыни Гоби и Тибетского плато. На текущем этапе проводится развертывание прототипа GRANDProto300, состоящего из 300 антенных станций и покрывает площадь в  $200 \text{ км}^2$  (см. Рис. 1.10). В дальнейшем планируется расширение детектора с увеличением площади до  $200\,000 \text{ км}^2$ .
- **Tunka-Rex** [84] - **Tunka Radio Extension** (Тункинское радиорасширение), антенная решетка, развертывание которой было начато в 2012 году на базе Тункинского астрофизического полигона как дополнение к черенковскому детектору Тунка-133. Первоначальной целью развертывания была разработка прецизионных методик восстановления энергии и массового состава КЛ по данным радио и кросс-калибровка с черенковской установкой Тунка-133. По состоянию на 2019 год детектор был расширен в

несколько раз (с 18 антенн в 2012 до 63 антенн в 2019). По данным установки Tunka-Rex были успешно восстановлены энергетический спектр и массовый состав КЛ в энергетическом диапазоне  $10^{17}$  –  $10^{18}$  эВ. Детальное описание детектора приведено в следующем разделе.

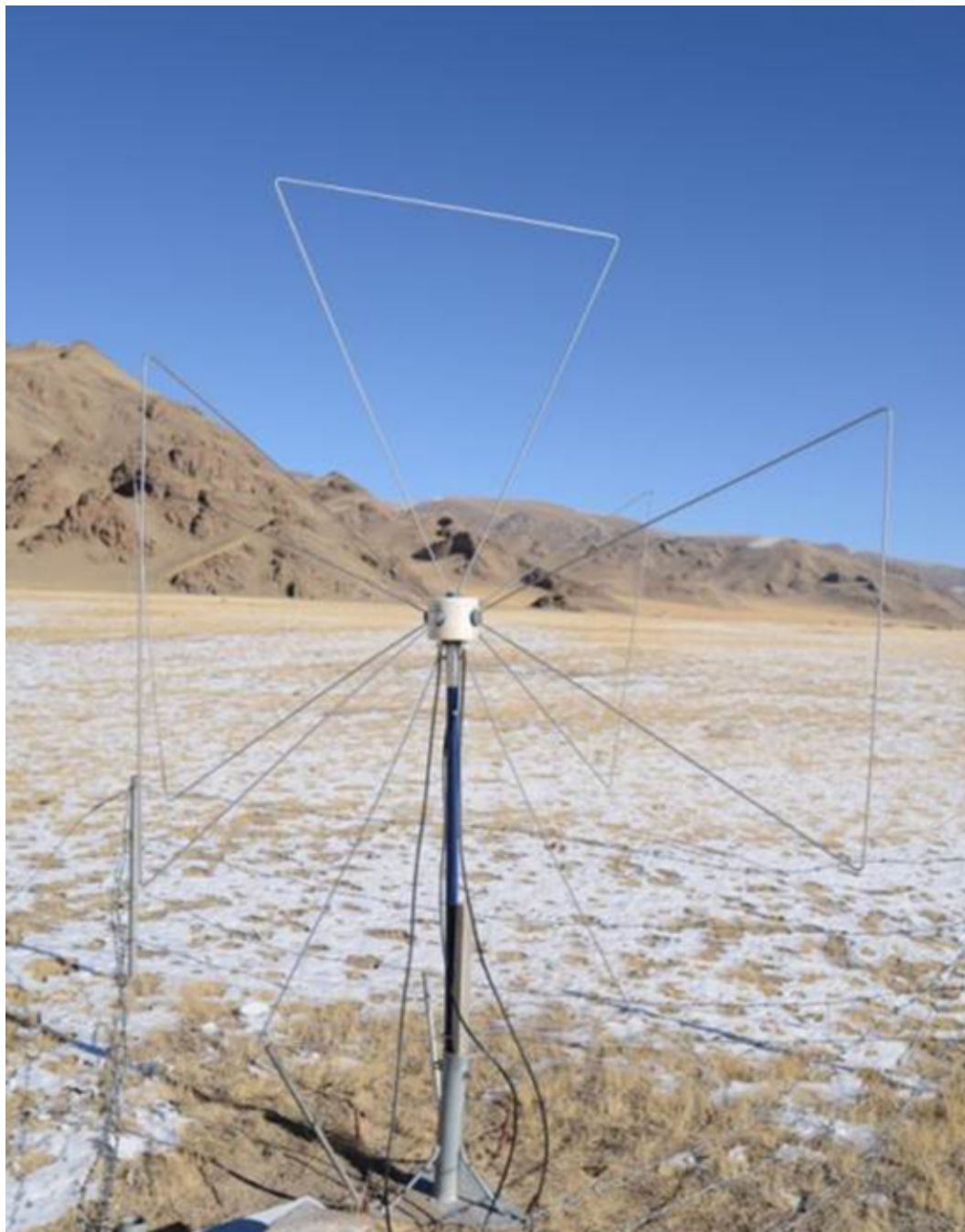


Рисунок 1.10 — Антенная станция установки Grand.

## 1.4 Резюме

Природа высокоэнергетичных КЛ таит в себе множество загадок. Несмотря на более чем столетнюю историю наблюдений, многие вопросы, связанные с их возникновением и ускорением, остаются открытыми. Ответы на эти вопросы необходимы для понимания механизмов звездной эволюции, верификации теоретической базы, объясняющей процессы, происходящие в нашей Вселенной, и построения цельной картины, описывающей динамику высокоэнергетичных процессов, проходящих в космическом пространстве.

Наблюдение ШАЛ является основным методом исследования высокоэнергетичных КЛ в силу того, что их низкий поток делает прямые наблюдения практически невозможными, т.к. поток КЛ снижается с ростом энергии согласно степенному закону, и для максимальных энергий падает до величин меньше 1 частицы на квадратный километр поверхности в год. В то же время, КЛ больших энергий при взаимодействии с атмосферой инициируют многокомпонентные каскадные процессы значительных геометрических размеров. Эти каскадные процессы (ШАЛ) доступны для регистрации с поверхности с помощью детекторов различных типов. Разные детекторы обладают различной чувствительностью к разным компонентам ШАЛ, и поэтому наиболее эффективным подходом к наблюдению ШАЛ является использование комплексных детекторов, регистрирующих сразу несколько компонент. Для набора объема данных, достаточного для получения статистически значимых результатов при высоких энергиях, используются комплексные детекторы большой площади и экспозиции. Разработка методов интерпретации данных, набранных на таких детекторах, является важной задачей, необходимой для понимания природы высокоэнергетичных КЛ. Как правило, для восстановления параметров первичной частицы применяется анализ пространственного распределения регистрируемых компонент ШАЛ. Для оптических и сцинтилляторных установок методы такого анализа разработаны достаточно хорошо для восстановления с высокой точностью. Для радиостановок точность существующих методов ниже. Это связано с основной сложностью в радиометодической регистрации ШАЛ – зависимостью эффективности работы радиодетектора от уровня и характера фонового шума. Таким образом, одной из важных задач в повышении точности восстановления параметров первичной частицы с применением радиометода является разработка методик эффективной фильтрации шумов

и выделения сигнала ШАЛ на их фоне. Кроме того, в силу преимущественного вклада геомагнитного эффекта в общее радиоизлучение ШАЛ, эффективность регистрации также зависит от угла прихода, что требует дополнительного расчета эффективной апертуры радиодетектора в рамках задач восстановления энергетического спектра и массового состава КЛ. Подробный обзор методик, предлагаемых для решения данных задач, приведен в главах 3, 4 и 5.

## Глава 2. Tunka-Rex

В настоящем разделе приведен обзор установки Tunka-Rex, по данным которого выполнена эта работа, и других установок Тункинского полигона. Описана аппаратная часть детектора Tunka-Rex, процедура регистрации сигнала ШАЛ, набор данных и подход к восстановлению параметров первичной частицы.

Tunka-Rex (Tunka Radio Extension) [84] – цифровая антенная решетка, разворачиваемая с 2012 года на Тункинском полигоне. Tunka-Rex регистрирует радиоизлучение ШАЛ от КЛ с энергиями от  $10^{17}$  эВ совместно с детекторами Тунка-133 и Tunka-Grande, от которых получает триггер на запись. При разворачивании Tunka-Rex использован опыт, накопленный при эксплуатации детекторов LOPES и AERA [85].

Каждая антенная станция установки Tunka-Rex состоит из двух перпендикулярно ориентированных магнито-дипольных антенн, позволяющих регистрировать сигнал ШАЛ в двух горизонтальных поляризациях и восстанавливать вектор электромагнитного поля. Также для анализа данных Tunka-Rex используется программный пакет Auger Offline[86], разработанный в обсерватории им. Пьера Оже и использующийся для обработки данных AERA.

Несмотря на использование опыта предыдущих детекторов, конструкцию установки Tunka-Rex отличают несколько уникальных особенностей. Одна из них заключается в том, что Tunka-Rex – первый детектор, в качестве регистрирующего элемента которого используется дешевая в изготовлении и простая в обслуживании антенна SALLA. Опыт использования таких антенн впоследствии был перенят на детекторе AERA. Кроме того, Tunka-Rex - первая антенная решетка, работающая совместно с оптическим детектором черенковского света, что позволяет проводить кросс-калибровку детекторов в целях оптимизации процедур восстановления энергии и глубины максимума ливня.

Первоначальной целью Tunka-Rex являлась верификация применимости радиометода к задачам регистрации ШАЛ от высокоэнергетичных КЛ. Эта цель была достигнута через 3 года после начала работы установки. По данным за первый год была проведена настройка детектора, по следующим двум - полуслепое восстановление совместных с Тункой-133 событий (включена выборка по совпадениям углов прихода, восстановленным по данным Tunka-Rex и Тунки-133; дальнейшее восстановление параметров ШАЛ проводилось независимо), в ходе

которого по данным Tunka-Rex Д. Костюниным, Ф. Шрёдером и Р. Хиллером при участии остальных участников коллаборации были получены предварительные оценки энергетического спектра и массового состава КЛ в энергетическом диапазоне  $10^{17} - 10^{18}$  эВ [87], а также показана возможность прямого сравнения энергетического спектра разных детекторов по их радиорасширениям, откалиброванным по одному источнику (KASCADE и Тунка-133 через LOPES и Tunka-Rex) [88]. После этого была поставлена задача увеличения точности восстановления, для чего процедура обработки данных была существенно переработана. В частности, в процедуру добавлены учет динамики атмосферной рефракции, учет эффективности регистрации ШАЛ в зависимости от угла прихода и геометрии детектора, а также детальное исследование формы импульса ШАЛ. Данные задачи были решены в ходе настоящей работы и подробно описаны в следующей главе.

В этом разделе дан детальный обзор детектора Tunka-Rex. Описаны антенная решетка, сигнальная цепь, система сбора данных, методики обработки данных и стандартный метод восстановления параметров первичной частицы путем анализа ФПР амплитуды зарегистрированного радиоизлучения. Также приведены результаты восстановления энергии и глубины максимума ШАЛ, полученные по данным совместных измерений Tunka-Rex и Тунка-133 с использованием описанного ниже стандартного метода.

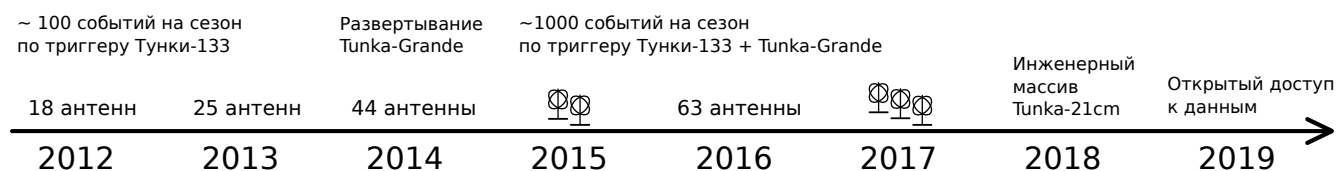


Рисунок 2.1 — Временная шкала расширения и эволюции установки Tunka-Rex с 2012 до 2019 год.

## 2.1 Тункинская астрофизическая обсерватория

Тункинская обсерватория является важнейшей составляющей установки “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ”. На обсерватории проводится изучение ШАЛ, инициированных КЛ (от  $10^{14}$  до  $10^{18}$  эВ) и гамма-квантами (от  $1.5 \cdot 10^{12}$



Рисунок 2.2 — Панорама Тункинской астрофизической обсерватории.

эВ) путем комплексных измерений черенковской, электронно-мюонной и радиокомпонент. Обсерватория расположена в Тункинской долине ( $\varphi=51^{\circ}48'47.5''$   $\lambda=103^{\circ}04'16.3''$ , 675 м над уровнем моря), в 150 км от г. Иркутск и в 50 км от озера Байкал. Место проведения исследований обусловлено, в первую очередь, удаленностью от населенных пунктов и сопутствующих им антропогенных световых и радиопомех, а также большим количеством ясных ночей в году, что повышает эффективное время наблюдений для оптических детекторов. Основная задача обсерватории - поиск источников КЛ сверхвысоких энергий и измерение массового состава и энергетического спектра КЛ в области перехода от галактических к внегалактическим источникам. Также по данным обсерватории проводятся и планируются к проведению такие исследования, как:

- поиск галактических источников гамма-квантов с энергиями выше 20-30 ТэВ;
- исследование потока гамма-излучения от известных источников с энергиями выше 20-30 ТэВ на зарегистрированном уровне чувствительности;
- исследование высокоэнергетичной части спектра гамма-излучения от наиболее ярких источников с целью изучения поглощения гамма-квантов при взаимодействии с межгалактическим фоновым излучением (инфракрасном и микроволновом) и поиск аксионно-фотонных переходов;
- поиск возможных нарушений Лоренц-инвариантности и аксион-фотонных переходов как новый подход к поиску темной материи во Вселенной

### 2.1.1 Историческая справка и общие сведения

Тункинский полигон был создан в 60-х годах прошлого века по инициативе профессора ИГУ В.М. Полякова для проведения широкого круга исследований в области радиофизики. Астрофизический исследования на полигоне начались в 90-х годах с небольшого массива из 4 детекторов черенковского излучения [89; 90] на базе фотоприемников КВАЗАР-370, использовавшихся в Байкальском нейтринном телескопе НТ-200 [91]. Массив постепенно расширялся, в 2000 году он достиг 25 детекторов, а в 2005 было начато масштабное расширение до 133 детекторов, закончившееся к 2009 [92]. Позже, в 2010-2012 были также добавлены 6 внешних кластеров (дополнительные 42 детектора), расширившие общую область наблюдений до 3 км<sup>2</sup>. В 2012 были развернуты первые станции радиодетектора Tunka-Rex (с 18 станций в 2012 до 63 к 2018) и широкоугольного черенковского детектора HiSCORE. В 2014 было начато развертывание массива сцинтилляционных детекторов Tunka-Grande (19 станций). В 2015 набор детекторов был дополнен первым атмосферным черенковским телескопом IACT, регистрирующим черенковское изображение ШАЛ. По состоянию на 2020 год таких телескопов в обсерватории уже 3. Также в 2019 начато развертывание дополнительных станций сцинтилляционных детекторов TAIGA-Muon. Кроме того, в 2019 году на полигоне построен испытательный кластер на базе станций Tunka-Rex и высокопроизводительной системы обработки данных в реальном времени, нацеленный на изучение эволюции ранней Вселенной путем с помощью измерения линии поглощения нейтрального водорода на большом красном смещении, соответствующем времени перехода от Темных веков к Эпохе реионизации [93], а также для разработки независимого триггера для радиодетектора КЛ.

На настоящее время в измерениях задействованы детекторы черенковского света установки Тунка-133, массив радиодетекторов Tunka-Rex, массив сцинтилляционных детекторов Tunka-GRANDE (наземная и подземная части), а также низкопороговая широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE и сеть атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT. На Рис. 2.3 изображен план расположения установок обсерватории. Краткое описание установок приведено ниже.

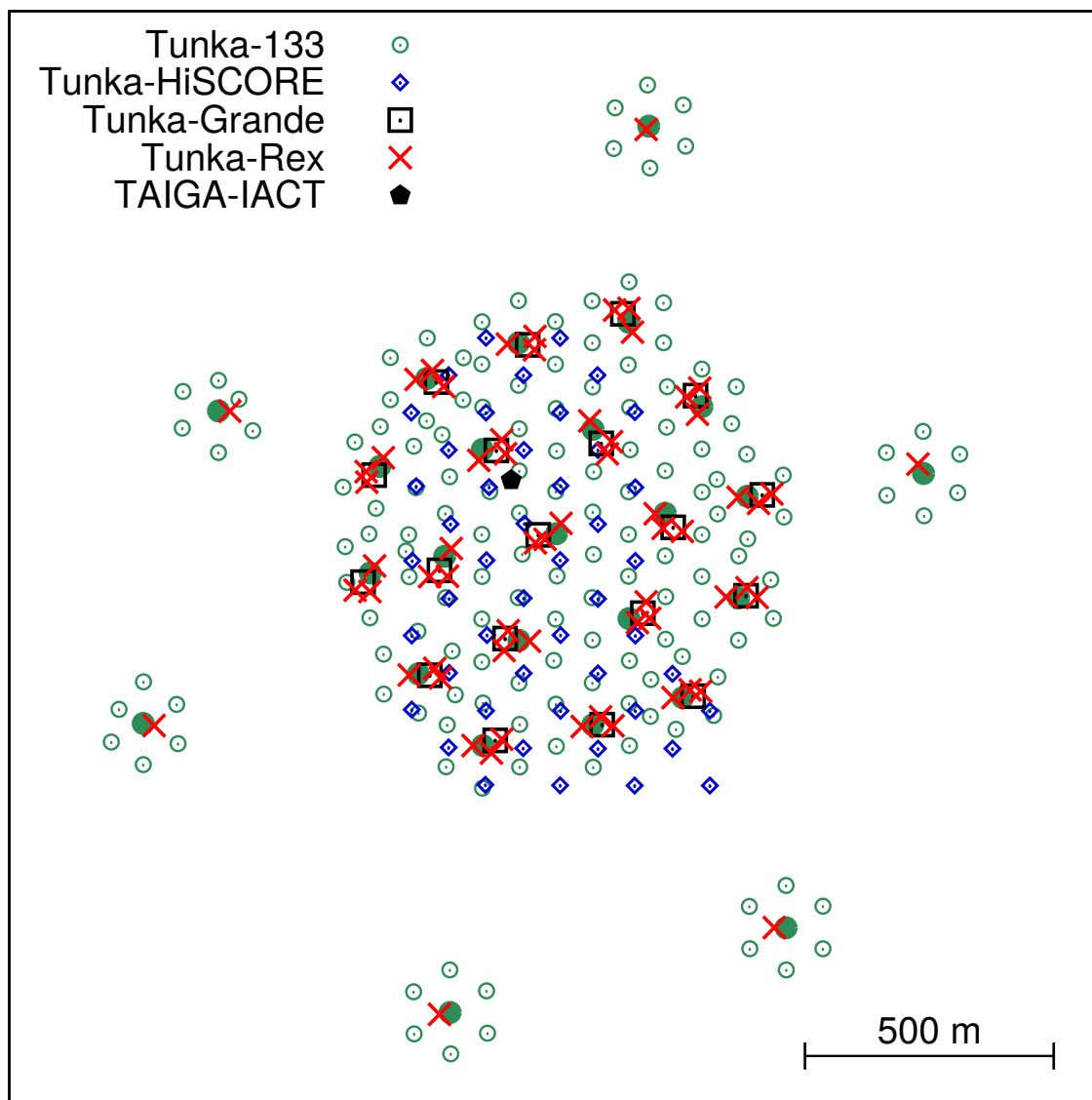


Рисунок 2.3 — План расположения детекторов обсерватории TAIGA в Тункинском Астрофизическом Центре Коллективного Пользования (ТАЦКП).

### 2.1.2 Тунка-133

Тунка-133 [57] – система из 175 оптических детекторов атмосферного черенковского света, расположенных на площади в  $3 \text{ км}^2$ . Первая очередь установки запущена в 2009 г (плотная часть, 19 кластеров, 133 детектора на  $1 \text{ км}^2$ ). В 2010-2021 гг. установка была дополнена 6-ю кластерами по 7 детекторов в каждом, расположенными на расстоянии 1 км от центра, что позволило эффективно детектировать след ливня на площади около  $3 \text{ км}^2$ , расширить диапазон измерений в сторону высоких энергий и увеличить количество статистических данных для меньших энергий. Детекторы сгруппированы в 25 кластеров по 7 штук (один де-

тектор в центре, еще шесть распределены по окружности с радиусом 85 метров). 19 кластеров расположены в плотной центральной части радиусом 500 метров. Остальные кластеры расположены на удалении  $\approx 1$  км от центральной части.



Рисунок 2.4 — Детектор установки Тунка-133

На Рис. 2.4 изображен отдельный оптический детектор установки. Каждый детектор спроектирован на базе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) ЕМІ 9350 с полусферическим фотокатодом диаметром 20 см и представляет собой металлический цилиндр диаметром 50 см, накрытый плексигласом и направленный в зенит, внутри которого находится ФЭУ, система обогрева и сопутствующее оборудование. Также детектор оборудован удаленно управляемой крышкой для защиты ФЭУ.

Сигнал фотоумножителя предусиливается и направляется в центр кластера по кабелю RG58 длиной 95 метров. В центре кластера происходит оцифровка сигнала с частотой 250 МГц и сохранение данных в кольцевой буфер. Генерация триггера происходит по порогу амплитуды сигналов ФЭУ. При превышении порога на 3 и более детекторах в кластере в пределах окна в 0.5 микросекунд производится запись данных из кольцевого буфера для всех детекторов кластера. Минимальная длина регистрируемого импульса ШАЛ составляет 20 наносекунд. Динамический диапазон оцифровки составляет порядка  $3 \cdot 10^4$ . Такое значение достигается тем, с каждого детектора поступает двухканальный сигнал, где ка-

налы имеют разный фактор усиления. Данные с каждого кластера направляются в центр сбора данных по оптоволоконным линиям. Установка регистрирует события в диапазоне энергий  $10^{16} - 10^{18}$  эВ. Измерения начинаются в сентябре и заканчиваются в апреле-мае, проводятся в ясные безлунные ночи, эффективное время измерений составляет около 500 часов в год.

### 2.1.3 Tunka-GRANDE

Tunka-GRANDE [94] - установка детекторов частиц на основе пластиковых сцинтилляторов. Установка была развернута в 2015-2017 годах на базе счетчиков, ранее использовавшихся в экспериментах EAS-Top и KASCADE-Grande [95].

Установка включает 19 станций, каждая из которых состоит из двух частей. Первая, наземная, часть включает 12 счетчиков общей площадью около  $7.68 \text{ м}^2$  и регистрирует заряженные частицы ШАЛ на уровне установки (см. Рис. 2.5). Вторая часть расположена под землей на глубине порядка 1.5 м, состоит из 8 счетчиков общей площадью  $5.12 \text{ м}^2$  и предназначена для выделения проникающей мюонной компоненты. Обе части находятся в непосредственной близости друг от друга. Каждый сцинтилляционный счетчик состоит из светособирающего дюралюминиевого кожуха в виде усеченной пирамиды, внутренняя поверхность которого покрыта тонким диффузно-отражающим слоем белой эмали. Внутри кожуха размещаются пластмассовый сцинтиллятор NE102A, выполненный в виде плоской пластины размером  $800 \times 800 \times 40$  мм, и ФЭУ PHOTONIS XP-3462. Данная геометрия сцинтилляционного детектора позволяет достичь высокой однородности как по амплитуде сигнала, так и по времени появления сигнала на выходе ФЭУ по отношению ко времени прохождения заряженной частицы через сцинтиллятор. На настоящий момент идет разработка методик обработки данных Tunka-Grande и восстановления по ним параметров ШАЛ.

Использование Tunka-Grande в качестве триггера для установки Tunka-Rex позволило в несколько раз увеличить время наблюдений. Кроме того, при совместном анализе данных Tunka-Rex и Tunka-GRANDE дополнительная информация о мюонной компоненте может позволить увеличить точность измерения глубины максимума ШАЛ и восстановления массового состава.



Рисунок 2.5 — Общий вид счетчиков наземной части детектора Tunka-Grande

#### 2.1.4 Пилотный комплекс детекторов ШАЛ от гамма-квантов

Помимо наблюдения КЛ, важной задачей обсерватории также является исследование гамма-квантов (от 1.5 ТэВ). Для решения этой задачи проводится развертывание следующих установок (см. Рис. 2.6):

- TAIGA-HiSCORE [96], широкоугольная установка черенковского излучения ШАЛ. Установка состоит из массива из 120 низкопороговых широкоугольных черенковских детекторов (оптических станций), распределенных по площади 1 км<sup>2</sup> с расстоянием между станциями в 106 метров. Станции разбиты на 4 кластера, каждый из которых включает около 30 станций. В центре каждого кластера расположен локальный центр сбора данных, связанный с оптическими станциями оптоволоконными кабелями и кабелями для подачи питания.

Каждая оптическая станция установки TAIGA-HiSCORE включает в себя два контейнера - черенковский контейнер и контейнер с электроникой. Черенковский контейнер представляет собой металлический ящик габаритами 1 × 1 × 1 м, содержащий четыре ФЭУ с диаметром фотокатода

20 или 25 см (ET9352KB, R5912 и R7081), снабженных концентраторами света в виде конусов Винстона [97], увеличивающими доступную площадь светосбора в 4 раза. Угол обзора детектора составляет  $\approx 30^\circ$ , площадь сбора света -  $0.5 \text{ м}^2$ . Детектор снабжен обогревом входных иллюминаторов. Для защиты от дневного света, осадков и пыли контейнер имеет крышку, приводимую в движение электрическим двигателем.

Во втором термостабилизированном контейнере находится электроника первичной обработки и оцифровки сигналов (Рис.2.5). Сигналы с ФЭУ одной станции суммируются аналоговым образом.

Основными компонентами системы сбора данных оптических станций являются аналоговые сумматоры и 8-канальный АЦП на базе платы DRS-4, с помощью которых оцифровываются сигналы с анодов и пятого динода (для расширения динамического диапазона) каждого ФЭУ с шагом  $0.5 \text{ нс}$  в окне  $200 \text{ нс}$  после формирования триггера. Каждая станция установки TAIGA-HiSCORE подключается к своему центру оптическим кабелем, который служит для передачи данных и синхронизации.

Время наблюдений составляет порядка 500 часов в год. Наблюдения проводятся в зимние безлунные ночи, так же, как и на Тунке-133. Для безлунных ночей частота срабатывания станции TAIGA-HiSCORE составляет  $10\text{-}15 \text{ Гц}$ . Энергетический порог установки составляет  $80\text{-}100 \text{ ТэВ}$  для адронных атмосферных ливней и  $40\text{-}50 \text{ ТэВ}$  для ливней, образованных гамма-лучами. В настоящий момент массив находится на стадии активного расширения.

- TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) [98] - представляют собой телескоп-рефлекторы системы Дэвиса-Коттона. Рефлекторы телескопов имеют специальную сферическую форму диаметром  $432 \text{ см}$  ( $F/1.1$ ). Совокупная площадь 34 зеркал составляет  $10 \text{ м}^2$ . В фокусе телескопов расположены камеры на базе ФЭУ со светособирающими конусами Винстона. Каждая камера первых трех телескопов включает в себя 560 ФЭУ XR1911 диаметром  $19 \text{ мм}$ . Угол обзора камеры –  $9.72 \times 9.72 \text{ град}$ . Энергетический порог регистрации гамма-излучения телескопом около  $2 \text{ ТэВ}$ . Чувствительность в диапазоне  $1\text{-}20 \text{ ТэВ}$  составляет  $10\text{-}12 \text{ эрг / см}^2 \text{ с}$  при 50 часах наблюдения за источником. В состав отдельного телескопа входят камера, оптическая система (рефлектор и элементы камеры, расположенные в фокальной плоскости оптической системы), несущая кон-

струкция, опорно-поворотное устройство (монтажная), и аппаратура для записи, обработки и хранения данных.

Первый телескоп установки TAIGA-IACT был развернут в 2017 году и введен в режим тестовой эксплуатации в январе 2017 года. В 2017 телескоп был введен в режим штатных наблюдений. В настоящее время установка состоит из 3 телескопов.

- TAIGA-Muon [99] - сцинтилляционная установка, регистрирующая электронно-мюонную компоненту ШАЛ совместно с HiSCORE и IACT. На момент написания данного документа установка состоит из 3 станций, каждая из которых включает 8 наземных и 8 подземных сцинтилляционных счетчиков. Подземные счетчики расположены под наземными на глубине 1.6 м. Геометрически счетчики расположены в рамках квадрата со стороной в 5 м. Расстояние между счетчиками по поверхности составляет 1 м. Каждый кластер включает локальную систему сбора данных, в которой происходит оцифровка и предобработка данных. Локальная система включает 12-канальный модуль сбора данных BSD-12, два 10-канальных высоковольтных источника питания, сумматоры аналоговых сигналов, устройства управления и передачи данных. Из локального центра данные отправляются в центральную систему сбора данных, объединенную с другими установками гамма-обсерватории TAIGA.

Тункинская астрофизическая обсерватория включает в себя комплекс установок, позволяющий проводить всесторонние наблюдения ШАЛ. Методики независимого восстановления параметров ШАЛ по данным черенковских и радиодетекторов позволяют проводить эффективную перекрестную калибровку этих детекторов. Кроме того, использование единого калибровочного источника для установки Tunka-Rex, и установки LOPES, работающих совместно с установками Тунка-133 и с установкой KASCADE соответственно, позволяют проводить прямое сравнение восстановленной энергии между Тункой-133 и KASCADE [88]. Энергетический спектр и массовый состав, восстановленные по данным инструментов Тункинского полигона, находятся в хорошем согласии с данными других мировых экспериментов.



Рисунок 2.6 — Детекторы черенковского излучения ШАЛ от гамма-квантов. На переднем плане: черенковский контейнер установки HiSCORE. На заднем: телескоп IACT.

## 2.2 Tunka-Rex

Установка Tunka-Rex - антенная решетка из 63 антенных станций, регистрирующая радиоизлучение ШАЛ в диапазоне 30–80 МГц. Система сбора данных Tunka-Rex интегрирована в систему сбора данных Тунки-133 и Tunka-Grande, запись событий осуществляется по внешнему триггеру. В настоящем разделе приведено детальное описание детектора. На Рис. 2.8 изображена фотография антенной станции, на Рис. 2.9 – схема аналоговой сигнальной цепи.

### 2.2.1 Параметры и геометрия детектора

Прототип антенной станции Tunka-Rex был установлен на полигоне в 2009 году и присоединен к системе сбора данных установки Тунка-133 [100]. В 2012 было проведено развертывание первой очереди установки Tunka-Rex, состоящей из 18 антенных станций. В течение первого сезона измерений в ходе совместных



Рисунок 2.7 — Общий вид кластера КЛ полигона Тункинского Астрофизического Центра Коллективного Пользования (ТАЦКП) по состоянию на 2014 год, На переднем плане - антенная станция Tunka-Rex, далее слева направо: оптический детектор и центр кластера Тунки-133, корпус оптической установки предыдущего поколения Тунка-25, сцинтилляторная станция Tunka-GRANDE.

измерений с черенковскими детекторами было выделено около 70 событий, что позволило сделать заключение о перспективности радиометода в условиях Тункинского обсерватории и принять решение о его дальнейшем развитии и построении большой антенной решетки. К 2013 году станций было уже 25 - по одной на каждый кластер Тунки-133, вблизи центров кластеров, 19 из которых были расположены в плотном ядре площадью  $\approx 1 \text{ км}^2$ , и 6 - на внешних кластерах (удаление от границ ядра порядка 200 м). С вводом в эксплуатацию установки Tunka-Grande стали доступны дополнительные каналы системы сбора данных, а также практически круглосуточное время измерений, и к каждому кластеру Tunka-Grande было подключено еще по две станции Tunka-Rex. Таким образом, после последнего расширения установка Tunka-Rex состояла из 63 антенных станций, по 3 станции на кластер (1 поколение присоединено к Тунке-133, 2 и 3 - к Tunka-GRANDE), с расстоянием между антеннами порядка 30-40 м (внутри кластера).



Рисунок 2.8 — Антенная станция Tunka-Rex

За время работы Tunka-Rex по триггеру Тунки-133 было накоплено порядка 1 миллиона событий, в настоящее время размещенных в виртуальной обсерватории Tunka-Rex (Tunka-Rex Virtual Observatory, TRVO [101]).

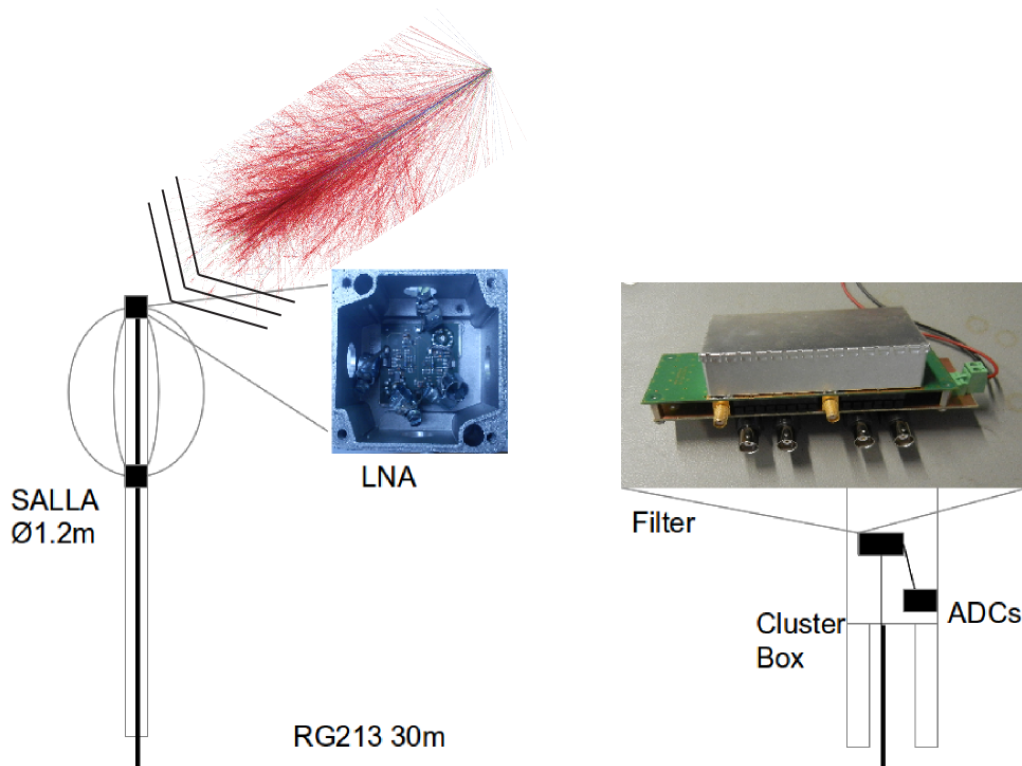


Рисунок 2.9 — Схематическое изображение аналоговой сигнальной цепи антенной станции Tunka-Rex. Слева направо: SALLA; предусилитель (LNA), соединенный с фильтром-усилителем кабелем RG213, длиной 30 м; фильтр-усилитель, подключенный к АЦП центра кластера.

Структура отдельной антенной станции Tunka-Rex:

- **SALLA**, **Short Aperiodic Loaded Loop Antenna** [102]. Регистрирующий элемент представляет собой двухканальную петлевую антенну, разработанную в Институте Технологий Карлсруэ для задач регистрации ШАЛ. Антенная станция состоит из двух круглых рамок диаметром 120 см, замкнутых снизу через нагрузку, сверху сходящихся в малошумный усилитель (LNA, Low Noise Amplifier). Каналы антенны взаимно перпендикулярны, что позволяет восстанавливать сигнал ШАЛ в двух поляризациях. Диаграмма направленности антенны характеризуется малым усилением на больших зенитных углах, что позволяет эффективно избежать регистрации антропогенных и техногенных помех из пригоризонтной области. Помимо Tunka-Rex, антенны такого типа с 2018 года также используются в обсерватории им. Пьера Оже [103]. Антенная станция закреплена на диэлектрическом столбе на высоте 1.5 м над уровнем земли (по нижней границе) в целях обеспечения “коровобезопасности” (непо-

средственно к территории обсерватории примыкает ферма). Рамки антенны сориентированы в северо-восточном и северо-западном направлениях (по 45 градусов к сторонам света) и регистрируют две независимые горизонтальные компоненты электромагнитного поля. Восстановление третьей (вертикальной) компоненты сигнала ШАЛ возможно с использованием данных о направлении прихода ШАЛ, но в существующей процедуре восстановления параметров ШАЛ вертикальная компонента не используется в силу незначительного вклада в общее излучение. Неизбежные сдвиги в единицы и доли градусов при установке и эксплуатации антенны ежегодно фиксируются и учитываются при восстановлении параметров импульса ШАЛ. Максимальные сдвиги находятся в пределах  $\pm 0.5-1^\circ$ . Диаграмма направленности антенны (однорамочный вариант) приведена на Рис. 2.10.

- **Аналоговая сигнальная цепь.** Антенная станция состоит из двух перпендикулярных круговых рамок, замкнутых снизу через нагрузку в 390 Ом, а сверху подключенных к малому шумному усилителю (LNA, Low Noise Amplifier), выступающему в качестве первого каскада усиления [104]. Антенна соединена с центром кластера коаксиальным кабелем RG213 длиной 30 метров. В центре кластера кабель соединяется с фильтром-усилителем, выделяющим полосу 30-76 МГц с усилением порядка +20 Дб.
- **Аналого-цифровой преобразователь.** Сигнал с выхода фильтра-усилителя отправляется на систему сбора данных кластера. Система сбора данных включает в себя 4 платы АЦП, модуль триггера, модуль временной синхронизации, локальный таймер и другие необходимые для работы модули. Детальное описание системы сбора данных см. в [105]. Оцифровка данных производится с частотой дискретизации 200 МГц и глубиной кодирования 12 бит. Запись данных непрерывно производится в кольцевой буфер длиной 1024 отсчета АЦП (5 микросекунд). При генерации триггера хост-установкой данные из кольцевого буфера отправляются в центральную систему сбора данных.

Т.к. все аналоговые компоненты имеют несколько отличные друг от друга характеристики, перед развертыванием установки была проведена калибровка LNA и фильтров-усилителей, данные которой учитываются при дальнейшей обработке.

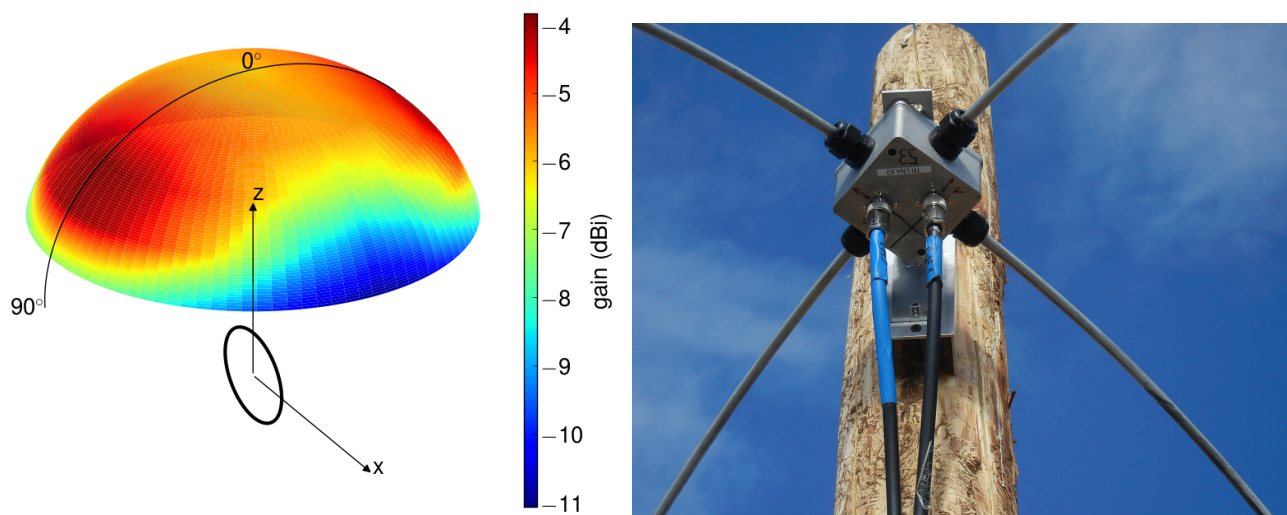


Рисунок 2.10 — Слева: диаграмма направленности антенны SALLA (1 рамка).  
Справа: блок антенны с усилителем крупным планом.

### 2.2.2 Моделирование

Для того, чтобы восстановить характеристики первичной частицы по результатам измерений антенной решетки, необходимо определить соответствие между компонентами ливня, наблюдаемыми на детекторе, и соответствующими параметрами ШАЛ.

Радиоизлучение ШАЛ в целом хорошо описывается классической электродинамикой, поэтому задачи расчета излучения и производства частиц решаются независимо. Большинство используемых моделей радиоизлучения ШАЛ базируются на моделях расчета частиц ШАЛ, таких, как CORSIKA [106] и Aires [107]. Общее радиоизлучение модельного ливня является суперпозицией модельного излучения отдельных частиц. Его можно рассчитать либо микроскопически, учитывая вклад каждой отдельной частицы, либо макроскопически, учитывая вклад значимых электрических токов в процессе развития ШАЛ.

В анализе данных Tunka-Rex используется микроскопический подход. Траектории заряженных частиц для расчета излучения моделируются при помощи программного пакета CORSIKA [106]. Для моделирования высокоэнергетичных адронных взаимодействий были использованы модели QGSJET-II.04 [108], для низкоэнергетичных - FLUKA [109]. Полученные траектории используются в ПО CoREAS для расчета радиоизлучения ШАЛ. Вклад каждой частицы рассчитывается отдельно, после чего проводится суммирование вкладов в модельной точ-

ке наблюдения; таким образом, мы получаем общий импульса ШАЛ. Подробное описание механики работы CORSIKA и CoREAS доступно по ссылкам [106; 110].

С использованием такого подхода в ходе первого сезона измерений установок Tunka-Rex и Тунка-133 Костюниным Д. совместно с другими участниками коллаборации были установлены параметры, связывающие ФПР наблюдаемого радиоизлучения с параметрами первичной частицы. В качестве входных параметров для моделирования использовались результаты восстановления установки Тунка-133 (энергия и глубина максимума ШАЛ). Детальное описание амплитудной калибровки и моделирования установки Tunka-Rex доступно по ссылке [111].

### 2.2.3 Стандартная процедура набора и обработки данных

В настоящем разделе приведено детальное описание системы сбора данных и сигнальной цепи установки Tunka-Rex, описание стандартной процедуры восстановления параметров ШАЛ и результаты сравнения результатов, полученных при использовании этой процедуры, с результатами восстановления установки Тунка-133.

Tunka-Rex запускается вместе с хост-установкой (Тунка-133 либо Tunka-Grande), выдающей триггер на запись. При срабатывании триггера происходит запись данных со всех антенных станций, подключенных к системе сбора данных. Каждый кластер установки Тунка-133 имеет свой локальный центр сбора данных. Генерация триггера на уровне кластера в установке Тунка-133 происходит по превышении сигналами заданного порога, принятых на не менее чем 3 детекторах в кластере в окне 0.5 микросекунд. При генерации триггера на центре кластера проводится оцифровка и запись сигнала со всех оптических детекторов и антенных станций кластера. Записанные данные отправляются в общий центр сбора данных по оптоволоконной линии. Впоследствии данные с отдельных кластеров объединяются в события на этапе обработки. Обработка данных [75; 112] осуществляется в несколько этапов:

1. Нахождение сигнала во временном окне. За исключением известной разницы в длинах сигнальных кабелей, учитываемой при последующей обработке, конфигурация оборудования для всех антенн идентична, и по-

этому временные окна, внутри которых находится импульс ШАЛ, также одинаковы. Эмпирическим путем был установлен оптимальный размер окна в 300 нс. Окно отцентровано по позиции импульса ШАЛ, полученной с учетом времени срабатывания триггера и задержек системы сбора данных. События, находящиеся внутри окна, считаются записанными от одного и того же ливня.

2. Выборка по отношению сигнал/шум. Шум  $N_{RMS}$  определяется по RMS (среднеквадратическому значению), измеренному в отдельном окне. Далее вычисляется отношение сигнал/шум:

$$SNR = \mathcal{E}^2 / N_{RMS}^2, \quad (2.1)$$

где  $\mathcal{E}$  - амплитуда сигнала,  $N_{RMS}$  - амплитуда шума. По вычисленному отношению производится выборка  $SNR > 10$  для восстановленного вектора электрического поля. Уровень шума оценивается как минимальное значение RMS в шумовом окне, расположенном с 1000 по 1500 наносекунды в сигнальной дорожке. Результирующий уровень сигнал/шум оценивается как отношение мощностей сигнала и шума. Для стандартного восстановления порог по этому уровню  $SNR_{th} = 16$ . Далее выбираются события, содержащие не менее 3 антенн, превысивших порог.

3. Следующим шагом выбрасываются антенны с ложным срабатыванием, расположенные на большом расстоянии от оси ливня.
4. Полученный набор дорожек со сработавших антенн объединяется в события согласно временным отметкам сигнальных дорожек со всей антенной решетки, записанных внутри окна длительностью в 7 микросекунд (с учетом задержек сигнальных линий).
5. После объединения в события сигнальные дорожки обрабатываются цифровыми фильтрами. Спектр сигнала фильтруется медианным фильтром для удаления узких пиков, обусловленных наводками в коаксиальном кабеле, связывающем LNA с центром кластера. Также подавляется область частот 30-35 МГц, для которой характерны высокоамплитудные широкополосные помехи, в основном вызванные оборудованием центра кластера.
6. Далее проводится восстановление направления прихода ШАЛ и его выборка по разнице с восстановлением события Тунки-133, зарегистрированного на той же временной отметке. Восстановление проводится ме-

тодом триангуляции по разнице времен прихода импульса на разные антенны в приближении плоского фронта. В дальнейшую обработку пропускаются события с разницей в пределах  $\pm 5^\circ$ .

7. Далее проводится восстановление электромагнитного поля на антенне. Для восстановления сигнала используется программное обеспечение Auger Offline. С учетом восстановленного угла прихода и известной диаграммы направленности и углов поворота антенной станции восстанавливаются горизонтальные поляризации  $V \times B$  и  $V \times V \times B$ . Вертикальная поляризация, как правило, не учитывается в дальнейшем анализе как оказывающая незначительный эффект.
8. Для сигнальных дорожек, соответствующих восстановленным поляризациям, строится огибающая. Огибающая сигнала  $s(t)$  определяется как абсолютное значение аналитического сигнала  $u(t) = s(t) + i\mathcal{H}[s(t)]$ , где  $\mathcal{H}$  – преобразование Гильберта. Максимум огибающей принимается как амплитуда сигнала ШАЛ, зарегистрированного на станции.
9. Исключаются дорожки со станций, характеризующихся постоянными высокими уровнями шумов, определяющимися путем автоматического мониторинга усредненных спектров станций.

Также перед дальнейшей обработкой на данные накладываются ограничения по отношению сигнал/шум и по числу антенн, зарегистрировавших сигнал с амплитудой выше заданного порога.

#### 2.2.4 Восстановление параметров ШАЛ стандартным методом

В течение первого сезона измерений (2012-2013) для настройки процедуры восстановления параметров ШАЛ использовалась полная информация о геометрии ливня с детектора Тунка-133. После настройки и кросс-калибровки детекторов был проведен полу-слепой анализ (с использованием угла прихода от Тунки-133) с полным восстановлением параметров ШАЛ. Подробное описание приведено в [75].

Основной параметр, анализируемый на постобработке - это пространственное распределение амплитуды зарегистрированного сигнала. Амплитуда рассчитывается как максимум огибающей Гильберта от амплитудной дорожки в окне,

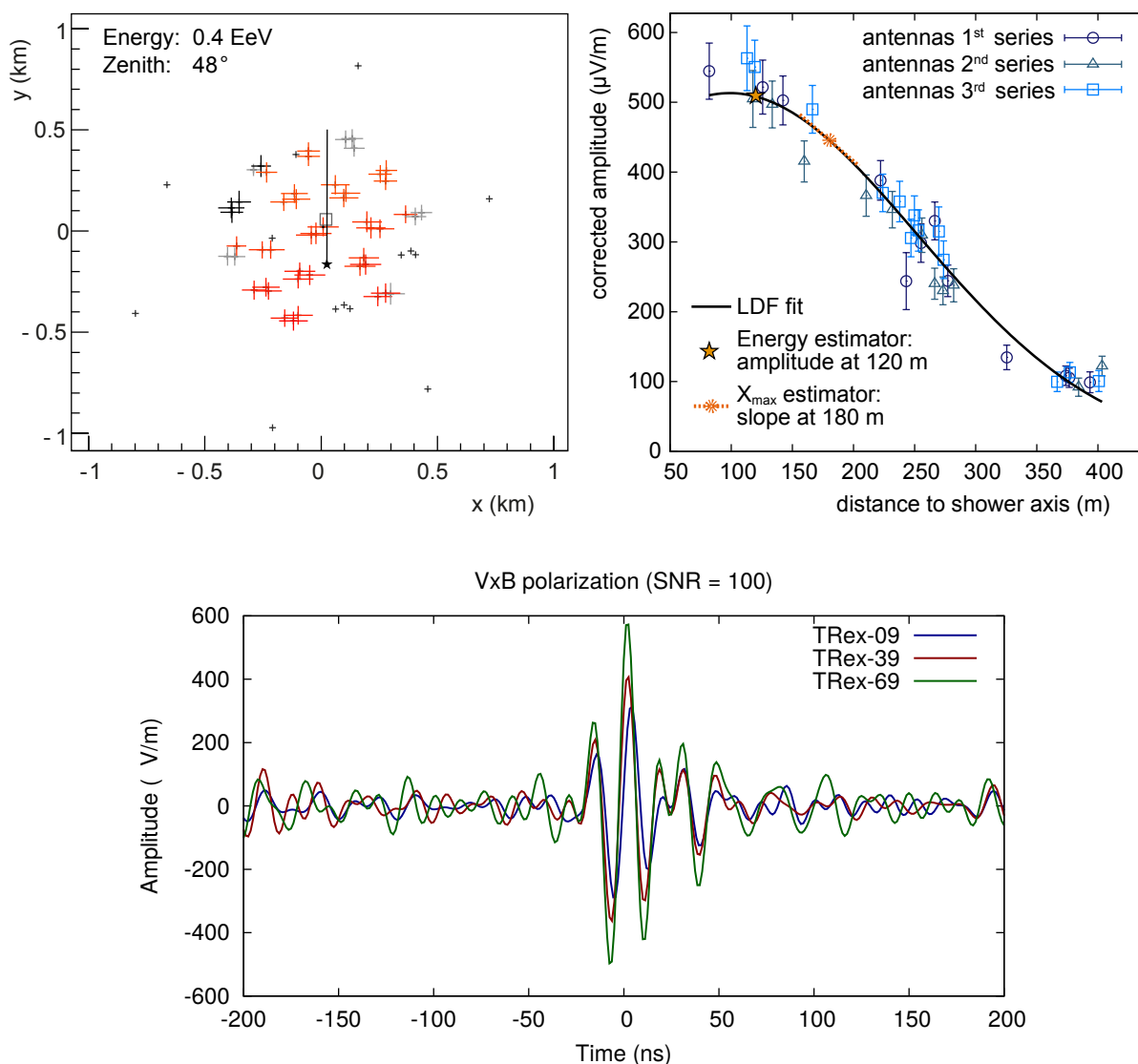


Рисунок 2.11 — Пример события Tunka-Rex (ПО Auger Offline). Верхний левый график: пространственное распределение времени регистрации (цвет, от оранжевого к красному) и амплитуды (размер точек, две поляризации) событий на антенных станциях Tunka-Rex на карте. Верхний правый: пространственное распределений зарегистрированной амплитуды сигнала на антеннах в зависимости от расстояния до оси ливня с наложенной функцией пространственного распределения. Нижний: амплитуда в зависимости от времени, зарегистрированная на трех антенных станциях, расположенных в одном кластере.

содержащем сигнал. Далее полученное распределение подгоняется функцией пространственного распределения (ФПР) в координатах ливня (расстояние до оси

в плоскости, перпендикулярной оси):

$$\mathcal{E}(r) = \mathcal{E}_{r_0} \sin \alpha_g \exp[f_\eta(r - r_0)], \quad f_\eta(x) = \sum_{k=1}^N a_k x^k \quad (2.2)$$

где  $\mathcal{E}_{r_0}$  – амплитуда на детекторе на расстоянии  $r_0$  от оси ливня,  $\alpha_g$  – геомагнитный угол, то есть угол между направлением магнитного поля и осью ливня,  $r$  – расстояние до оси ливня,  $r_0$  – свободный параметр,  $a^k$  – параметр, зависящий от характеристик отдельного ШАЛ,  $N = 2$ .

Энергия рассчитывается исходя из значения ФПР на расстоянии 120 м от оси ливня. Данное расстояние было установлено эмпирическим путем как характеризующееся наилучшей корреляцией энергии с амплитудой [113].

В общем виде формула для восстановления энергии первичной частицы выглядит таким образом:

$$E_{\text{пр}} = \kappa \left( \frac{\mathcal{E}_{\text{corr}}(d_0)}{\mu\text{V/m}} \right)^b \quad (2.3)$$

где  $\kappa$  – показатель наклона калибровочной кривой,  $\mathcal{E}(r)$  – скорректированная на асимметрию амплитуда,  $d_0$  – дистанция, являющаяся свободным параметром и  $b$  – также свободный параметр, определенный численно.

Для восстановления  $X_{\text{max}}$  в рамках стандартного подхода используется вариант параметризации, предложенной в [57] для обработки данных черенковских детекторов:

$$X_{\text{max}} = X_{\text{det}} / \cos \theta - (A + B \log(a_1 + \bar{b})). \quad (2.4)$$

Подробное описание подхода и значения параметров приведены в [113].

С использованием этих подходов было проведено восстановление энергии и глубины максимума для выборки событий, зарегистрированных в 2012-2014, и последующее сравнение с восстановлением Тунки-133. Результаты сравнения показаны на Рис. 2.12.

### 2.3 Резюме

Tunka-Rex - первая мировая радиоустановка ШАЛ, для которой успешно проведено независимое восстановление энергетического спектра и массового состава КЛ. Восстановление проведено методом анализа ФПР амплитуды радиоиз-

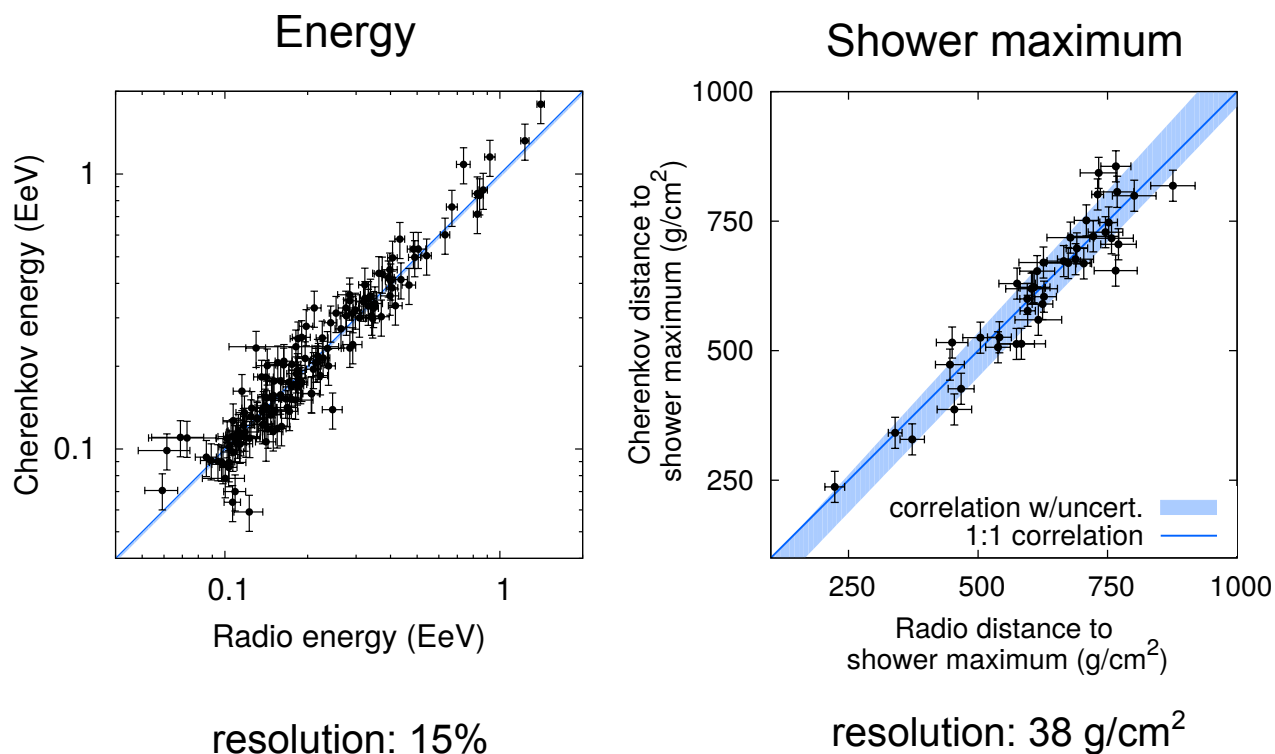


Рисунок 2.12 — Результаты восстановления параметров ШАЛ по данным Tunka-Rex в сравнение с восстановлением хост-эксперимента Тунка-133 по результатам методики простой ФПР.

лучения ШАЛ по данным измерений 2012-2014 гг, записанных по триггеру установки Тунка-133. В ходе работы установки было внедрено множество аппаратных и программных усовершенствований, направленных в основном на фильтрацию и подавление шумов и повышение точности восстановления параметров ШАЛ. Также в ходе ежегодного ввода в эксплуатацию новых антенн плотность установки была существенно увеличена. Если в 2012 году установка состояла из 18 антенн, то к 2017 их количество достигло 63. Расширение установки значительно увеличило эффективную апертуру и, соответственно, количество зарегистрированных событий, доступных для анализа.

### Глава 3. Модель эффективной апертуры антенной решетки, регистрирующей радиоизлучение ШАЛ

Под эффективностью регистрации будем понимать вероятность регистрации события ШАЛ на антенной решетке с заданными параметрами. Под эффективной апертурой, соответственно - апертуру, для которой эффективность всех регистрируемых событий будет выше пороговой.

В зависимости от параметров первичной частицы и установки, эффективность регистрации для разных событий может сильно варьироваться. Учет этой эффективности необходим для восстановления параметров ШАЛ, потока, энергетического спектра и массового состава КЛ.

Поток космических лучей рассчитывается как:

$$J(E) = \frac{d^4N}{dE dA d\Omega dt} \approx \frac{\Delta N(E)}{\Delta E} \frac{1}{H(E)}, \quad (3.1)$$

где  $N$  - количество событий,  $E$  - энергия первичной частицы,  $A$  - апертура,  $\Omega$  - телесный угол, соответствующий диапазону углов прихода КЛ, для которых возможна эффективная регистрация,  $t$  - время наблюдений,  $H$  - экспозиция.

Задача расчета экспозиции включает в себя задачи учета времени измерений и расчета эффективной апертуры детектора. Экспозиция рассчитывается как:

$$H(E) = \int_T \int_{\Omega} \int_S \varepsilon(E, t, \theta, \varphi, x, y) \cos \theta dS d\Omega dt = \int_T \mathcal{A}(E, t) dt \quad (3.2)$$

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi, \quad dS = dx dy, \quad (3.3)$$

где  $\theta$  - зенитный угол,  $\varphi$  - азимутальный угол,  $x, y$  - координаты оси ливня в плоскости детектора,  $S$  - эффективная площадь детектора,  $\mathcal{A}$  - эффективная апертура,  $\varepsilon$  - эффективность.

Настоящий раздел посвящен расчету эффективной апертуры. Время измерений для последующего расчета экспозиции было определено по времени работы установки Tunka-Rex по триггеру установки Тунка-133 с учетом отклонений темпа счета от средних значений, как показано в [114; 115].

Эффективность регистрации с использованием радиометода зависит от множества параметров, в число которых входят как параметры установки, так и параметры первичной частицы.

Важнейшим параметром установки, связанным с апертурой, является геометрия установки. От размеров установки зависит чувствительность для регистрации событий высоких энергий, а от плотности расположения антенных станций - количество доступных точек для подгонки ФПР и, соответственно, точность восстановления параметров ШАЛ и энергетический порог. Также геометрия установки определяет зависимость эффективности регистрации от положения оси ШАЛ на площади установки. Кроме того, влияние на эффективность регистрации оказывают диаграмма направленности и угловая чувствительность антенных станций, выбранная полоса частот, характерные уровни шума, качество сигнальной цепи, характеристики системы сбора данных, методики выделения полезного сигнала на фоне шума и другие параметры.

Основными параметрами первичной частицы, влияющими на эффективность регистрации, являются ее энергия, масса и угол прихода. Энергия первичной частицы влияет на амплитуду сигнала ШАЛ и размеры области, в которой этот сигнал превышает уровень шума. В дальнейшем мы будем называть эту область на площади детектора отпечатком ливня. Угол прихода также влияет на амплитуду радиосигнала ШАЛ (в силу геомагнитного эффекта, подробнее рассмотрено ниже) и на чувствительность антенной станции соответственно ее диаграмме направленности. Масса первичной частицы влияет на глубину максимума ШАЛ, который соотносится с максимальным выходом радиоизлучения. Максимум ШАЛ для легких частиц расположен на больших глубинах атмосферы, чем для тяжелых частиц, и, таким образом, область основной генерации радиоизлучения для частиц разных масс находится на разном расстоянии от детектора, что также влияет на эффективность регистрации. Это влияние растет с ростом зенитного угла прихода ШАЛ.

Как уже было сказано выше, для случая радио измерений зависимость эффективности работы детектора от азимутального угла  $\varepsilon(\varphi) \neq \text{const}$ , т.к. амплитуда радиоизлучения, вызванного геомагнитным эффектом, вносящим основной вклад в общее излучение, зависит от угла  $\alpha$  между осью ливня и вектором геомагнитного поля, поэтому в дальнейших вычислениях мы переходим от азимутального угла  $\varphi$  к геомагнитному углу  $\alpha$  (см. Рис. 3.1):

$$(\theta, \varphi) \rightarrow (\theta, \alpha) : \varepsilon = \varepsilon(E, t, \theta, \alpha, x, y), \quad \alpha = \alpha(\theta, \varphi, \theta_B, \varphi_B), \quad (3.4)$$

где  $\theta$  - зенитный угол,  $\varphi$  - азимутальный угол,  $\varepsilon$  - эффективность регистрации,  $E$  - энергия первичной частицы,  $t$  - полное время измерений,  $\alpha$  - геомагнитный угол,  $x, y$  - координаты оси ШАЛ на поверхности детектора.

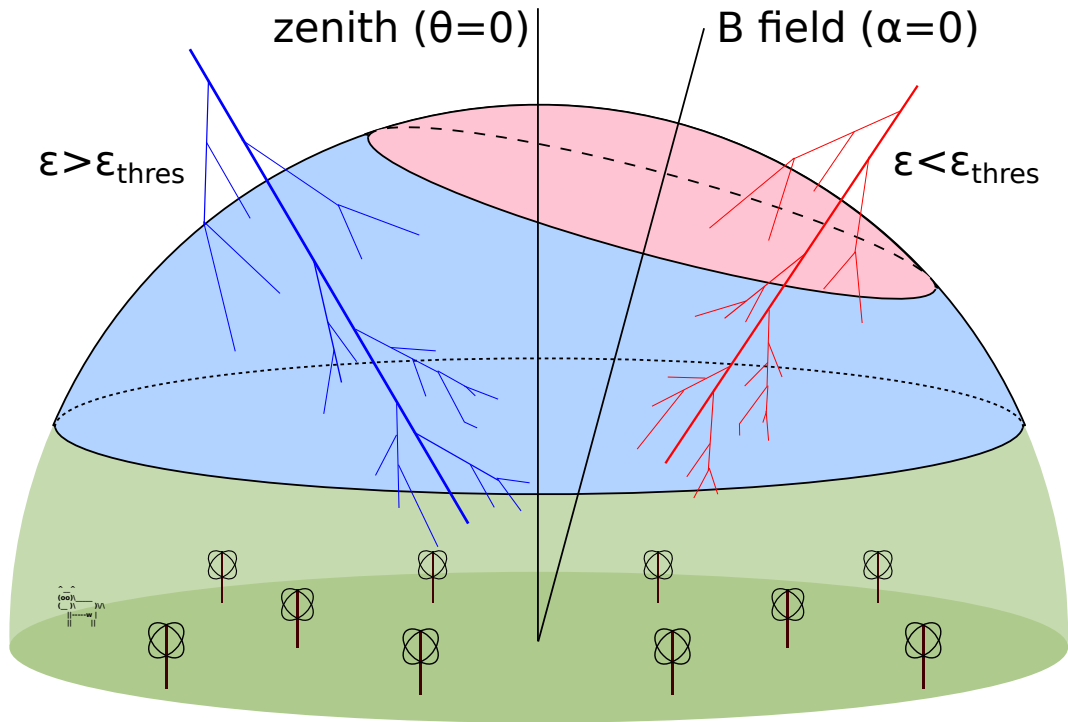


Рисунок 3.1 — Схематическое изображение зависимости эффективности регистрации от направления прихода. Зеленый - плоскость детектора, синий - область направлений прихода ШАЛ, по которым возможно эффективное восстановление, красный - область вокруг вектора геомагнитного поля, характеризующаяся низкой амплитудой сигнала и затрудненным восстановлением.

Для установки Tunka-Rex параметризацию эффективности можно провести следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_R(E, \theta, \alpha, x, y) \varepsilon_a(E, \theta, \alpha) \varepsilon_i(E, x, y, t). \quad (3.5)$$

Первый член  $\varepsilon_R$  определяет эффективную область детектора для ШАЛ с энергией  $E$  и углами прихода  $(\theta, \alpha)$ . Т.к. установка Tunka-Rex в основном радиально симметрична, этот член может быть записан в следующем виде:

$$\varepsilon_R(E, \theta, \alpha, x, y) = \varepsilon_R(R_{E, \theta, \alpha}^2 - x^2 - y^2), \quad (3.6)$$

где  $R_{E, \theta, \alpha}$  - эффективный радиус детектора для энергии  $E$  и углов прихода  $(\theta, \alpha)$ .

Второй член,  $\varepsilon_a$ , определяет эффективность в зависимости от энергии и угла прихода.

Последний член,  $\varepsilon_i$ , определяет неактивную область детектора, измерения на которой не проводятся в силу неполадок, имевшихся в момент времени  $t$ . В настоящей работе детальное исследование этого вклада в общую эффективность не проводилось, т.к. периоды времени, характеризующиеся значимым количеством неполадок на разных станциях, вручную исключены из анализа. Таким образом, в случае кратковременного выключения отдельных антенн из анализа, настоящая модель будет показывать большую эффективность по сравнению с фактической эффективностью.

В настоящем разделе приведено описание модели эффективной апертуры антенной решетки, регистрирующей радиоизлучение ШАЛ, и проведения ее верификации на данных установки Tunka-Rex. Модель основана на подходе к расчету эффективности регистрации, разработанным Р. Хиллером [116] и дополненным учетом зависимости эффективности от геомагнитного угла прихода и глубины максимума ШАЛ.

### 3.1 ФПР и расчет отпечатка ливня

Как уже было сказано выше, отпечатком ливня мы называем область пространства на поверхности детектора, внутри которой амплитуда импульса ШАЛ превышает порог сигнал/шум, необходимый для успешного восстановления сигнала ШАЛ. Отпечаток, как правило, имеет эллиптическую форму. Порог сигнал/шум для сигнала с амплитудой  $S_{th}$  рассчитывается как:

$$S_{th} = \sqrt{10}N_{rms}, \quad (3.7)$$

где  $N_{rms} = 28$  мкВ/м, среднеквадратичный уровень шума, определенный по выборке, включающей первые 200 событий из каждого дня первого сезона измерений [116]. Таким образом, порог амплитуды сигнала, используемый в модели, составляет  $\approx 90$  мкВ/м.

Для расчета зависимости амплитуды от расстояния до оси ливня в модели используется экспоненциальное приближение:

$$S(r) = S_{r_0} \cdot \exp(-\eta(r - r_0)), \quad (3.8)$$

где  $S(r)$  - амплитуда сигнала на расстоянии  $r$  от оси ливня,  $S_{r_0}$  - амплитуда на референтном расстоянии,  $\eta$  - показатель наклона ФПР.

Площадь отпечатка, таким образом, рассчитывается как:

$$A_{th} = \frac{\pi r_{th}^2}{\cos\theta}, \quad (3.9)$$

где  $r_{th}$  - радиус отпечатка на поверхности,  $\theta$  - зенитный угол.  $r_{th}$ , согласно уравнениям 3.7 и 3.8, рассчитывается как:

$$r_{th} = r_0 + \frac{1}{\eta} \ln \frac{S_{120}}{S_{th}}, \quad (3.10)$$

где  $S_{120}$  - амплитуда на референтном расстоянии 120 метров.

Такая параметризация учитывает максимально возможный вклад от геомагнитного эффекта (для случая ливня, пришедшего перпендикулярно к вектору геомагнитного поля) Для того, чтобы ввести зависимость от геомагнитного угла и учесть вклад эффекта Аскарьяна,  $S_{120}$  переопределяется следующим образом:

$$S_{120}^\alpha = S_{120} \cdot \sqrt{\sin^2\alpha + \varepsilon^2}, \quad (3.11)$$

где  $\varepsilon = 0.085$  - коэффициент, определенный по усредненному вкладу эффекта Аскарьяна в общее излучение ШАЛ путем численного моделирования [113].

Т.к. с увеличением зенитного угла увеличивается расстояние до максимума ливня, и, соответственно, размер отпечатка, введем зависимость наклона ФПР от зенитного угла:

$$\eta(\theta) = \eta_0 \cdot \cos\theta. \quad (3.12)$$

По данным измерений 2012-2014 годов усредненный наклон  $\eta_0 = 8.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ . При больших зенитных углах максимум ливня при прочих равных сдвигается вверх по высоте, т.к. трек частицы проходит больше вещества атмосферы ( $\text{г/см}^2$ ) на метр высоты, чем при меньших зенитных углах. Этот факт вводит дополнительную зависимость удаленности максимума ливня от зенитного угла. Данная зависимость рассчитана численно по данным моделирования CORSIKA и введена в модель методом интерполяции (см. Рис. 3.2).

Таким образом, с учетом вышесказанного радиус модельного отпечатка ШАЛ (малую полуось эллипса) можно рассчитать как:

$$r_{th}(E, \theta, \alpha) = r_0 + \frac{1}{\eta_0 \cos\theta} \ln \frac{E_{th} \cdot \sqrt{\sin^2\alpha + \varepsilon^2}}{k S_{th}}, \quad (3.13)$$

где  $r_0 = 120$  метров - референтная дистанция, характеризующаяся наилучшей корреляцией амплитуды сигнала с энергией,  $k = 884 \frac{\partial \partial B}{\text{В/М}}$  - показатель зависимости

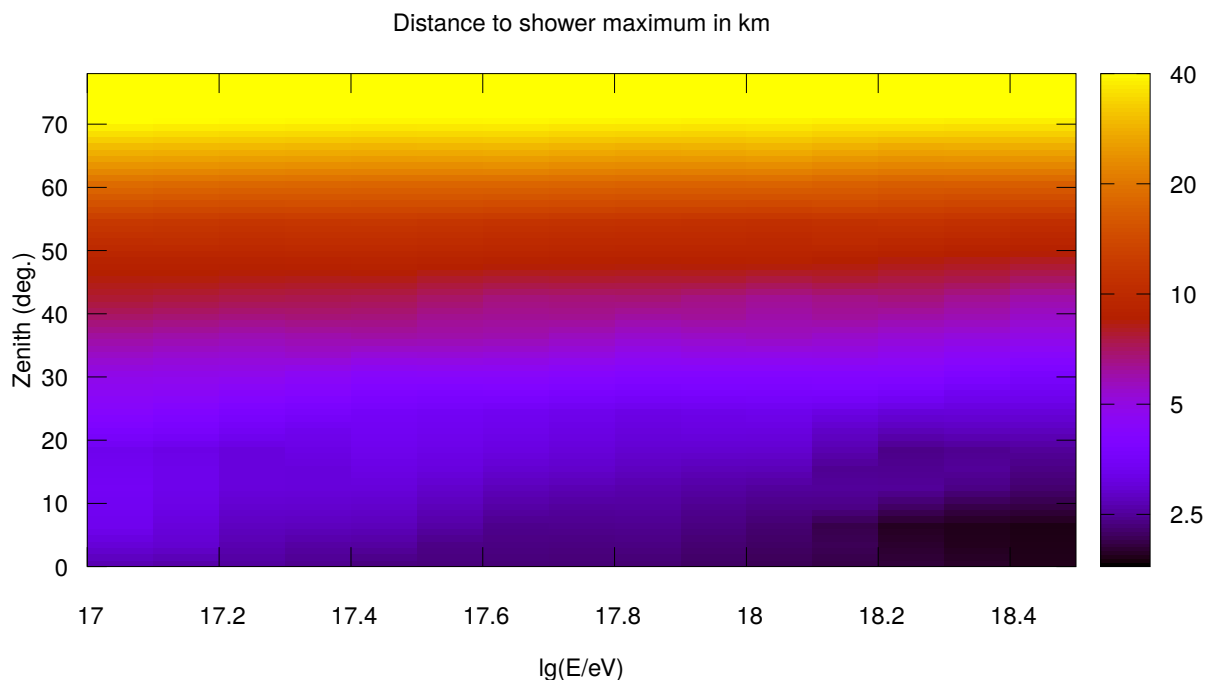


Рисунок 3.2 — Вариация среднего расстояния до  $X_{max}$  от поверхности детектора Tunka-Rex вдоль оси ливня в км в зависимости от энергии и зенитного угла.

уровня сигнала ШАЛ от его энергии, полученные в ходе моделирования с использованием ПО CoREAS. Большая полуось рассчитывается соответственно как  $r_{th}/\cos(\theta)$ .

### 3.2 Расчет эффективности регистрации ШАЛ

Работу модели можно описать следующим образом:

1. Задаются начальные параметры: геометрия расположения регистрирующих элементов, границы детектора, соотношения между размером отпечатка и параметрами ШАЛ, шаг сетки на площади детектора, на которой будут размещаться отпечатки, а также предельные значения и разрешения по углам прихода и энергиям.
2. Для каждого сочетания энергии и угла прихода проводится покрытие площади детектора точками, каждая из которых представляет собой ось модельного ливня. Точки распределяются по поверхности регулярной сеткой с заданным разрешением. Вокруг каждой точки размечается соответствующий отпечаток ливня.

3. Производится подсчет доли "эффективно" зарегистрированных ШАЛ, удовлетворяющих критерию эффективности, который определяется как попадание не менее чем трех антенных станций внутрь отпечатка.
4. Для каждого сочетания энергии и угла прихода проводится расчет средней эффективности по площади детектора, определяющейся как отношение числа ШАЛ, удовлетворяющих критерию п.3, к их общему числу:

$$\varepsilon = \varepsilon(E, t, \theta, \alpha) = \frac{N_{detected}}{N_{total}}, \quad (3.14)$$

где  $E$  - энергия первичной частицы,  $t$  - время наблюдений,  $\theta$  - зенитный угол,  $\alpha$  - геомагнитный угол,  $N_{detected}$  - число эффективно зарегистрированных ШАЛ,  $N_{total}$  - общее число ШАЛ, распределенных на площади детектора.

Пример распределения осей "эффективно" зарегистрированных ШАЛ (для различных конфигураций детектора, соответствующих разным этапам расширения установки) показан на Рис. 3.3. Белые области на этом рисунке отображают оси ШАЛ, характеризующихся низкой эффективностью регистрации, серые - соответственно, с высокой. Т.к. антенные станции расположены по поверхности установки неравномерно, общая эффективность для ШАЛ с заданными параметрами (энергия и угол прихода) усредняется по всей площади установки.

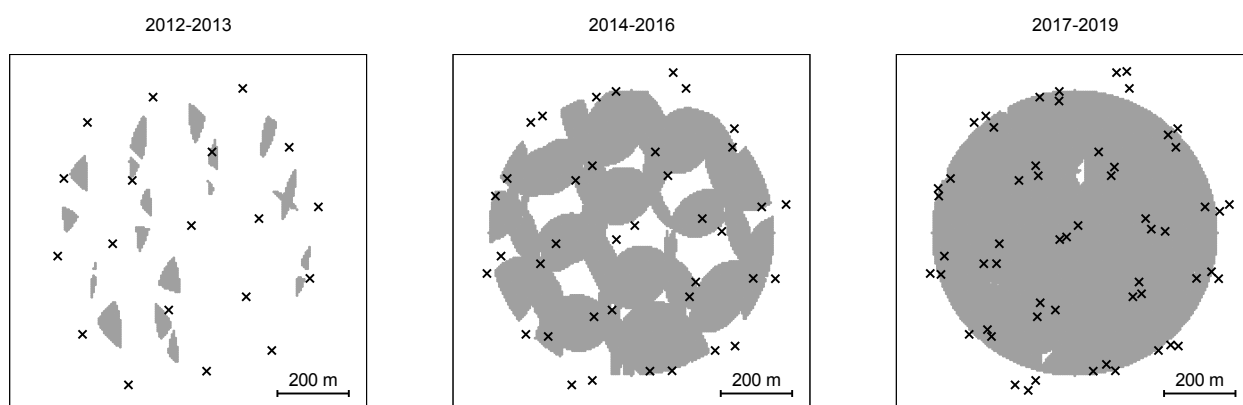


Рисунок 3.3 — Распределение осей "эффективно" зарегистрированных ШАЛ в проекции на поверхность детектора для энергии  $10^{17.4}$  эВ по результатам модели для разных этапов расширения установки. Угол и энергия ШАЛ зафиксированы.

Площадь детектора определяется как площадь круга радиусом в 400 метров с центром, соответствующим геометрическому центру установки Tunka-Рex.

Значение радиуса было определено эмпирически, как характеризующееся началом падения эффективности для ливней с различными параметрами (см. Рис. 3.4).

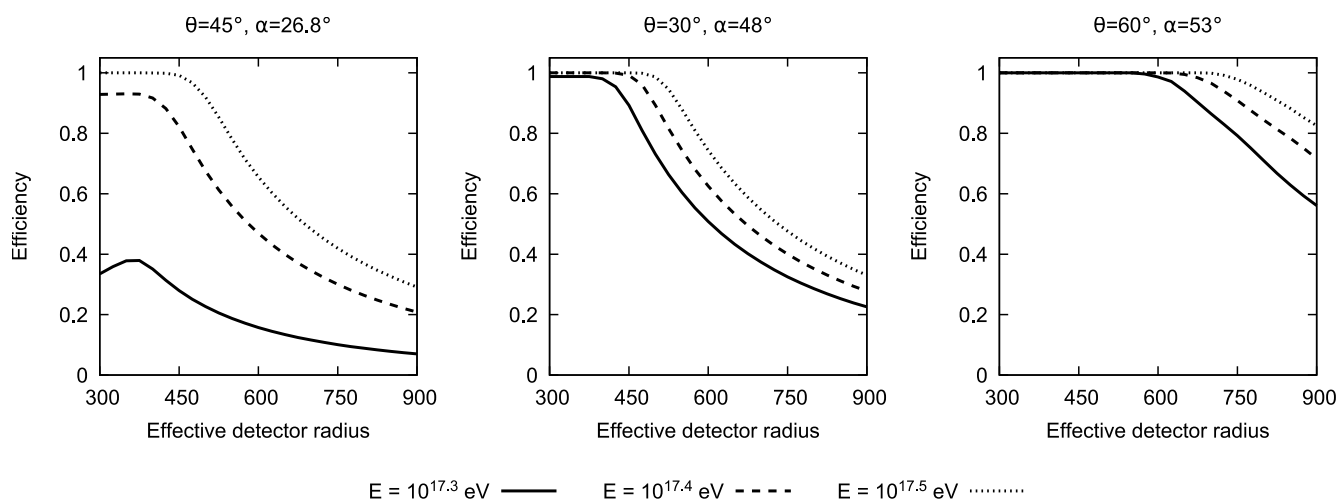


Рисунок 3.4 — Средняя эффективность регистрации в зависимости от расчетного радиуса детектора для различных энергий и углов прихода для конфигурации с 2 антеннами на кластер.

Для каждой энергии  $E$  мы рассчитали эффективность как функцию от  $\cos\theta$  и  $\sin\alpha$ . Такой выбор системы координат обоснован линейными зависимостями  $\varepsilon_a(\cos\theta)$  (размер отпечатка пропорционален  $\cos\theta$ ) и  $\varepsilon_a(\sin\alpha)$  (амплитуда радиоизлучения пропорциональна  $\sin\alpha$ ). В силу этого распределение эффективности в данной координатной системе имеет достаточно гладкую форму и может быть хорошо интерполировано численными методами при минимизации риска вычислительных ошибок. Сравнение между этой и полярной координатными системами показано на Рис.3.5.

### 3.3 Верификация модели

В тестовой выборке для верификации модели были использованы значения от  $10^{16}$  до  $10^{18}$  эВ по энергии и от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  по зенитному углу и по всем азимутальным углам с распределением осей ШАЛ по поверхности детектора равномерной сеткой с шагом в 5 метров.

Для настройки модели были использованы данные измерений по триггеру от установки Тунка-133 за 2012-2014 годы. Такой выбор обусловлен, во-первых,

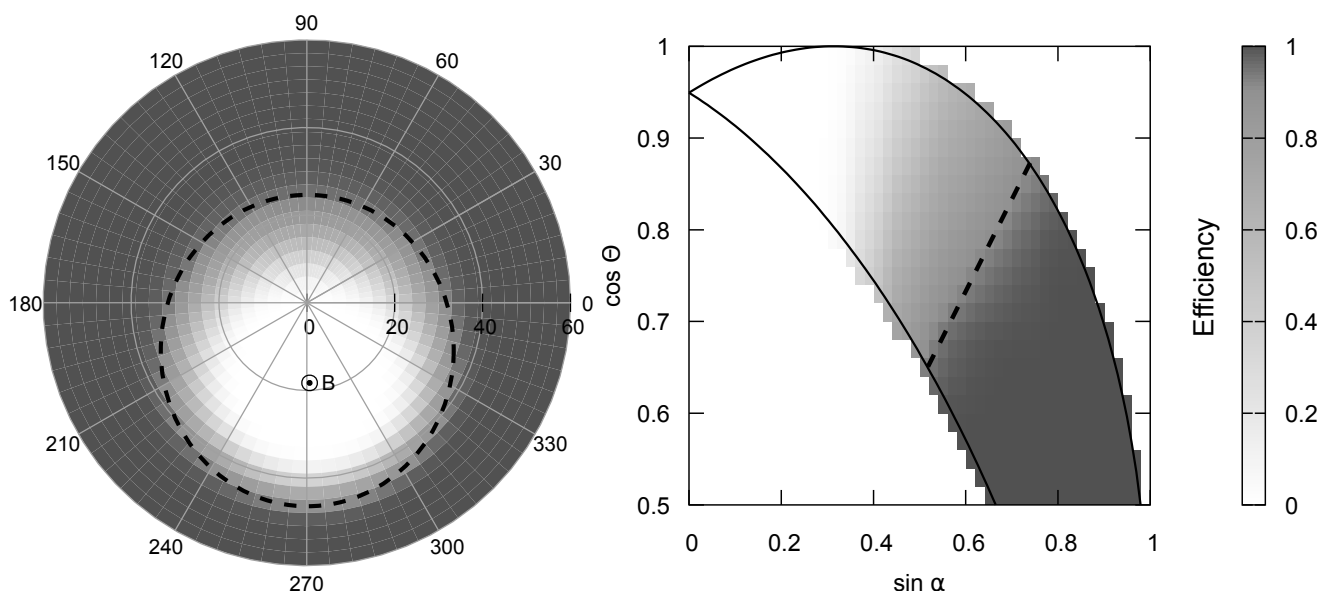


Рисунок 3.5 — Расчетное распределение эффективности в зависимости от направления прихода первичной частицы с энергией  $10^{17.4}$  эВ в полярных координатах (слева) и координатах  $\sin\alpha \cos\theta$  (справа). Пунктирная линия показывает порог в 90% эффективности.

сравнительно низкими уровнями фонового шума в этот период (в дальнейшем с вводом в эксплуатацию новых установок уровни техногенных шумов на полигоне росли), а также высокой точностью независимого восстановления энергии по данным установки Тунки-133, в отличие от установки Tunka-Grande. В выборку для настройки были включены данные с одной и двумя антеннами на кластер.

В качестве входных данных для тестирования модели использованы результаты восстановления параметров ШАЛ по данным установки Тунка-133. Для всей выборки данных была проведена событийная оценка эффективности, после чего проведено сравнение доли событий, для которых модель предсказывает эффективность  $> 90\%$ , и доли событий, которые прошли всю процедуру восстановления данных для установки Tunka-Rex. Результаты этого сравнения приведены на Рис. 3.6. С использованием модели и данных о временных интервалах работы детектора была рассчитана эффективная апертура и экспозиция Tunka-Rex для измерений 2012-2017 (Рис. 3.7).

Модель была использована для восстановления средней глубины максимума ШАЛ в зависимости от энергии, подробно описанного в главе 5. Для этой задачи в модель была введена зависимость расчетного размера отпечатка ШАЛ от расстояния до максимума ШАЛ. Критерии достаточной эффективности регистрации события были определены следующим образом:

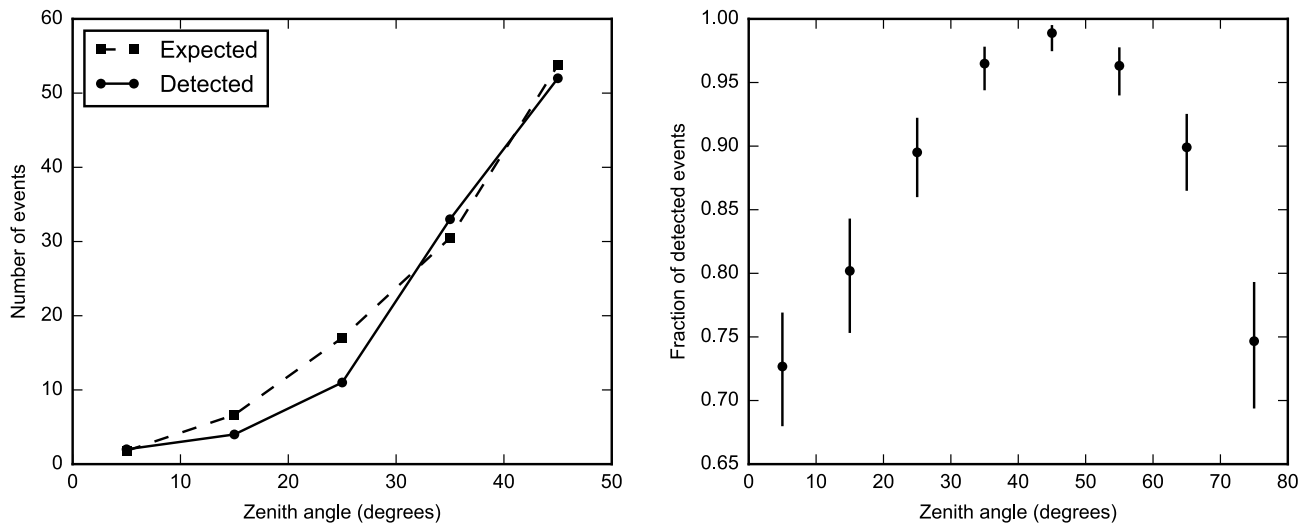


Рисунок 3.6 — Сравнение количества событий с вероятностью регистрации более 90% по результатам работы модели, с количеством событий, успешно прошедших процедуру восстановления Tunka-Rex. Слева: сравнение для измерений 2012-2014 годов, справа: доля восстановленных событий по модельным данным CoREAS для конфигурации детектора с 2 антеннами на кластер.

- Эффективность  $> 90\%$ ;
- Радиус отпечатка (малая полуось эллипса)  $> 300$  метров;
- Не менее 4 кластеров установки внутри отпечатка;
- Расстояние от оси ШАЛ до центра установки  $< 450$  метров.

После внесенных изменений модель была использована для расчета эффективности регистрации событий 2012-2017. Средняя эффективность (точность) модели по результатам сравнения с событиями установки Тунка-133 за все выбранное время измерений составила 94%. Сравнение доли событий с достаточной для восстановления эффективностью регистрации с долей событий, прошедших процедуру восстановления, приведено в таблице 3.1.

Хорошее согласие количества событий, доступных для эффективной регистрации согласно модели, и реально зарегистрированных событий указывает на достоверность модели и возможность ее применения для коррекции зарегистрированного потока КЛ с целью дальнейшего восстановления энергетического спектра. Исходный код модели опубликован в открытом доступе [117].

Таблица 3.1 — Сравнение между ожидаемым согласно модели эффективности, и реально зарегистрированным и успешно прошедшим процедуру восстановления количеством событий на Tunka-Rex, для периода измерений 2012-2017 годов.

Поколение	Год	Кол-во антенн	Ожидаемо событий	Зарегистрировано событий	Доля зарегистрированных событий
1a	2012/13	18	23	20	$0.85^{+0.05}_{-0.09}$
1b	2013/14	25	28	27	$0.96^{+0.02}_{-0.05}$
2	2015/16	44	14	14	$1.00^{+0.00}_{-0.07}$
3	2016/17	63	17	16	$0.94^{+0.04}_{-0.08}$
		Всего	82	77	$0.94^{+0.02}_{-0.03}$

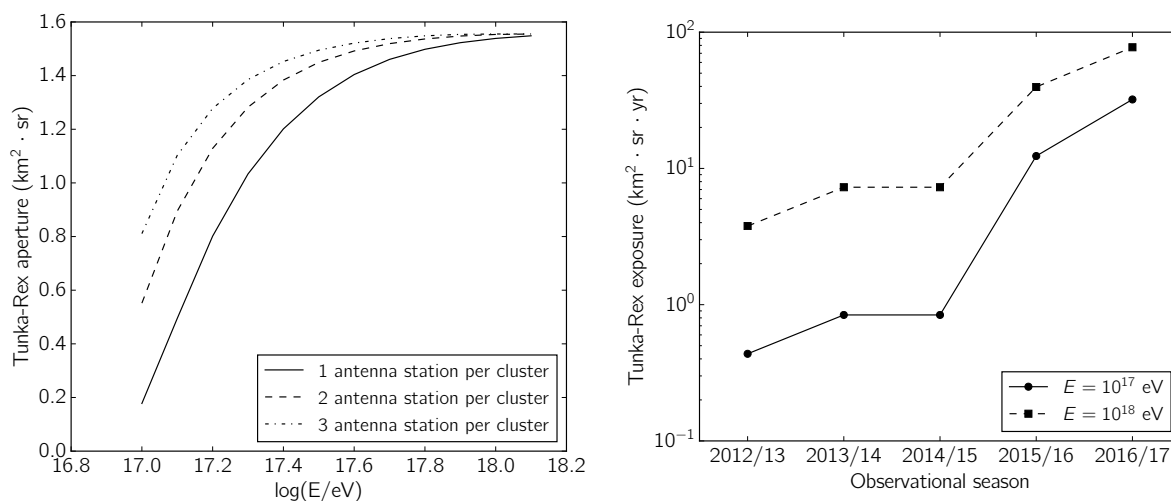


Рисунок 3.7 — Слева: расчетная апертура Tunka-Rex для диапазона зенитных углов  $0^\circ - 60^\circ$  в условиях отсутствия аппаратных неполадок. Справа: общая экспозиция в зависимости от времени для измерений 2012-2017 для разных пороговых энергий.

## Глава 4. Подавление шумов с помощью автоэнкодера

Традиционная сложность регистрации ШАЛ с использованием радиометода связана с сильной чувствительностью метода к шумовой обстановке. Амплитуда сигналов ШАЛ с энергиями ниже  $10^{17}$  эВ (в месте расположения Tunka-Rex) уже, как правило, сравнима с уровнем фонового шума, что не позволяет восстанавливать точные параметры регистрируемого сигнала путем прямого анализа ФПР без дополнительной обработки. В то же время, работа по триггеру установки Тунка-133 позволяет записывать события вплоть до энергий  $10^{15}$  эВ. Для защиты от внутренних помех, наводящихся на сигнальную цепь в системе сбора данных (напр. от системы обогрева и сопутствующего оборудования) сигнальная цепь Tunka-Rex экранирована. Однако остаются внешние помехи, в борьбе с которыми экранирование бессильно - такие, как антропогенные и техногенные помехи, грозы, шумы ионосферы, шум Солнца, синхротронное излучение Галактики и пр. (см. Рис.4.1).

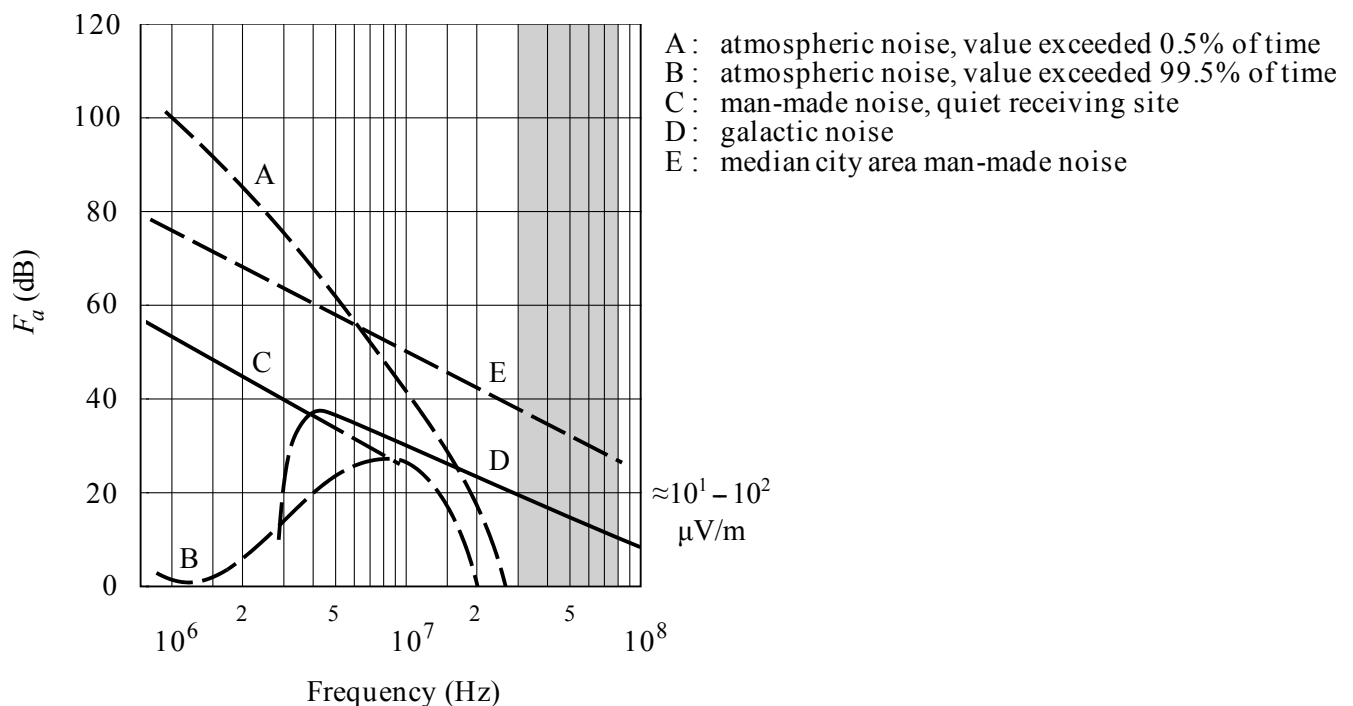


Рисунок 4.1 — Приближенные спектры внешних шумов от различных источников в радиодиапазоне. Серым выделена полоса наблюдений Tunka-Rex.

Для подавления шума, приближенного к белому, эффективны аналитические методы (согласованная и вейвлет-фильтрация, корреляционные методы) [118]. Однако в случае шума, не являющегося белым и обладающего ха-

раактерными особенностями (например, временная вариативность, специфичные спектральные характеристики), эффективность аналитических методов снижается.

Шум, сопутствующий радиоизмерениям, не является белым (см. Рис. 4.2), что ставит вопрос о поиске эффективного инструмента для его подавления. Одним из мощных инструментов для решения класса задач, связанных с выделением сигнала на фоне такого шума, являются сверточные нейросети архитектуры “автоэнкодер” [119]. Рассмотрим эту архитектуру подробнее.

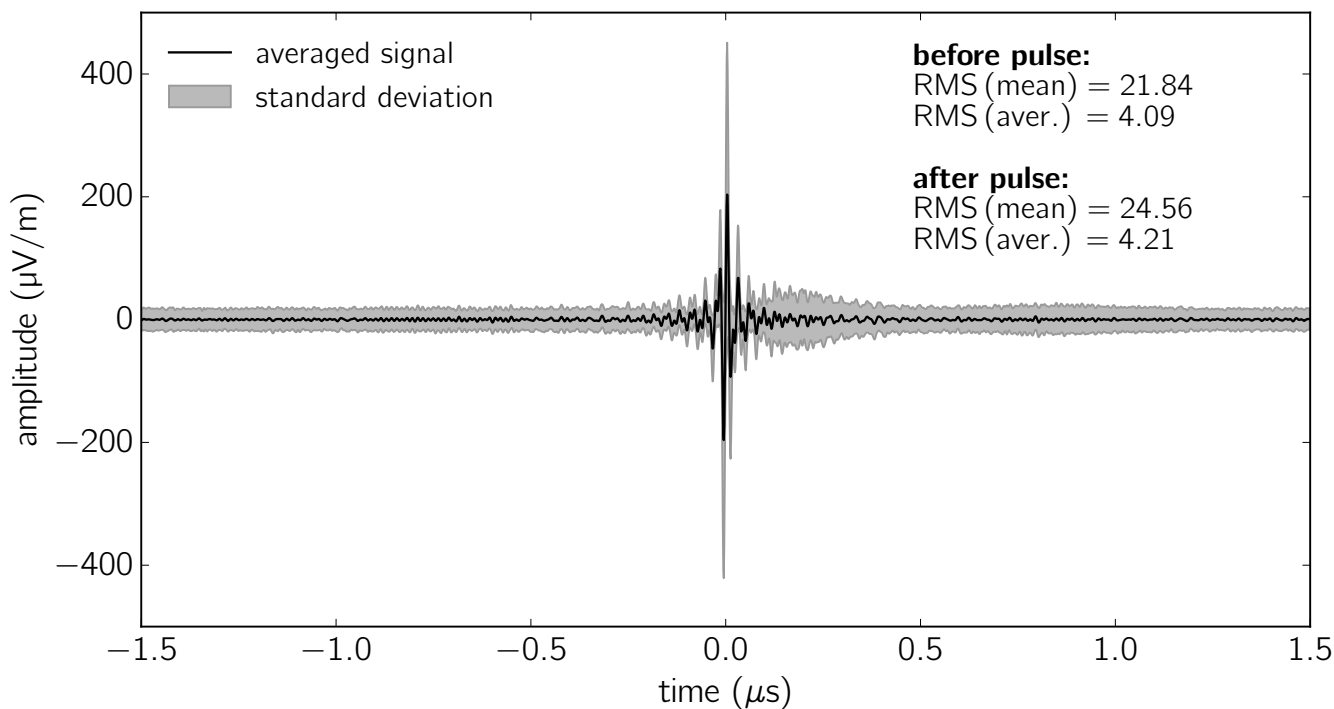


Рисунок 4.2 — Результат усреднения 400 сигнальных дорожек Tunka-Rex. Черный - усредненная дорожка, серый - стандартное отклонение. Ожидаемое снижения амплитуды шума в случае белого шума - 20 раз. Наблюдаемое снижение амплитуды в 5 раз позволяет уверенно сказать, что шум не является белым и обладает характерными особенностями.

Автоэнкодер – класс нейронных сетей, осуществляющих последовательное кодирование и декодирование входных данных. Структурно сеть состоит из двух частей: энкодер (кодирует входной сигнал в пространство меньшей размерности с целью выделения признаков) и декодер (восстанавливает сигнал из кодированного представления)(см. Рис.4.3).

Количество нейронов на каждом слое энкодера последовательно уменьшается и достигает минимума на стыке энкодера и декодера. Это положение соответствует максимально абстрактному представлению данных (внутреннее пред-

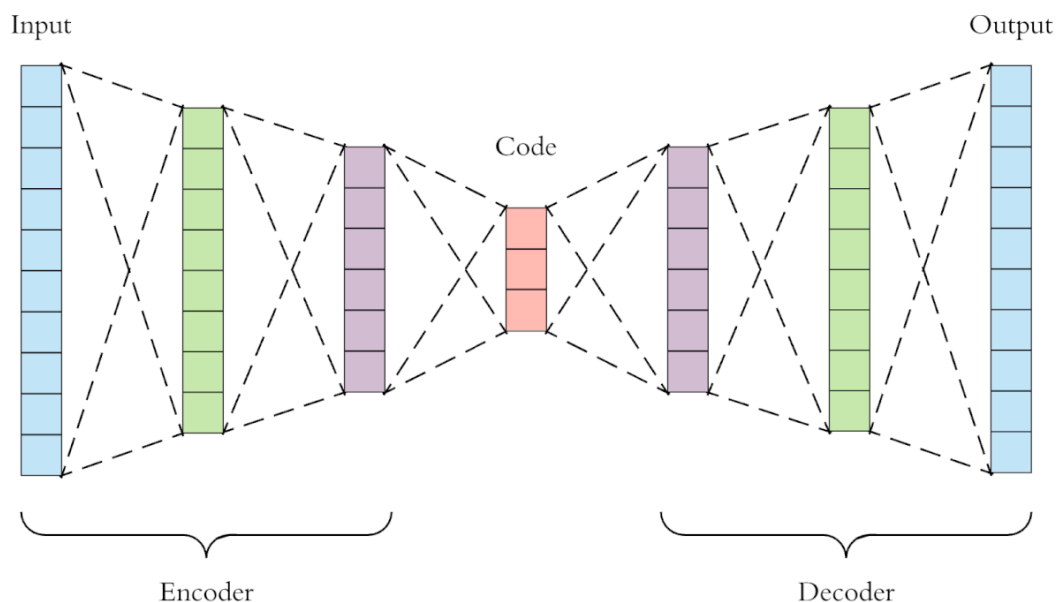


Рисунок 4.3 — Структурная схема нейросети архитектуры ”автоэнкодер”

ставление). После кодирования данных начинается процесс декодирования с последовательным увеличением размерности слоя вплоть до идентичной входной размерности. На этом этапе декодер стремится восстановить из внутреннего представления данные, максимально близкие к исходным. Однако, в силу того, что размерность внутреннего представления меньше, чем размерности входа и выхода, часть данных неизбежно теряется.

Путем использования метода “обучение с учителем” (supervised learning) [120] возможно настроить нейросеть на исключение определенных данных, в нашем случае - шумовых. Метод заключается в следующем: на вход сети подаются импульсы с наложенным шумом, а выходные данные сравниваются с теми же импульсами, но без наложенного шума, и нейросеть настраивается таким образом, чтоб восстановленный сигнал был максимально похож на чистый импульс.

В настоящей главе приведено описание процесса настройки, обучения и тестирования автоэнкодера на модельных и реальных данных Tunka-Rex в рамках задачи выделения импульса ШАЛ на фоне шума и последующего восстановления энергии ШАЛ. Также описана методика восстановления энергии подпороговых событий, недоступных для восстановления стандартным методом, с использованием данных, обработанных автоэнкодером. Приведены основные результаты и перспективы данного подхода.

#### 4.1 Выбор оптимальной конфигурации и процесс обучения

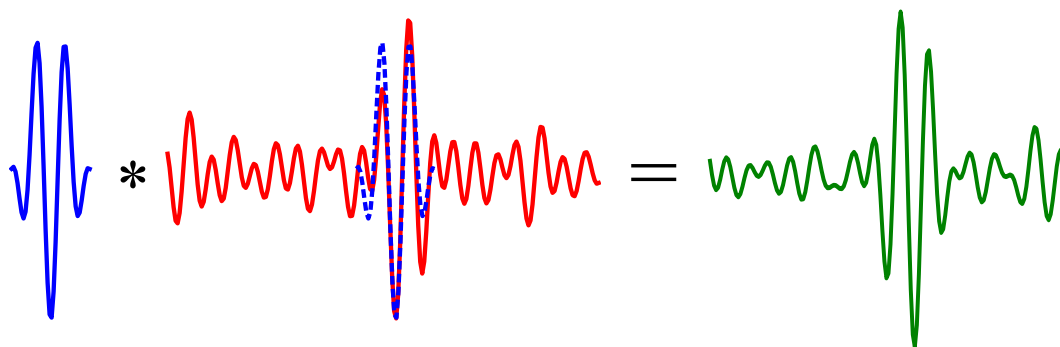


Рисунок 4.4 — Схема формирования обучающей выборки. Синий - чистый сигнал (моделирование CoREAS), красный - шум (по данным измерений на установке Tunka-Rex), зелёный - сигнал, наложенный на шум для последующего обучения нейросети.

Обучение нейросети и разработка методики интерпретации результатов проведены в ходе совместной работы автора, Костюнина Д.Г. и Шипилова Д.А. Для обучения использовались библиотеки Tensorflow и Keras. Выборка данных для обучения и тестирования автоэнкодера сформирована с помощью программного обеспечения CoREAS и состоит из 25 тысяч модельных пар из симуляций сигнала (дорожек) и наложенного на него шума (измеренного на установке Tunka-Rex) (см. Рис. 4.4). Симуляции выполнены с учетом геометрии и калиброванного отклика установки Tunka-Rex. Для всех входных дорожек проведено программное увеличение частоты дискретизации в 16 раз, таким образом, 1 отсчет эквивалентен 0.3125 наносекунды, а полная длина дорожки составляет 16384 отсчета АЦП.

Автоэнкодер принимает на вход последовательность из 4096 отчетов АЦП (соответствует временному интервалу в 1280 нс), соответствующую центральной части временной дорожки в четверть ее длины, выбранной таким образом, что сигнал ШАЛ расположен в центре дорожки с возможным отклонением  $\pm 100$  наносекунд.

Автоэнкодер состоит из слоев следующих типов:

- Сверточный: осуществляет свертку входных данных с набором фильтров. В данном контексте каждый фильтр представляет собой оконную функцию, соответствующую какому-либо признаку, выделяемому во вход-

ных данных (например, узкий пик или характерная волновая форма). Т.к. свертка осуществляется параллельно для каждого фильтра, размерность выходных данных умножается на количество фильтров.

- MaxPooling (Выделение максимального значения): осуществляет уменьшение размерности входных данных путем выделения максимального значения в окне заданного размера, и записью на выходе этого значения.
- UpSampling (Повышение разрешения): осуществляет увеличение размерности входных данных путем копирования последовательностей значений из выбранного окна и последовательного добавления заданного числа копий последовательностей в следующий слой.

В ходе выбора оптимальной конфигурации мы определили глубину  $D$  (количество сверточных слоев энкодера) и число фильтров  $N$  на первом слое декодера как свободные параметры.  $i$ -й слой энкодера ( $i = 1, \dots, D$ ) описывается следующим образом:

$$S_i = S_{\min} \times 2^{D-i}, \quad n_i = 2^{i+N-1}, \quad (4.1)$$

где  $S_i$  - размер  $i$ -го фильтра,  $n_i$  - число фильтров на слой.  $S_{\min} = 16$  - минимальный размер фильтра, соответствующий 5 наносекундам.

Для предварительной оценки качества работы нейросети мы выбрали две метрики: эффективность:  $N_{\text{rec.}}/N_{\text{tot.}}$  - долю импульсов, превысивших заданный порог после обработки, и точность:  $N_{\text{hit}}/N_{\text{rec.}}$  - долю импульсов с отклонением восстановленной временной отметки от истинной  $|t_{\text{rec.}} - t_{\text{true}}| < 5$  нс.

Для получения обученной модели разработано ПО, на вход которого подается пара массивов, содержащих чистые сигналы ШАЛ и сигналы с наложенным шумом. Входными параметрами программы являются массив с зашумленными дорожками и используемая модель. Для использования нейросети в процессе восстановления разработано ПО, которое позволяет автоматически получать данные для очистки из программного пакета Auger Offline и передавать их обратно. В ходе предварительной оценки эффективности были протестированы архитектуры с 3, 4 и 5 сверточными слоями в кодирующей части нейросети, а также с различным количеством фильтров (см. Рис. 4.5).

В качестве рабочей модели, характеризующейся максимальной эффективностью, выбрана асимметричная конфигурация с 3 сверточными слоями в кодирующей части и 2 в декодирующей. Подробное описание итоговой архитектуры, выбранной для дальнейшей работы, приведено в таблице 4.1.

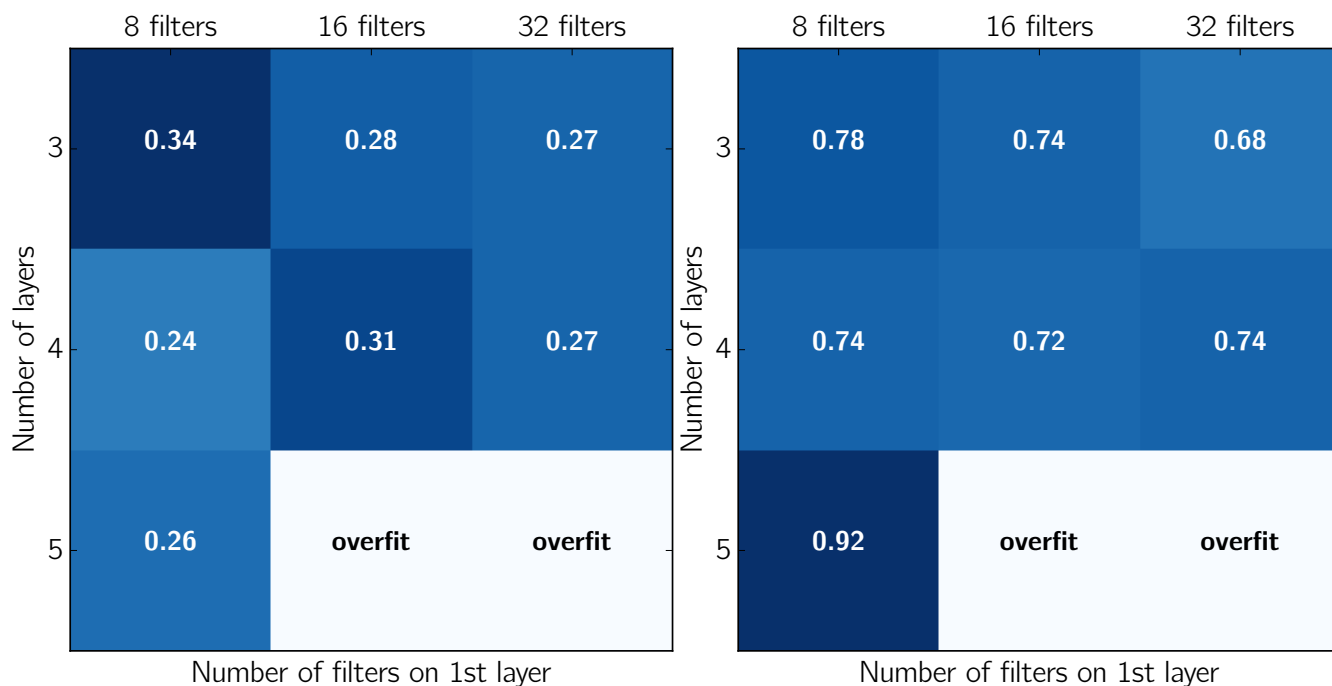


Рисунок 4.5 — Результаты предварительного тестирования конфигураций автоэнкодера с различным числом слоев (энкодер) и различным числом фильтров на слой (первый слой декодера). Слева: эффективность, (доля восстановленных событий). Справа: точность (доля событий с низким отклонением восстановленной временной отметки от истинной). Значение ”overfit” обозначает переобученную конфигурацию, настроившуюся на обучающую выборку и вследствие недостаточного количества обучающего материала неспособную адекватно обрабатывать какие-либо другие данные.

В качестве функции активации (функции, определяющей соотношение между входными и выходными данными сверточного слоя) используется ReLU (rectified linear unit, линейный выпрямитель):

$$ReLU(x) = \max(0, x). \quad (4.2)$$

Примеры корректного и некорректного срабатывания автоэнкодера на модельных данных приведены на Рис. 4.6.

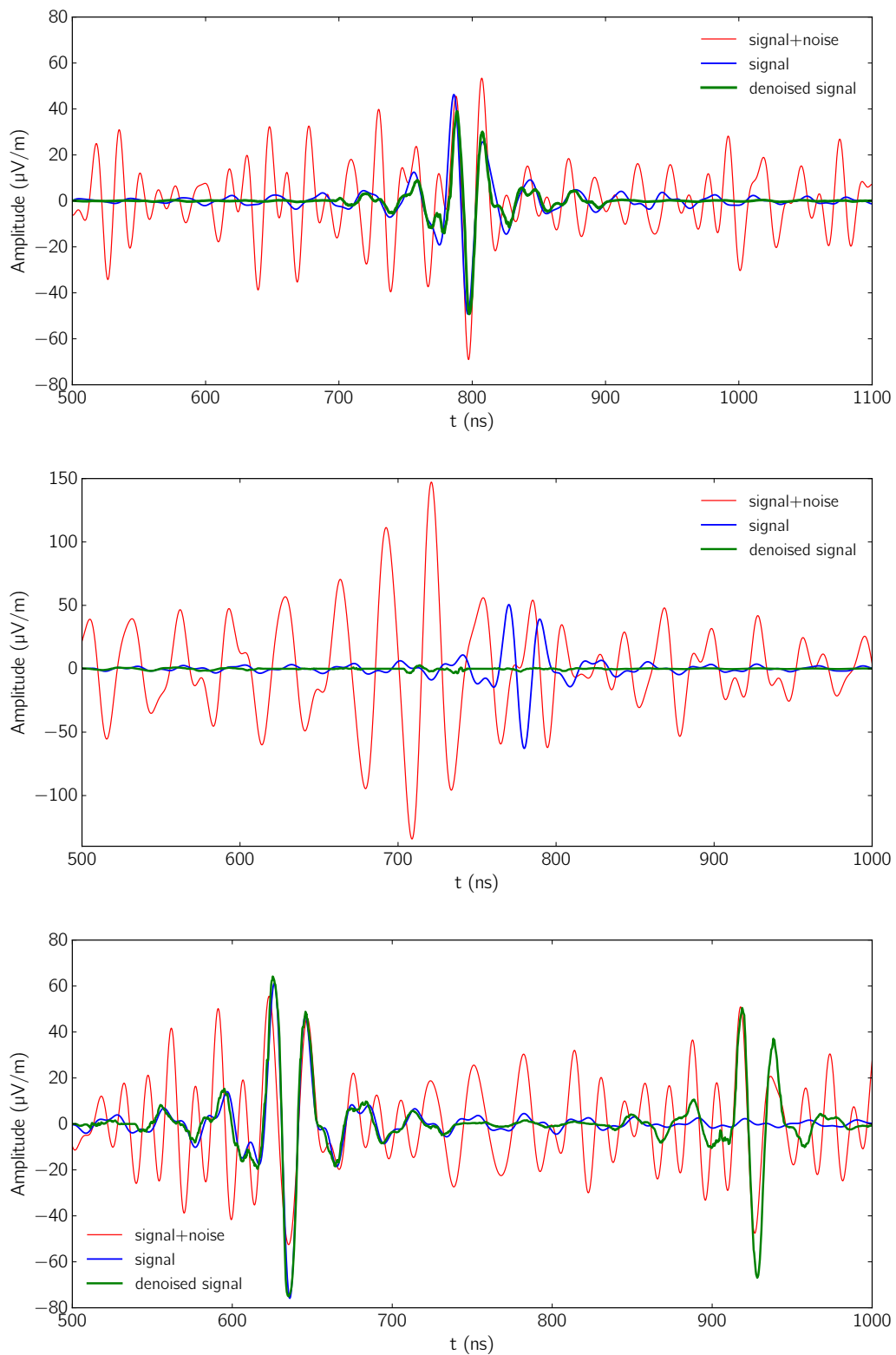


Рисунок 4.6 — Примеры выделения сигнала на фоне шума на тестовой выборке данных (модельный сигнал + реальный шум). Сверху вниз: корректное срабатывание, ложноотрицательное срабатывание, корректное + ложноположительное срабатывание.

Таблица 4.1 — Послойный листинг автоэнкодера.

Слой	Тип	Выходная размерность слоя	Кол-во фильтров	Размерность фильтра/пула	Выделяемых признаков
0	Входной	4096 * 1	-	-	-
1	Сверточный	4096 * 64	64	32	2112
2	MaxPooling	2048 * 64	-	2	-
3	Сверточный	2048 * 128	128	16	131200
4	MaxPooling	1024 * 128	-	2	-
5	Сверточный	1024 * 16	16	128	262160
6	UpSampling	2048 * 16	-	2	-
7	Сверточный	2048 * 8	8	256	32776
8	UpSampling	4096 * 8	-	2	-
9	Сверточный	4096 * 1	1	8	65

## 4.2 Восстановление низкоамплитудных импульсов

Предварительная проверка автоэнкодера на моделированных (рис. 4.6) и реальных (рис. 4.7) данных показала возможность его применения для выделения сигнала ШАЛ при высоком уровне шума. Автоэнкодер успешно удаляет шумовую составляющую, в том числе в случаях, когда ее амплитуда превышает амплитуду сигнала ШАЛ.

Однако, для обработки автоэнкодером требуется нормировать входные данные в единый диапазон по амплитуде. Таким образом, мы теряем информацию об абсолютной амплитуде сигнальной дорожки. На текущем этапе возможно восстановление только временной отметки и относительной амплитуды.

Для восстановления абсолютной амплитуды низкоамплитудных импульсов от событий с низкими энергиями предлагается подход, основанный на когерентном сложении сигналов с отдельных антенных станций, сдвинутых согласно временным отметкам импульсов, восстановленных автоэнкодером. Подход был испытан в следующем порядке:

1. Создана выборка низкоэнергетичных событий, записанных по триггеру установки Тунка-133 с энергиями от  $10^{16}$  до  $10^{17}$  эВ (по результатам вос-

становления установки Тунка-133). В силу малой амплитуды импульсов построение ФПР и восстановление параметров ШАЛ при таких энергиях стандартным методом невозможно.

2. Проведена обработка сигнальных дорожек автоэнкодером. По восстановленным временным отметкам сигналов ШАЛ проведено восстановление фронта (в приближении плоского фронта) и оси ШАЛ.
3. Результаты восстановления геометрии ШАЛ сравнены с результатами восстановления по данным установки Тунка-133. Из общего набора событий создана подвыборка, удовлетворяющая критерию расхождения углов прихода, восстановленных по данным установки Тунка-133 и по данным, обработанным автоэнкодером менее, чем на  $5^\circ$ . Также введено дополнительное ограничение на геомагнитный угол:  $\alpha > 60^\circ$ , необходимый для отсеивания импульсов с наименьшими амплитудами.
4. Для событий, прошедших в подвыборку, проведен сдвиг сигнальных дорожек относительно друг друга в соответствии с разницей временных отметок сигналов, восстановленных автоэнкодером. Далее дорожки просуммированы в пределах одной поляризации с нормировкой амплитуды на число станций и усреднением расстояния до оси ливня.

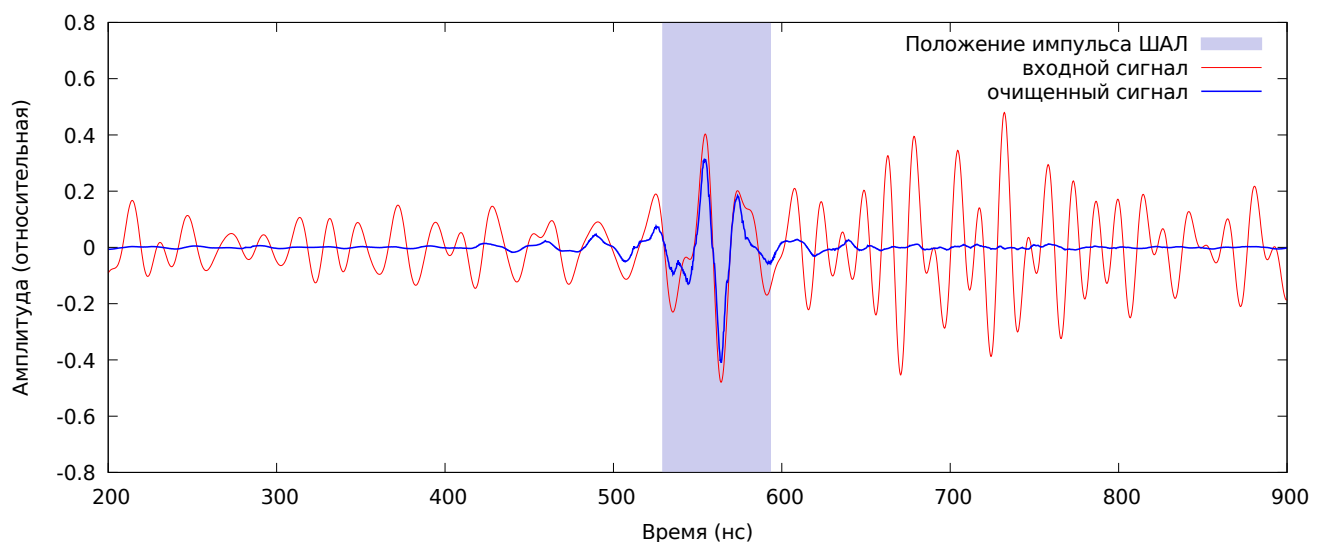


Рисунок 4.7 — Результат обработки реальной сигнальной дорожки автоэнкодером. Как можно видеть, высокоамплитудная помеха сразу за импульсом успешно удалена.

Результатом обработки события по описанной процедуре является когерентная сумма сигнальных дорожек, сдвинутых в соответствии с восстановлен-

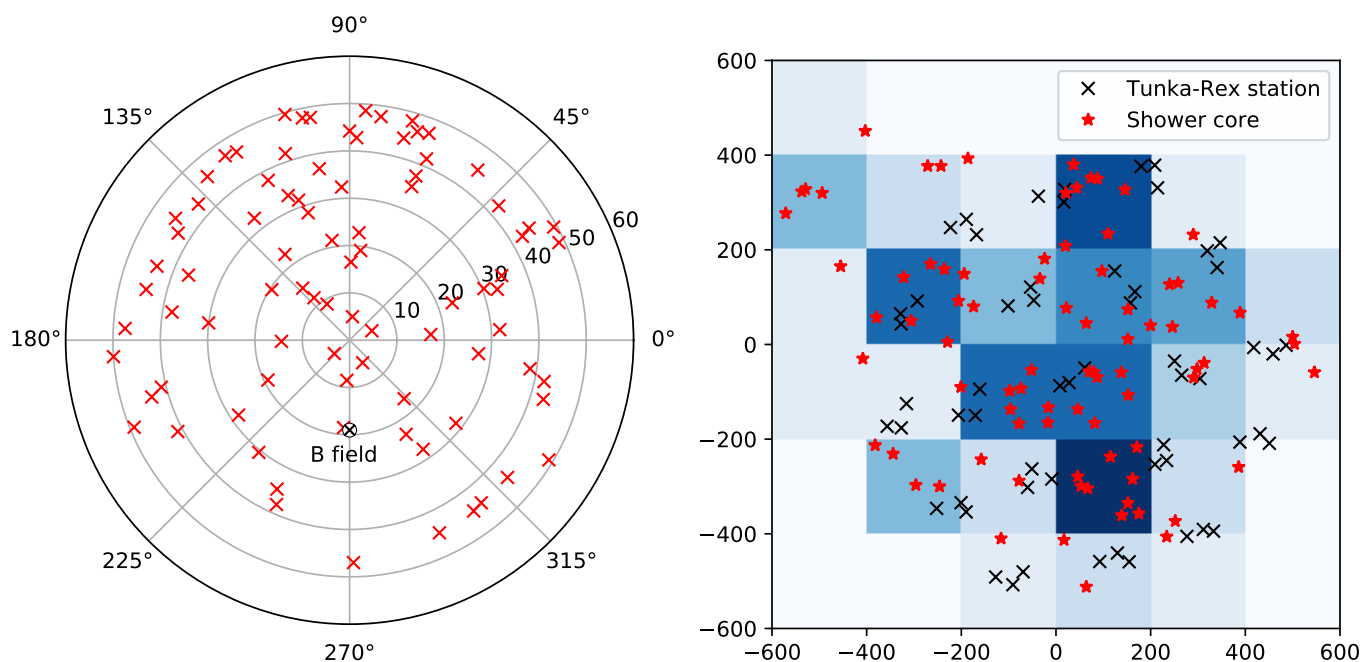


Рисунок 4.8 — Слева: распределение углов прихода событий

низкоэнергетичных событий, выбранных для тестирования подпорогового восстановления. Справа: распределение этих событий по поверхности детектора.

ными автоэнкодером временными отметками (см. Рис. 4.9). Полученная сумма соответствует сигналу, зарегистрированному на расстоянии  $r$  от оси ливня, где  $r$  - усреднение расстояний между осью и вошедшими в событие станциями.

С использованием полученной амплитуды мы можем экстраполировать ФПР:

$$S_0 = \frac{S}{\exp[\eta_0(r - r_0)]}, \quad (4.3)$$

где  $S_0$  - амплитуда на расстоянии  $r_0$  от оси ливня,  $\eta_0 = -227.793 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$  - показатель наклона ФПР на низких энергиях, полученный эмпирическим путем [121]. Таким образом мы рассчитываем амплитуду  $S_{180}$  (180 метров до оси), характеризующуюся наилучшей корреляцией с энергией ливня на этих энергиях. После этого мы восстанавливаем энергию, используя метод одиночной антенны [122]:

$$E = S_{180} \cdot \kappa, \quad (4.4)$$

где поправочный коэффициент  $\kappa = 868 \cdot 10^{-6} \text{ ЭэВ} \cdot \text{м/В}$ .

Таким образом мы провели обработку выборки низкоэнергетичных событий. В выборку вошли события, записанные по триггеру установки Тунка-133 ( $\approx 100$  событий). 83 события превысили амплитудный порог, составляющий 0.2 от нормированной амплитуды максимума обработанной дорожки, и прошли провер-

ку по направлениям прихода (разница с результатами восстановления установки Тунка-133 меньше 5 градусов). 13 из них прошли выборку по геомагнитному углу  $\alpha < 60^\circ$  и по отношению сигнал/шум  $> 10$ . На Рис. 4.10 показаны результаты восстановления энергии ШАЛ по обработанным автоэнкодером данным. Стандартное отклонение энергии, восстановленной с использованием описанной методики, от энергии, восстановленной по данным установки Тунка-133, составило 26%.

Результаты показали, что данный подход применим для восстановления временных отметок низкоэнергетичных событий и может быть использован в задачах снижения энергетического порога радиодетектора. Кроме того, для высокоэнергетичных событий использование такого подхода для антенн, зарегистрировавших сигнал с низкой амплитудой (расположенных вдали от оси ливня) может позволить увеличить количество точек на ФПР и, соответственно, увеличить точность восстановления энергии и глубины максимума ШАЛ.

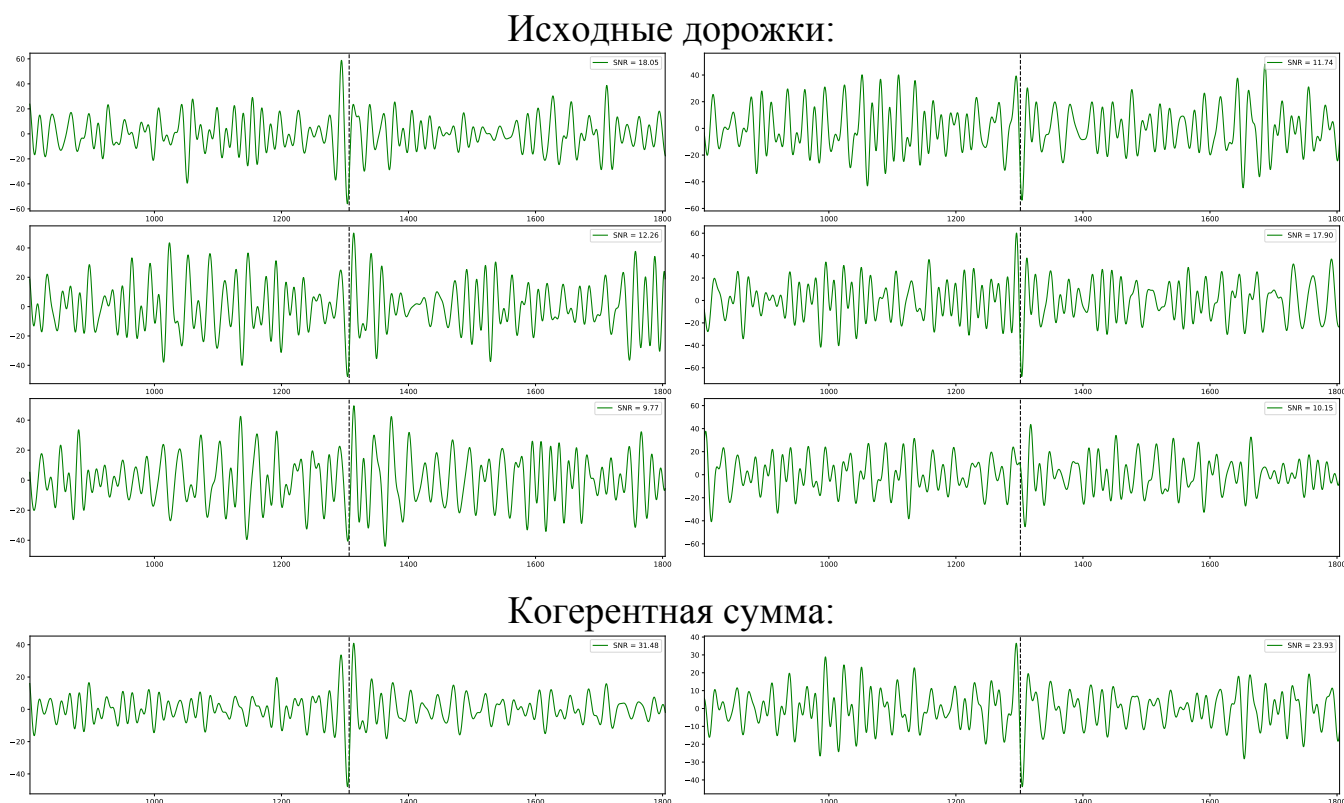


Рисунок 4.9 — Пример увеличения отношения сигнал-шум при использовании метода когерентной суммы для двух событий с энергиями около 30 ПэВ (каждый столбец - отдельное событие). Верхние 6 графиков: сигнальные дорожки с отдельных станций (столбец = станция). Нижние два: когерентная сумма.

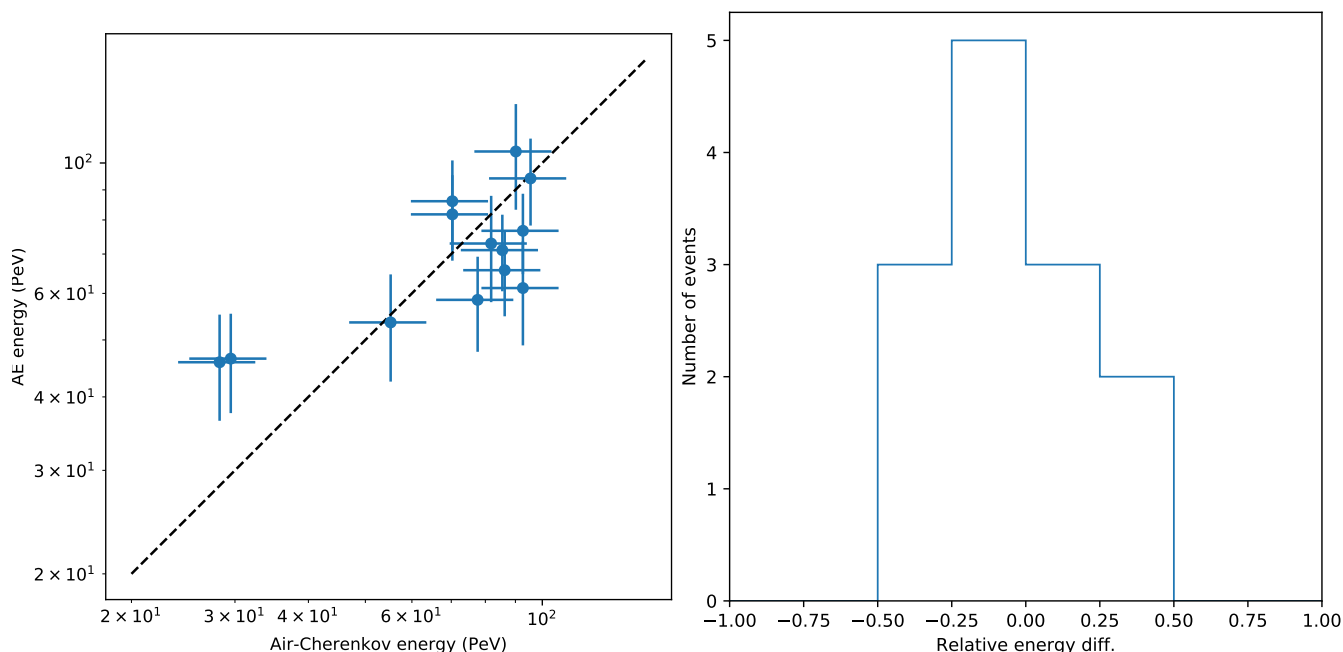


Рисунок 4.10 — Сравнение энергии подпороговых событий, восстановленной с использованием автоэнкодера, и энергии, восстановленной по данным Тунки-133. Слева: прямое сравнение, справа: гистограмма отклонений.

Методика выделения импульсов КЛ на фоне шума с использованием автоэнкодера показала свою работоспособность на моделированных и реальных данных. Кроме того, тесты на низкоамплитудных импульсах показали применимость данной методики к задаче восстановления временных отметок событий с энергиями, недоступными для обработки стандартным методом, что в перспективе может быть использовано для снижения порога регистрации по энергии.

В случае использования высокопроизводительного оборудования для обработки данных в реальном времени данная методика также может быть применима для реализации независимого триггера для установок, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ. В настоящее время уже существуют инструменты для имплементации обученных моделей нейросетей на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), в том числе в задачах физики высоких энергий [123].

## Глава 5. Восстановление глубины максимума

Стандартная методика восстановления глубины максимума, использовавшаяся на первом этапе обработки данных Tunka-Rex, основана на анализе амплитуды радиосигнала ШАЛ без учета формы импульса [113]. Как уже описано в разделе 2.2.4, в этой методике глубина максимума определяется как результат параметризации наклона функции пространственного распределения амплитуды импульса ШАЛ на расстоянии 180 метров от оси ШАЛ.

В настоящей главе описывается выносимая на защиту и разработанная коллаборацией Tunka-Rex при непосредственном участии автора методика восстановления глубины максимума ШАЛ, учитывающая форму импульса ШАЛ, эффекты, вносимые динамикой атмосферной рефракции, и эффективность регистрации ШАЛ в условиях установки Tunka-Rex.

### 5.1 Восстановление импульса ШАЛ

Огибающая сигнала  $s(t)$  определяется как абсолютное значение аналитического сигнала  $u(t) = s(t) + i\mathcal{H}[s(t)]$ , где  $\mathcal{H}$  обозначает преобразование Гильберта. Так как антенная станция установки Tunka-Rex регистрирует две поляризации сигнала ШАЛ, итоговая огибающая рассчитывается следующим образом:

$$u(t) = \sqrt{u_{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}^2(t) + u_{\mathbf{v} \times \mathbf{v} \times \mathbf{B}}^2(t)}, \quad (5.1)$$

где  $u_{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}^2(t)$  и  $u_{\mathbf{v} \times \mathbf{v} \times \mathbf{B}}^2(t)$  – компоненты электромагнитного поля, зарегистрированные в плоскости ШАЛ [113]. Вклад третьей компоненты, перпендикулярной к ним, составляет не более 2% [124], поэтому она не учитывается в дальнейшем анализе. В сравнении с предыдущим подходом к обработке данных установки Tunka-Rex (описание приведено в 2.2.4 и по ссылке [75]) мы оптимизировали оценку отношения сигнал/шум и подход к выделению импульса ШАЛ в сигнальной дорожке. В предыдущем подходе для оценки уровня шума использовалась амплитуда, зарегистрированная в определенной области дорожки, называемой шумовым окном, а амплитуда сигнала - в соответствующем сигнальном окне. Так как мы на-

блюдаем помехи как в сигнальном, так и в шумовом окне, новая методика оценки уровня шума может быть описана следующим образом:

- *Полная длина импульса ШАЛ* определяется как расстояние между двумя минимумами огибающей, ближайшими к пику огибающей, и ограничена 50 наносекундами. Импульсы, длина которых, определенная таким образом, составляет более 50 наносекунд, исключаются из анализа как помехоподобные. Длительность временного окна в 50 наносекунд определена по результатам моделирования, которое показало, что характерная длина импульса ШАЛ в условиях установки Tunka-Rex составляет  $\approx 40\text{--}45$  наносекунд.
- *Плавающее окно*. Недостатком метода фиксированного окна для оценки уровня шума является чувствительность к локальным помехам, попадающим непосредственно в это окно. Для усовершенствования оценки уровня шума мы ввели плавающее окно длиной в 500 наносекунд и определяем общий уровень шума как наименьшее значение, полученное по всей дорожке в пределах плавающего окна и за пределами сигнального окна. Т.к. это значение систематически ниже среднего уровня шума, пороговое отношение сигнал/шум было увеличено с 10 до  $\text{SNR}_{\text{th}} = 16.0$ .
- *Локальное отношение сигнал/шум*. Использование плавающего окна полезно для исключения шумов, удаленных от импульса ШАЛ. Для исключения шумов, которые могут быть расположены вблизи импульса ШАЛ или перекрываться с ним, мы вводим дополнительную оценку уровня шума в области  $\pm 100$  наносекунд вокруг временной отметки импульса ШАЛ как отношение мощности сигнала ШАЛ к среднеквадратичному значению уровня шума в этой области. В этом случае мы вводим консервативное пороговое значение отношения сигнал/шум  $\text{SNR}_{\text{local}} \geq 10.0$
- *Исключение антенных станций, ассоциированных с высоким уровнем шума*. В последние годы в силу расширения установок обсерватории в данных Tunka-Rex наблюдаются широкополосные транзиентные помехи. Антенные станции, на которых наблюдается значительное количество таких помех, исключаются из анализа по результатам мониторинга спектров, усредненных за сеанс наблюдений. Мониторинг проводится в автоматическом режиме в ходе набора данных. При обнаружении по результатам мониторинга станций, характеризующихся высоким уровнем шумов, оператор помечает их для учета в дальнейшей обработке.

## 5.2 Восстановление параметров ШАЛ

Новая методика восстановления параметров ШАЛ включает следующие основные этапы:

1. Предварительное восстановление с использованием стандартного метода, основанного на анализе ФПР с изменениями, описанными выше. На этом этапе мы используем положение оси и угол прихода, восстановленные по данным установки Тунка-133, и энергию, восстановленную по данным установки Тунка-Rex по методике, описанной в [113].
2. Создание библиотеки модельных сигналов (CoREAS) для каждого события, полученного на предыдущем этапе для покрытия всех возможных глубин максимума для этого события. На этом этапе мы используем восстановленную энергию и геометрию установки в качестве входных параметров для моделирования импульсов ШАЛ от четырех типов первичных частиц: ядер водорода (протонов), гелия, азота и железа. Для моделирования применяется CORSIKA v75600 [106] с использованием модели QGSJet-II.04 [108]. Выбор конкретной модели адронных взаимодействий не оказывает существенного влияния на форму модельного импульса, а также качество дальнейшего анализа, как показано по ссылке [125]
3. Минимизация суммы  $\chi^2$ -отклонений между модельными импульсами и зарегистрированным импульсом ШАЛ, по итогам которой проводится восстановление энергии и глубины максимума ШАЛ.

Рассмотрим методику подробнее. Для восстановления амплитуды и мощности сигнала ШАЛ мы используем огибающую электрического поля  $u(t)$ , зарегистрированного на антенной станции. Сигнальные дорожки подготавливаются следующим образом: сначала каждый сигнал ограничивается окном длиной  $t_w < 50$  нс. После этого сигналы соединяются в единую дорожку  $U(t)$  длиной  $N_b = N_a \cdot t_w / t_b$ , где  $N_a$  - число антенных станций,  $t_b$  - длина отдельного сигнала:

$$U(t) = \bigoplus_{i=1}^{N_a} u_i(t') \Pi((t_i - t')/t_w), \quad (5.2)$$

где  $t'$  - номер сигнала в дорожке  $u_i$  на  $i$ -й антенной станции, и  $t_i$  - позиция пика сигнала для этой станции.  $\Pi(x)$  определяет функцию прямоугольного окна,

где  $\Pi(-1/2 < x < 1/2) = 1$ . Ошибки восстановления импульса  $\sigma(t)$  и модельные шаблоны сигнала  $V(t)$  определяются таким же образом.

После соединения дорожек, модельное электрическое поле  $V(t)$  подгоняется под зарегистрированное с использованием свободного параметра  $A$  (фактор нормализации) с использованием критерия  $\chi^2$ :

$$\chi_{\text{red.}}^2 = \sum_{j=1}^{N_b} \left( \frac{U_j - AV_j}{\sigma_j} \right)^2 \cdot \frac{f_{\text{ups.}}}{N_{\text{bins}}} \quad (5.3)$$

где  $U_j$  - амплитуда зарегистрированного электрического поля,  $V_j$  - амплитуда модельного поля,  $\sigma_j$  - стандартное отклонение для заданной временной отметки,  $f_{\text{ups.}}$  - фактор повышения частоты дискретизации,  $N_{\text{bins}}$  - длина сигнальной дорожки. Глубина максимума  $X_{\text{max}}$  определяется как минимум параболы  $\chi_{\text{red.}}^2(X_{\text{max}})$  с доверительным интервалом, определенным стандартной процедурой  $(\min(\chi_{\text{red.}}^2) + 1)$ . Пример отдельной подгонки показан на Рис. 5.1 слева. Распределение  $\chi_{\text{red.}}^2(X_{\text{max}})$  для этого события показано на Рис. 5.1 справа.

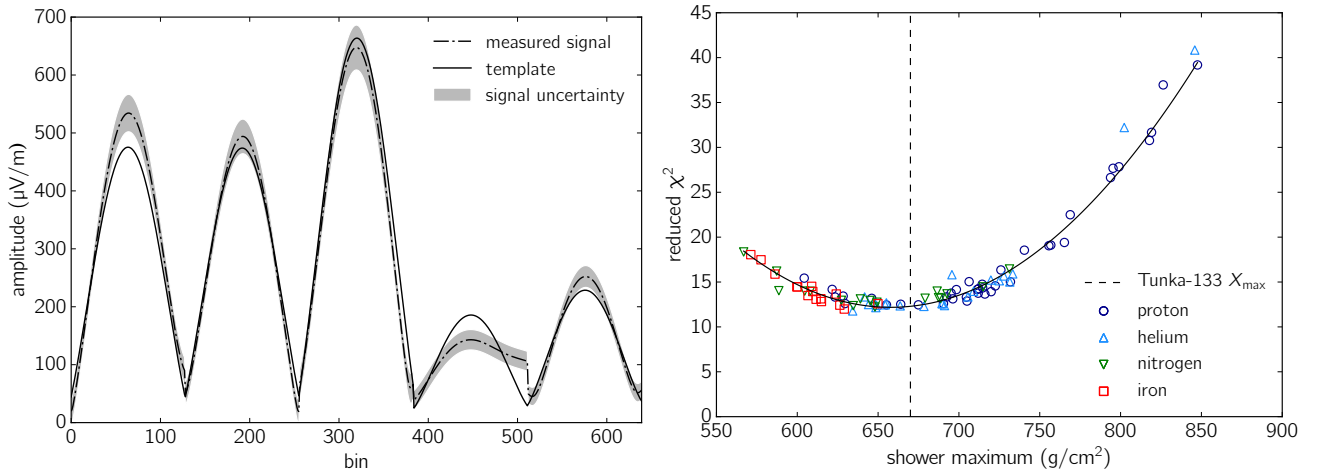


Рисунок 5.1 — Слева: примеры (5 шт.) огибающих зарегистрированных импульсов от одного события с подгонками шаблонами из библиотеки.

Четвертая огибающая показывает пример искаженного сигнала. Справа: Распределение критерия  $\chi^2$  между отдельным импульсом и набором шаблонов из библиотеки. Пунктирная линия показывает максимум ливня по данным установки Тунка-133.

Для восстановления потока первичных КЛ и средней глубины максимума ШАЛ мы учитываем эффективность регистрации ШАЛ. Для этого мы используем модель, описанную в главе 3 и по ссылке [126]. Для оценки эффективности

регистрации ШАЛ в этой модели используются данные об энергии и направлении прихода первичной частицы. Для создания выборки событий для настоящего исследования выбран критерий эффективности, согласно которому в каждый отпечаток ШАЛ должно попасть не менее 4 кластеров Tunka-Rex. Такое определение критерия гарантирует регистрацию ШАЛ с различными глубинами, т.е. снижает вероятность систематического сдвига наблюдаемых глубин максимума в силу пропуска регистрации глубоких протонных ливней, например.

Для того, чтобы событие прошло для дальнейшей обработки, эффективность его регистрации по результатам оценки моделью должна составлять не менее 90%. По предварительным оценкам, такая эффективность соответствует событиям, радиус отпечатков которых составляет не менее 300 метров (по малой полуоси), а удаленность оси ШАЛ от центра установки - не более 450 метров.

### 5.3 Систематические эффекты

Стандартная процедура восстановления параметров ШАЛ включает коррекцию наблюдаемого излучения на профиль рефракции атмосферы. Расчет профиля рефракции проводится согласно статичной модели, заложенной в CORSIKA, US standard atmosphere [127], по высотному профилю атмосферных параметров: плотности, температуры и влажности. Модель настроена на средние показатели атмосферы, характерные для континентальных областей Северного полушария.

В то же время, в реальных условиях профиль параметров атмосферы может сильно отличаться от модельного. Систематические сдвиги, обусловленные возвышением и удаленностью от морского побережья, равно как и флуктуации, вызванные динамикой локальных погодных условий, могут значительно менять профиль рефракции и вносить дополнительную ошибку в точность восстановления  $X_{max}$ .

Для учета этой ошибки мы провели расчет реального профиля рефракции атмосферы для восстановленных событий. Профиль рефракции был восстановлен по открытым данным системы спутникового мониторинга атмосферы Global Data Assimilation System [128]. Т.к. данные системы обладают достаточно хорошим разрешением (градус на градус по поверхности и 3 часа по времени), расчет профилей рефракции был проведен пособытийно. На Рис. 5.2 показана относи-

тельная разница между профилем рефракции по данным GDAS и профилем рефракции, записанным в CORSIKA.

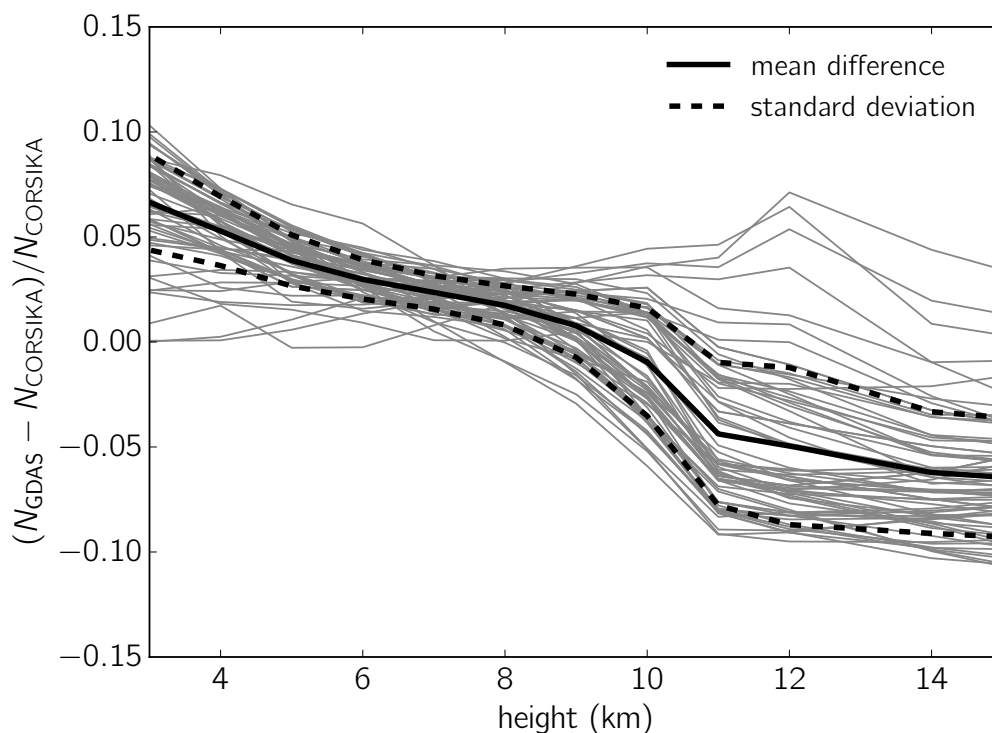


Рисунок 5.2 — Разница между расчетным индексом рефракции по модельным параметрам CORSIKA и по данным GDAS в зависимости от высоты

По результатам данных расчетов были установлены систематический сдвиг восстановленного  $X_{max}$  в 3% и ошибка от события к событию до 5%.

#### 5.4 Оценка точности восстановления

Для оценки точности восстановления по выбранной методике мы проводим сравнение с результатами восстановления по данным установки Тунка-133. Оценочная точность восстановления установки Тунка-133 составляет порядка 10% по энергии и  $25 \text{ г/см}^2$  по глубине максимума ШАЛ; таким образом, мы можем оценить точность восстановления по данным Tunka-Rex путем сравнения этих значений. Для событий, включенных в таблицу 3.1, среднее разрешение по энергии по данным восстановления Tunka-Rex составляет около 10%. Как показано по ссылке [129], чувствительность радиодетектора к глубине максимума ШАЛ возрастает с увеличением размера отпечатка ШАЛ. По данным последних изме-

рений, когда плотность установки Tunka-Rex значительно возросла, мы изучили зависимость точности восстановления глубины максимума ШАЛ от энергии первичной частицы, и установили, что мы достигли точности восстановления, сравнимой с точностью восстановления по данным установки Тунка-133 (равно как и других оптических детекторов) для энергий начиная с  $10^{17.7}$  eV. На этих энергиях отпечаток ШАЛ достигает радиуса порядка 450 м в диапазоне зенитных углов  $< 50^\circ$ .

В таблице 5.1 приводятся оценки точности восстановления  $X_{max}$  по данным установки Tunka-Rex при различных энергиях. На Рис. 5.3 показана средняя глубина максимума в зависимости от энергии, восстановленная с использованием описанного метода, в сравнении с результатами восстановления других экспериментов. В настоящий анализ включены события, зарегистрированные до 2016/2017 года. Использование данной методики позволило увеличить точность восстановления глубины максимума с 38 до 25-35 г/см<sup>2</sup> в сравнении с результатами восстановления по данным установки Тунка-133.

Таблица 5.1 — Величина стандартного отклонения, рассчитанная исходя из разницы между результатами восстановления глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex и результатами восстановления по данным установки Тунка-133.

$E_{pr}$ (eV)	$R_{\text{footprint}}$ (m)	$\langle N_{ant} \rangle / \text{event}$	$\sigma X_{\text{max}}$ (г/см <sup>2</sup> )
$< 10^{17.5}$	$> 240$	5	$\geq 30$
$10^{17.5} - 10^{17.7}$	$> 320$	6	$\approx 30$
$> 10^{17.7}$	$> 430$	7	$\leq 25$

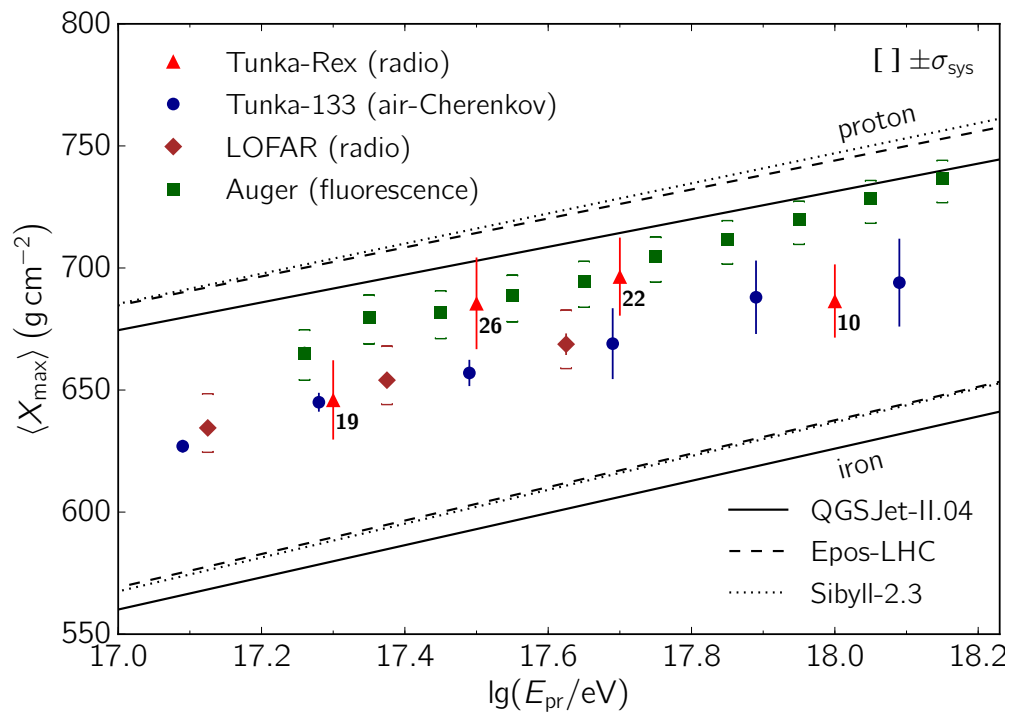


Рисунок 5.3 — Средняя глубина максимума в зависимости от энергии первичной частицы, восстановленная с использованием новой методики по данным Tunka-Rex, в сравнении с результатами других экспериментов. Линиями обозначены предельные значения для протона и железа по данным различных моделей. [130]

## Заключение

Радиометод исследования ШАЛ является сравнительно новым, и эффективность его применения прямо зависит от качества обработки экспериментальных данных. В силу низких отношений сигнал/шум, выраженной зависимости от угла прихода не только по зенитному углу, но и по геомагнитному, процедура обработки должна быть более комплексной, в сравнении с обработкой данных оптических и сцинтилляционных детекторов, для достижения сравнимой точности восстановления.

Настоящая работа посвящена внедрению новых методик в эту процедуру. Разработанная модель эффективности радиодетектора, несмотря на свою простоту, хорошо согласуется с реальным восстановлением Tunka-Rex, а также может быть легко адаптирована для других радиоустановок, регистрирующих ШАЛ. Методика удаления шума из данных детектора с использованием автоэнкодера позволяет восстанавливать временные отметки сигналов с низким отношением сигнал/шум, инициированных событиями с подпороговыми энергиями. Тестовое восстановление энергии с использованием автоэнкодера показало точность восстановления в 26%, что говорит о перспективе использования этой методики для снижения энергетического порога радиодетектора. Новая методика восстановления глубины максимума ШАЛ путем подгонки формы импульса набором шаблонов позволяет повысить точность восстановления на 10-30% в зависимости от энергии первичной частицы.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана модель для расчета эффективности регистрации ШАЛ в зависимости от параметров первичного КЛ. В качестве основных входных параметров модель использует энергию и углы прихода частицы, а также геометрию детектора, которая для Tunka-Rex значительно менялась с годами в связи с расширением установки. Также модель пригодна для использования на антенных решетках других типов. Проверка модели по данным 2012-2017 сезонов измерений показала согласие модели с экспериментальными данными.
2. Разработана и обучена нейросеть архитектуры “автоэнкодер”, эффективно удаляющая шум из сырых данных детектора. Использование нейросети позволяет восстанавливать временные отметки подпороговых собы-

тий с энергиями до  $10^{16}$  эВ по данным установки Tunka-Rex. Предложен метод восстановления ФПР этих событий путем суммирования сигнальных дорожек со сдвигами, соответствующими восстановленным временным отметкам для последующего восстановления энергии первичной частицы. Точность восстановления энергии с использованием такого метода достигает 26%.

3. Предложена новая процедура обработки данных детектора Tunka-Rex путем подгонки огибающей импульса ШАЛ модельными шаблонами сигнала, позволяющая повысить точность восстановления  $X_{max}$ . В совокупности с учетом систематических эффектов, вносимых вариациями параметров атмосферы, использование данной процедуры повышает точность восстановления по  $X_{max}$  с 38 до 25-35 г/см<sup>2</sup> (в зависимости от энергии первичной частицы).

Разработанные методики применены для обработки экспериментальных данных установки Tunka-Rex. В результате применения методик восстановлен массовый состав КЛ в диапазоне  $10^{17}$ – $10^{18}$  эВ. Точность полученных результатов превышает точность, достижимую при использовании метода восстановления глубины максимума ШАЛ, ранее применявшегося на установке Tunka-Rex. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными в других экспериментах и другими методами.

В заключение я хочу выразить благодарность людям, благодаря которым эта работа стала возможной: своему наставнику Костюнину Д.Г. за организацию этой работы, поддержку, веру в успех и критический взгляд; научному руководителю Будневу Н.М. за помощь в подготовке данного документа и обсуждение результатов; коллегам из группы Tunka-Rex - Федорову О.Л. за опыт совместного строительства, кодинга, исследования и превозмогания, Казариной Ю.А. за мотивацию, которой порой так не хватает, Шипилову Д.А. за логику, прагматичность и работу по автоэнкодеру, Черных Д.О. за доброту и хорошее настроение, Ленок В.В. за мудрые советы; старшим товарищам Ф.Г.Шрёдеру, А. Хонгсу и Г.И.Рубцову за поддержку в начинаниях; друзьям Обухову И.Е., Оруну Д.Ю. и участникам музыкальных коллективов “Semolina”, “Буйнаголова” и “Человечий Фарш” за душевность, рок-н-ролл и подзарядку внутренних батарей; жене Марии за поддержку, понимание, терпимость к ночным марафонам по данной работе и кофий в полчетвертого утра. Также благодарю коллективы НИИПФ ИГУ, IAP KIT, ИЯИ РАН и всех, кто был со мной на этом этапе жизненного пути.

## Список сокращений и условных обозначений

$\alpha$	геомагнитный угол (угол между осью ливня и вектором геомагнитного поля)
$\theta$	зенитный угол
$\varphi$	азимутальный угол
<b>АЦП</b>	Аналого-цифровой преобразователь
<b>ВЧ</b>	Высокие частоты
<b>КЛ</b>	Космические лучи
<b>ТАЦКП</b>	Тункинский Астрофизический Центр Коллективного Пользования. См. Тункинский Полигон.
<b>ПЛИС</b>	Программируемая логическая интегральная схема.
<b>ПО</b>	Программное обеспечение.
<b>УНУ</b>	Уникальная научная установка.
<b>ФПР</b>	Функция пространственного распределения.
<b>ФЭУ</b>	Фотоэлектронный умножитель.
<b>ШАЛ</b>	Широкий атмосферный ливень.
<b>CoREAS</b>	CORSIKA-based Radio Emission from Air Showers
<b>CORSIKA</b>	Cosmic Ray Simulations for KASCADE
<b>HiSCORE</b>	Hundred Square-km Cosmic Origin Explorer
<b>IACT</b>	Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope
<b>KASCADE</b>	Karlsruhe Shower Core and Array detector
<b>SALLA</b>	Short Aperiodic Loaded Loop Antenna
<b>TAIGA</b>	Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy. См. ТАЦКП.
<b>Tunka-Rex</b>	Tunka Radio Extension
<b>LNA</b>	Low Noise Amplifier

## Словарь терминов

**Глубина максимума ливня ( $X_{max}$ )** - Область и этап развития широкого атмосферного ливня, характеризующийся наибольшим количеством частиц и амплитудной электромагнитного излучения.

**Кат, cut** - Обрезание заданной выборки по заданному критерию с созданием подвыборки.

**Отпечаток ливня** - Геометрическая область на поверхности детектора, внутри которой импульс соответствующего ливня имеет амплитуду, достаточную для его эффективной регистрации.

**Предел ГЗК** - Предел энергии заряженной астрофизической частицы при длительном пролете в космосе, обусловленный ее торможением вследствие взаимодействием с реликтовым излучением.

**Тункинский полигон** - комплекс астрофизических установок, расположенный в урочище Зугулун, Бурятия. См. TAIGA.

**MaxPooling** - Выделение максимального значения из заданной пула, взятого из предыдущего слоя автоэнкодера, и запись его в последующий слой.

**Overfitting** - Переобучение нейросети, проявляющееся в ее тонкой настройке на обучающую выборку и невозможности правильной обработки других выборок.

**Upsampling, апсемплинг** - Повышение временного разрешения данных путем Фурье-преобразования с записыванием нулей в конец Фурье-представления и последующего обратного Фурье.

## Список литературы

1. *Зацепин В.И. и др.* Энергетические спектры и зарядовый состав галактических космических лучей, измеренный в эксперименте АТИК-2 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2004. — Т. 68. — С. 1593—1595.
2. *Prosin V.* [et al.] Results from Tunka-133 (5 years observation) and from the Tunka-HiSCORE prototype // EPJ Web Conf. — 2016. — Vol. 121. — P. 03004.
3. *Askaryan G. A.* Excess negative charge of an electron-photon shower and its coherent radio emission // Soviet Physics JETP. — 1962. — Vol. 14. — P. 441.
4. *Hess V. F.* Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrt // Physikalische Zeitschrift. — 1912. — Vol. 13. — P. 1084.
5. *Kolhoerster W.* Messungen der durchdringenden strahlung im freiballon in grösseren höhen. // Physikalische Zeitschrift. — 1913. — Т. 14. — С. 1153—1156.
6. *Kolhoerster W.* Messungen der durchdringenden Strahlungen bis in Höhen von 9300 m. // Verh.deutsche phys.Gesellschaft. — 1914. — Т. 16. — С. 719—721.
7. *Clay J.* Penetrating radiation // Proc. R. Acad. Amsterdam. — 1927. — Т. 30. — С. 1115—1127.
8. *Bothe W., Kolhoerster W.* Das Wesen der Höhenstrahlung // Physikalische Zeitschrift. — 1929. — Т. 56. — С. 751.
9. *Rossi B.* Method of Registering Multiple Simultaneous Impulses of Several Geiger's Counters // Nature. — 1932. — Vol. 125. — P. 636.
10. *Anderson C.* The Positive Electron // Phys. Rev. — 1933. — Т. 43. — С. 491—494.
11. *Neddermeyer S. H., Anderson C. D.* Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles // Physical Review. — 1937. — Май. — Т. 51, № 10. — С. 884—886.
12. *YUKAWA H.* On the Interaction of Elementary Particles. I // Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan. 3rd Series. — 1935. — Т. 17. — С. 48—57.

13. *Lattes C. M. G.* [и др.] PROCESSES INVOLVING CHARGED MESONS // Nature. — 1947. — Т. 159. — С. 694—697.
14. *Auger P.* [et al.] Extensive cosmic ray showers // Rev. Mod. Phys. — 1939. — Vol. 11. — P. 288–291.
15. *Kahn F., Lerche I.* Radiation from cosmic ray air showers // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1966. — Т. 289, вып. 1417. — С. 206—2013.
16. *Вернов С. Н.* [и др.] Исследование радиоизлучения широких атмосферных ливней на комплексной установке МГУ. Пространственное распределение радиоизлучения и его поляризация // Известия АН СССР. Серия физическая. — Т. 34, вып. 9. — С. 1996—1999.
17. *Tennent R. M.* The Haverah Park extensive air shower array // Proceedings of the Physical Society. — 1967. — Ноябрь. — Т. 92, № 3. — С. 622—631.
18. *Link K.* [и др.] The LOPES experiment // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. / под ред. R. Caruso [и др.]. — 2011. — Т. 212—213. — С. 323—328.
19. *Nelles A.* [et al.] Detecting Radio Emission from Air Showers with LOFAR // AIP Conf. Proc. — 2013. — Vol. 1535, no. 1. — P. 105–110. — arXiv: [1304.0976](https://arxiv.org/abs/1304.0976) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/abs/1304.0976)].
20. *Ravel O.* [et al.] The CODALEMA experiment // Nucl. Instrum. Meth. — 2012. — Vol. A662. — S89–S94.
21. *Seo E. S.* Direct measurements of cosmic rays using balloon borne experiments // Astroparticle Physics. — 2012. — Vol. 76. — P. 39–40.
22. *Sparvoli R.* Direct measurements of cosmic rays in space // Nuclear Physics B Proc. Suppl. — 2013. — Vol. 115. — P. 239–240.
23. *Maestro P.* Cosmic rays: direct measurements // PoS. — 2016. — Vol. ICRC2015. — P. 016. — arXiv: [1510.07683](https://arxiv.org/abs/1510.07683) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/abs/1510.07683)]. — [34,16(2015)].
24. *Greisen K.* End to the Cosmic-Ray Spectrum? // Physical Review Letters. — 1966. — Vol. 16. — P. 748–750.
25. *Zatsepin G. T., Kuzmin V. A.* Upper limit of the spectrum of cosmic rays // ZhETF Pisma Redaktsiiu. — 1966. — Vol. 4, no. 3. — P. 114–117.

26. *Zeitlin C.* [и др.] Update on Galactic Cosmic Ray Integral Flux Measurements in Lunar Orbit With CRaTER // *Space Weather*. — 2019. — Июль. — Т. 17, № 7. — С. 1011—1017.
27. *Tomassetti N.* Measurement of the Cosmic Ray B/C Ratio with the AMS-01 Experiment. — 2010. — Сент. — arXiv: [1009.1908](https://arxiv.org/abs/1009.1908) [[astro-ph.IM](#)].
28. *An Q.* [и др.] Measurement of the cosmic-ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite // *Sci. Adv.* — 2019. — Т. 5, № 9. — eaax3793. — arXiv: [1909.12860](https://arxiv.org/abs/1909.12860) [[astro-ph.HE](#)].
29. *Teshima M.* [и др.] Anisotropy of cosmic-ray arrival direction at  $10^{18}$ -eV observed by AGASA // 27th International Cosmic Ray Conference. — Авг. 2001. — С. 337—340.
30. *Roulet E.* Large-scale anisotropies above 0.03 EeV measured by the Pierre Auger Observatory // *PoS.* — 2020. — Т. ICRC2019. — С. 408.
31. *Caccianiga L.* Anisotropies of the Highest Energy Cosmic-ray Events Recorded by the Pierre Auger Observatory in 15 years of Operation // *PoS.* — 2020. — Т. ICRC2019. — С. 206.
32. *Lagage O., Cesarsky J.* The maximum energy of cosmic rays accelerated by supernova shocks. // *Astronomy and Astrophysics*. — 1983. — Vol. 125. — P. 249–257.
33. *Berezhko E. G., Völk H. J.* Kinetic theory of cosmic ray and gamma-ray production in supernova remnants expanding into wind bubbles. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2000. — Vol. 357. — P. 283–300.
34. *Budnev N.* [и др.] The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array // *Astroparticle Physics*. — 2020. — Т. 117. — С. 102406. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650519302099>.
35. *Nagano M.* [et al.] Energy spectrum of primary cosmic rays above  $10^{17}$ -eV determined from the extensive air shower experiment at Akeno // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 1992. — Vol. 18. — P. 423.
36. *Bird D. J.* [et al.] The cosmic-ray energy spectrum observed by the Fly's Eye // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — Vol. 424. — P. 491–502.

37. *Ave M.* [et al.] The Energy Spectrum of Cosmic Rays Above  $3 \times 10^{17}$  eV as measured with the Haverah Park Array // *Astroparticle Physics*. — 2003. — Vol. 19. — P. 47–60.
38. *Abbasi R. U.* [et al.] First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression // *Physical Review Letters*. — 2008. — Vol. 100. — P. 101101.
39. *Beringer J.* [и др.] Review of Particle Physics // *Phys. Rev. D*. — 2012. — Июль. — Т. 86, вып. 1. — С. 010001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.86.010001>.
40. *Skobelzyn D.* Über eine neue Art sehr schneller  $\beta$ -Strahlen // *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*. — 1929. — Т. 54(9). — С. 686—702.
41. *Auger P.* Extensive Cosmic-Ray Showers // *Reviews of Modern Physics*. — 1939. — Vol. 11, 3–4. — P. 288–291.
42. *Skobelzyn D., Zatsepin G., Miller V.* // *Phys.Rev.* — 1947. — Т. 71. — С. 315.
43. *Anderson.* The Positive Electron // *Physics Review*. — 1933. — Vol. 43, issue 6. — P. 491.
44. *Neddermeyer S. H., Anderson C. D.* Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles // *Physics Review*. — 1937. — Vol. 51. — P. 884.
45. *Rathgeber H.* Multiple Geiger Counter Telescope Measurements of the Directions of Air Shower Particles // *Nature*. — 1959. — Т. 183. — С. 386—387.
46. *Hayashida N., Kifune T.* Proportional counter for air shower observation // *Nucl. Instrum. Meth.* — 1980. — Т. 173. — С. 431—437.
47. *Chantell M. C.* [et al.] Limits on the isotropic diffuse flux of ultrahigh-energy gamma radiation // *Phys. Rev. Lett.* — 1997. — Vol. 79. — P. 1805–1808. — arXiv: [astro-ph/9705246](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9705246) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].
48. *Robert J.* [et al.] Gamma-ray astronomy with the HAWC observatory // *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. — 2014. — Vol. 28. — P. 1460185. — eprint: <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S2010194514601859>. — URL: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2010194514601859>.

49. *Blaufuss E.* Results from the Milagro Gamma-Ray Observatory // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. / под ред. F. Avignone, W. Haxton. — 2005. — Т. 138. — С. 292—294.
50. *Bai X.* [и др.] The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) Science White Paper. — 2019. — Май. — arXiv: [1905.02773](https://arxiv.org/abs/1905.02773) [[astro-ph.HE](#)].
51. *Abraham J.* [et al.] The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2010. — Vol. 620, no. 2–3. — P. 227–251. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210008727>.
52. *Tokuno H.* [et al.] New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. — 2012. — June. — Vol. 676. — P. 54–65. — arXiv: [1201.0002](https://arxiv.org/abs/1201.0002) [[astro-ph.IM](#)].
53. *Aleksic J.* [et al.] Performance of the MAGIC stereo system obtained with Crab Nebula data // Astroparticle Physics. — 2012. — Vol. 35, no. 7. — P. 435–448. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650511002064>.
54. *Abramowski A.* [et al.] H.E.S.S. observations of the Crab during its March 2013 GeV gamma-ray flare // Astronomy&Astrophysics. — 2014. — Vol. 562. — P. L4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201323013>.
55. *Ivanov A.* [et al.] Wide field-of-view Cherenkov telescope for the detection of cosmic rays in coincidence with the Yakutsk extensive air shower array // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2015. — Vol. 772, — P. 34–42. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900214011772>.
56. *Fowler J.* [et al.] A measurement of the cosmic ray spectrum and composition at the knee // Astroparticle Physics. — 2001. — Vol. 15, no. 1. — P. 49–64. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650500001390>.
57. *Prosin, V.V. and others* Tunka-133: Results of 3 year operation // Nucl.Instrum.Meth. — 2014. — Vol. A756. — P. 94–101.

58. *Gress O.* [et al.] Tunka-HiSCORE – A new array for multi-TeV astronomy and cosmic-ray physics // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2013. — Vol. 732, — P. 290–294. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213008590> ; Vienna Conference on Instrumentation 2013.
59. *Khrenov B.* [et al.] Pioneering space based detector for study of cosmic rays beyond GZK Limit // EPJ Web of Conferences. — 2013. — Vol. 53. — P. 09006. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20135309006>.
60. *Panasyuk M.* [et al.] Ultra high energy cosmic ray detector KLYPVE on board the Russian Segment of the ISS // Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference 2015, The Hague, The Netherlands. — 2015. — PoS (ICRC 2015) 255.
61. *Adams J. H.* [и др.] The EUSO-Balloon pathfinder // Exper. Astron. — 2015. — Т. 40, № 1. — С. 281—299.
62. *Scotti V., Osteria G.* [и др.] The EUSO-SPB mission // PoS / под ред. P. Checchia [и др.]. — 2017. — Т. EPS—HEP2017. — С. 024.
63. *Casolino M.* [et al.] Detecting ultra-high energy cosmic rays from space with unprecedented acceptance: objectives and design of the JEM-EUSO mission // Astrophysics and Space Sciences Transactions. — 2011. — Vol. 7, no. 4. — P. 477–482. — URL: <http://www.astrophys-space-sci-trans.net/7/477/2011/>.
64. *Vieregg A.* [et al.] Results from the third flight of ANITA // EPJ Web Conf. — 2019. — Vol. 216. — P. 01009.
65. *Jelley J. V., Fruin J. H., Porter N. A.,* [et al.] Radio Pulses from Extensive Cosmic-Ray Air Showers // Nature. — 1965. — Vol. 205. — P. 327–328.
66. *Kahn F., Lerche I.* Radiation from cosmic ray air showers // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. — 1966. — Vol. 289. — P. 206.
67. *Castagnoli C.* [et al.] On the polarization of coherent radio signals from EAS // Nuovo Cimento B. — 1969. — Vol. 63. — P. 373.
68. *Hough J. H.* Calculations on the radio emission resulting from geomagnetic charge separation in an extensive air shower // Journal of Physics A: Mathematical, Nuclear and General. — 1973. — Vol. 6. — P. 892.

69. *Vernov S.* [et al.] Study of radio emission from extensive air showers by means of a system of half-wave dipoles in the complex array of the moscow state university // Conf.Proc. — 1969. — Vol. C690825. — P. 731–736.
70. *Allan H. R.* Radio Emission From Extensive Air Showers // Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics / ed. by J. G. Wilson, S. A. Wouthuysen. — 1971. — Vol. Vol. 10. — P. 171–302.
71. *Saltzberg D.* [et al.] Observation of the Askaryan effect: Coherent microwave Cherenkov emission from charge asymmetry in high-energy particle cascades // Phys.Rev.Lett. — 2001. — Vol. 86. — P. 2802–2805. — arXiv: [hep-ex/0011001](#) [[hep-ex](#)].
72. *Huege T., Falcke H.* Radio emission from cosmic ray air showers: Coherent geosynchrotron radiation // Astron. Astrophys. — 2003. — T. 412. — C. 19–34. — arXiv: [astro-ph/0309622](#).
73. *Huege T., Falcke H.* Radio emission from cosmic ray air showers: Monte Carlo simulations // Astron. Astrophys. — 2005. — T. 430. — C. 779. — arXiv: [astro-ph/0409223](#).
74. *Huege T., Falcke H.* Radio emission from cosmic ray air showers: Simulation results and parametrization // Astropart. Phys. — 2005. — T. 24. — C. 116–136. — arXiv: [astro-ph/0501580](#).
75. *Bezyazeev P. A.* [et al.] Radio measurements of the energy and the depth of the shower maximum of cosmic-ray air showers by Tunka-Rex // JCAP. — 2016. — Vol. 1601, no. 01. — P. 052. — arXiv: [1509.05652](#) [[hep-ex](#)].
76. *Kang D.* [и др.] Recent results from the KASCADE-Grande data analysis // EPJ Web Conf. / под ред. B. Pattison [и др.]. — 2019. — T. 208. — C. 04005.
77. *Huege T., Ludwig M.* REAS 3.1. — 2012. — 51.04.02; LK 01. Radio Simulations for Neutrino and Cosmic Ray Detectors, Columbus, Ohio, February 22-24, 2012.
78. *Thoudam S.* [и др.] LORA: A scintillator array for LOFAR to measure extensive air showers // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2014. — T. 767. — C. 339–346. — arXiv: [1408.4469](#) [[physics.ins-det](#)].
79. *Huege T.* Radio detection of cosmic rays with the Auger Engineering Radio Array // EPJ Web Conf. — 2019. — Vol. 210. — P. 05011. — arXiv: [1905.04986](#) [[astro-ph.IM](#)].

80. *Aab A.* [et al.] The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory // Nuclear Instruments and Methods. — 2015. — Vol. A798. — P. 172–213.
81. *Ivanov A.* The Yakutsk array experiment: Main results and future directions // EPJ Web Conf. / под ред. К. Н. Kampert [и др.]. — 2013. — Т. 53. — С. 04003.
82. *Saugrin T.* [и др.] First Detection of Extensive Air Showers by the TREND Self-Triggering Radio Experiment // 32nd International Cosmic Ray Conference. Т. 3. — АВГ. 2011. — С. 274.
83. *Martineau-Huynh O.* The GRAND project and GRANDProto300 experiment // EPJ Web Conf. / под ред. I. Lhenry-Yvon [и др.]. — 2019. — Т. 210. — С. 06007. — arXiv: [1903.04803](https://arxiv.org/abs/1903.04803) [[astro-ph.IM](#)].
84. *Schröder F. G.* [et al.] Overview on the Tunka-Rex antenna array for cosmic-ray air showers // PoS. — 2018. — Vol. ICRC2017. — P. 459. — arXiv: [1708.00627](https://arxiv.org/abs/1708.00627) [[astro-ph.HE](#)].
85. *Schröder F.* [и др.] New method for the time calibration of an interferometric radio antenna array // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2010. — Февр. — Т. 615. — С. 277—284.
86. *Abreu P.* [et al.] Advanced functionality for radio analysis in the Offline software framework of the Pierre Auger Observatory // Nucl.Instrum.Meth. — 2011. — Vol. A635. — P. 92–102. — arXiv: [1101.4473](https://arxiv.org/abs/1101.4473) [[astro-ph.IM](#)].
87. *Bezyazeev P. A.* [и др.] Radio measurements of the energy and the depth of the shower maximum of cosmic-ray air showers by Tunka-Rex // JCAP. — 2016. — Т. 01. — С. 052. — arXiv: [1509.05652](https://arxiv.org/abs/1509.05652) [[hep-ex](#)].
88. *Apel W.* [и др.] A comparison of the cosmic-ray energy scales of Tunka-133 and KASCADE-Grande via their radio extensions Tunka-Rex and LOPES // Physics Letters B. — 2016. — Т. 763. — С. 179—185. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269316306025>.
89. *Antonov R. A.* [и др.] // 23rd International Cosmic Ray Conference. Т. 2. — 1993. — С. 430.
90. *Bryanski S. V.* [и др.] The Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays by the Data of Tunka Cherenkov Array // 24rd International Cosmic Ray Conference. Т. 2. — 1995. — С. 724.

91. *Balkanov V.* [и др.] The lake baikal neutrino telescope NT-200: status, results, future // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. — 1999. — Т. 75, № 1. — С. 409—411. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563299003084>.
92. *Budnev N.* [и др.] Tunka-25 Air Shower Cherenkov array: The main results // Astroparticle Physics. — 2013. — Т. 50—52. — С. 18—25. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650513001485>.
93. *Kostunin D.* [и др.] Quest for detection of a cosmological signal from neutral hydrogen with a digital radio array developed for air-shower measurements // PoS. — 2020. — Т. ICRC2019. — С. 320. — arXiv: [1908.06975](https://arxiv.org/abs/1908.06975) [astro-ph.IM].
94. *Monkhoev R. D.* [et al.] The Tunka-Grande experiment // JINST. — 2017. — Vol. 12, no. 06. — P. C06019.
95. *Collaboration) W. D. A. et al. (KASCADE-Grande* The KASCADE-Grande experiment // Nucl. Instrum. Meth. — 2010. — Vol. A620. — P. 202–216.
96. *Astapov I. I.* [et al.] The TAIGA-HiSCORE array prototype: Status and first results // Bull. Russ. Acad. Sci. — 2017. — Vol. 81, no. 4. — P. 460–463.
97. *Fernow R. C.* Introduction to Experimental Particle Physics. — Март 1983.
98. *Budnev N.* [et al.] The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley // Nucl. Instrum. Meth. — 2017. — Vol. A845. — P. 330–333.
99. *Ivanova A.* [и др.] Possibilities of the Tunka-Grande and TAIGA-Muon scintillation arrays with the TAIGA-HiSCORE Cherenkov array joint operation in the research of cosmic and gamma rays // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Дек. — Т. 1690. — С. 012014. — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012014>.
100. *Berezhnev S.* [et al.] The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: status of 2011 // Nucl.Instrum.Meth. — 2012. — Vol. A692. — P. 98–105. — arXiv: [1201.2122](https://arxiv.org/abs/1201.2122) [astro-ph.HE].
101. *Bezyazeev P.* [и др.] Towards the Tunka-Rex Virtual Observatory // 3rd International Workshop on Data Life Cycle in Physics. — Июнь 2019. — arXiv: [1906.10425](https://arxiv.org/abs/1906.10425) [astro-ph.IM].

102. *Krömer O.* [et al.] New Antenna for Radio Detection of UHECR // Proc. of the 31st ICRC, Łódź, Poland. — 2009. — No. 1232. — <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/>.
103. *Hörandel J. R.* Precision measurements of cosmic rays up to the highest energies with a large radio array at the Pierre Auger Observatory // EPJ Web Conf. / под ред. I. Lhenry-Yvon [и др.]. — 2019. — Т. 210. — С. 06005.
104. *Hiller R.* [и др.] The Tunka-Rex antenna station // 33rd International Cosmic Ray Conference. — 2013. — С. 1278. — arXiv: [1308.0917](https://arxiv.org/abs/1308.0917) [[astro-ph.IM](#)].
105. *Budnev N. M.* [et al.] Data acquisition system for the TUNKA-133 array // Astroparticle, particle and space physics, detectors and medical physics applications. Proceedings, 10th Conference, ICATPP 2007, Como, Italy, October 8-12, 2007. — 2008. — P. 287–291. — arXiv: [0804.0856](https://arxiv.org/abs/0804.0856) [[astro-ph](#)].
106. *Heck D.* [et al.] CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers: FZKA Report / Forschungszentrum Karlsruhe. — 1998. — No. 6019.
107. *Sciutto S. J.* AIRES: A System for air shower simulations. User's guide and reference manual. Version 2.2.0. — 1999. — arXiv: [astro-ph/9911331](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9911331) [[astro-ph](#)].
108. *Ostapchenko S.* Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model // Phys.Rev. — 2011. — Vol. D83. — P. 014018. — arXiv: [1010.1869](https://arxiv.org/abs/1010.1869) [[hep-ph](#)].
109. *Ferrari A.* [et al.] FLUKA: A multi-particle transport code (Program version 2005). — 2005.
110. *Huege T., Ludwig M., James C.* Simulating radio emission from air showers with CoREAS // AIP Conf.Proc. — 2013. — Vol. 1535. — P. 128. — arXiv: [1301.2132](https://arxiv.org/abs/1301.2132) [[astro-ph.HE](#)].
111. *Kostunin D.* Reconstruction of air-shower parameters with a sparse radio array : PhD thesis PhD : 01.04.03 / Kostunin D. — Karlsruhe Institute of Technology, 2015. — 123 p.
112. *Bezyazeev P. A.* [et al.] Measurement of cosmic-ray air showers with the Tunka Radio Extension (Tunka-Rex) // Nucl. Instrum. Meth. — 2015. — Vol. A802. — P. 89–96. — arXiv: [1509.08624](https://arxiv.org/abs/1509.08624) [[astro-ph.IM](#)].

113. *Kostunin D.* [et al.] Reconstruction of air-shower parameters for large-scale radio detectors using the lateral distribution // *Astropart. Phys.* — 2016. — Vol. 74. — P. 79.
114. *Fedorov O.* [et al.] Detector efficiency and exposure of Tunka-Rex for cosmic-ray air showers // *PoS.* — 2018. — Vol. ICRC2017. — P. 387. — arXiv: [1712.00974](https://arxiv.org/abs/1712.00974) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1712.00974)]. — [35,387(2017)].
115. *Lenok V.* [et al.] Modeling the Aperture of Radio Instruments for Air-Shower Detection // *PoS.* — 2019. — Vol. ICRC2019. — P. 331. — arXiv: [1909.01945](https://arxiv.org/abs/1909.01945) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1909.01945)].
116. *Hiller R.* Radio measurements for determining the energy scale of cosmic rays : PhD thesis PhD : 01.04.03 / Hiller R. — Karlsruhe Institute of Technology, 2016. — 149 p.
117. Tunka-Rex efficiency model. — URL: <https://gitlab.ikp.kit.edu/tunkarex/efficiency> ; (visited on 2021-08-30).
118. *Schröder F.* [и др.] On noise treatment in radio measurements of cosmic ray air showers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2012. — T. 662. — S238—S241. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210024514> ; 4th International workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino detection Activities.
119. *Xiu C., Su X.* Composite Convolutional Neural Network for Noise Deduction // *IEEE Access.* — 2019. — T. 7. — C. 117814—117828.
120. *Kotsiantis S. B.* Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques // *Proceedings of the 2007 Conference on Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering: Real Word AI Systems with Applications in EHealth, HCI, Information Retrieval and Pervasive Technologies.* — NLD : IOS Press, 2007. — C. 3—24.
121. *Bezyazeev P.* [и др.] Reconstruction of sub-threshold events of cosmic-ray radio detectors using an autoencoder // *PoS.* — 2021. — T. ICRC2021. — C. 223. — arXiv: [2108.04627](https://arxiv.org/abs/2108.04627) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/2108.04627)].
122. *Hiller R.* [et al.] Tunka-Rex: energy reconstruction with a single antenna station // *EPJ Web Conf.* — 2017. — Vol. 135. — P. 01004. — arXiv: [1611.09614](https://arxiv.org/abs/1611.09614) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1611.09614)].

123. *Loncar V.* [и др.] Compressing deep neural networks on FPGAs to binary and ternary precision with HLS4ML. — 2020. — Март. — arXiv: [2003.06308 \[cs.LG\]](#).
124. *Apel W.* [et al.] The wavefront of the radio signal emitted by cosmic ray air showers // JCAP. — 2014. — Vol. 1409, no. 09. — P. 025. — arXiv: [1404.3283 \[hep-ex\]](#).
125. *Bezyazeev P. A.* [et al.] Reconstruction of cosmic ray air showers with Tunka-Rex data using template fitting of radio pulses // Phys. Rev. — 2018. — Vol. D97, no. 12. — P. 122004. — arXiv: [1803.06862 \[astro-ph.IM\]](#).
126. *Fedorov O.* [et al.] Detector efficiency and exposure of Tunka-Rex for cosmic-ray air showers // ICRC2017 proceedings. ICRC2017. — 2017. — PoS (ICRC 2017) 387. — eprint: [1712.00974](#).
127. *Oliver J. E.* Standard atmosphere // Climatology. — Boston, MA : Springer US, 1987. — С. 801—803. — URL: [https://doi.org/10.1007/0-387-30749-4\\_167](https://doi.org/10.1007/0-387-30749-4_167).
128. *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* GFS/GDAS Changes Since 1991 // Tech.rep. — 2010. — URL: [http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/STATS/html/model\\_changes.html](http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/STATS/html/model_changes.html).
129. *Kostunin D.* [et al.] Towards a cosmic-ray mass-composition study at Tunka Radio Extension // EPJ Web Conf. — 2017. — Vol. 135. — P. 01005. — arXiv: [1611.09127 \[astro-ph.IM\]](#).
130. *Kostunin D.* [et al.] Seven years of Tunka-Rex operation // HAWC Contributions to the 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). — 2019. — arXiv: [1908.10305 \[astro-ph.HE\]](#).