

На правах рукописи

**Безьязыков Павел Александрович**

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ МАКСИМУМА ШАЛ ПО  
ДАНЫМ УСТАНОВКИ TUNKA-REX**

Специальность 1.3.4. —  
«Радиофизика»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Иркутск — 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО "Иркутский Государственный Университет".

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
**Буднев Николай Михайлович**

Официальные оппоненты: **Щепетов Александр Леонидович**,  
доктор физико-математических наук,  
Лаборатория космических лучей и атмосферных процессов Физического института имени П.Н.Лебедева РАН,  
Ведущий научный сотрудник

**Васильев Роман Валерьевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
Лаборатория физики нижней и средней атмосферы  
Института солнечно-земной физики СО РАН,  
Заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН

Защита состоится 31 мая 2022 года в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 24.2.306.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Иркутский Государственный Университет" по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20, ученому секретарю диссертационного совета Д 24.2.306.01.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

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

Аграфонов Ю.В.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

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 КЛ с энергиями до  $\approx$  сотен ТэВ, наблюдаемых в околоземном пространстве, в силу интенсивного 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 КЛ высоких и сверхвысоких энергий позволяет найти ответы на многие вопросы, стоящие перед современной астрофизикой и астрономией – такими как: механизмы эволюции звезд, распределение крупномасштабных магнитных полей вблизи Солнечной системы и в масштабах галактики. Знание энергетического спектра и массового состава КЛ необходимо для понимания состава и природы их источников и механизмов ускорения.

Поток КЛ падает с ростом энергии. Для энергии в  $10^{15}$  эВ поток КЛ составляет порядка 1 частицы/ $m^2$ /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 и даже сотен км (при сверхвысоких энергиях и/или больших углах наклона оси ШАЛ к горизонту). Свойства каскада (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 регистрации 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.

Радиостановки 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 радиосигналов 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 радиостановок 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 стал заметен только в 2000-х годах вместе с развитием элементной базы и вычислительной техники. Сложность восстановления параметров ШАЛ по данным радиостановок сопряжена с низкими отношениями сигнал/шум и сложностью определения апертуры радиостановок, 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. Кро-

ме того, радио-спокойные 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 характеристик КЛ, как энергетический спектр и массовый состав, необходимо измерение потока КЛ с заданными параметрами. Регистрируемый на радиостановке ШАЛ поток событий может значительно отличаться от фактического, 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 радиостановки.

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

**Целью** данной работы является разработка комплекса методик расчета эффективной апертуры установок для исследования КЛ путем регистрации радиоизлучения ШАЛ, обработки радиосигналов от ШАЛ, регистрируемых такими установками, включая выделение сигналов ШАЛ на фоне шума, позволяющих восстанавливать глубину максимума ШАЛ, и 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 суммировании 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, позволившая 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 радиостанции 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 возможность 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 согласием результатов, полученных в ходе данной работы, 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; разработке 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.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК либо внесенных в базы индексирования Web of Science и Scopus, 3 – в тезисах докладов.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК

либо внесенных в базы индексирования Web of Science и Scopus, 3 – в тезисах докладов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 106 страниц, включая 43 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 129 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** включает обзор истории исследования и природы космических лучей (КЛ) и инициируемых ими в атмосфере каскадных процессов (широких атмосферных ливней, ШАЛ).

В разделе 1.1 приводится описание КЛ и их наблюдаемых характеристик: потока, энергетического спектра и массового состава. Описываются способы наблюдения КЛ на разных энергиях. Поток КЛ на низких энергиях (ниже  $10^{15}$  эВ) достаточно высок для проведения эффективных прямых наблюдений. С ростом энергии поток КЛ падает согласно степенному закону, что делает прямые наблюдения нецелесообразными, однако, на этих энергиях КЛ инициируют ШАЛ при взаимодействии с атмосферой. Таким образом, высокоэнергетичные КЛ возможно исследовать путем регистрации ШАЛ с поверхности.

Приводится описание движения КЛ в космическом пространстве и их торможения до предела ГЗК [4; 5]. Рассматривается общая схема взаимодействия КЛ с атмосферой и развития ШАЛ. Приводится энергетический спектр КЛ, наблюдаемый на современных экспериментах. Рассматриваются особенности наблюдаемого спектра: "колено", "второе колено", "лодыжка". Также приводится наблюдаемый массовый состав КЛ.

В разделе 1.2 приводится описание ШАЛ, инициируемых КЛ в атмосфере. Проводится обзор исторических исследований ШАЛ. Рассматриваются различные способы регистрации ШАЛ. Проводится обзор структуры и отдельных компонент ШАЛ, а также его эволюции в атмосфере.

В разделе 1.3 описываются механизмы радиоизлучения ШАЛ и подходы к его регистрации, а также способы восстановления энергетического спектра и массового состава КЛ по данным наблюдений ШАЛ. Основными механизмами генерации радиоизлучения в ШАЛ являются геомагнитный, обусловленный взаимодействием заряженной компоненты ШАЛ с геомагнитным полем, и механизм Аскарьяна, обусловленный аннигиляцией образующихся на фронте ШАЛ позитронов с атмосферными электронами, что приводит к избытку электронов в плоскости фронта ШАЛ и сопровождается когерентным излучением в радиодиапазоне.



Рассматриваются основные характеристики ШАЛ, являющиеся указателями на параметры первичной частицы - энергия и глубина максимума (глубина атмосферы, на которой в ШАЛ наблюдается максимальное число частиц). Приводится описание подхода к восстановлению параметров ШАЛ путем анализа функции пространственного распределения радиоизлучения ШАЛ, использовавшийся в предыдущей версии восстановления по данным Tunka-Rex. Также проводится обзор существующих радиодетекторов и использующихся на них методик интерпретации и обработки экспериментальных данных.

Во **второй главе** проводится детальный обзор детектора Tunka-Rex и сопутствующих экспериментов, работающих в Тункинской астрофизической обсерватории.

В разделе 2.1 приводится описание инструментов обсерватории, приводятся технические описания различных установок, подходы к обработке их данных и полученные результаты.

В разделе 2.2 приведено описание установки Tunka-Rex. Описана полная цепочка обработки данных, начиная от аппаратной части и регистрации амплитуды радиоимпульса ШАЛ и заканчивая восстановлением параметров первичной частицы. Описана геометрия установки, антенная станция, сигнальная цепь, АЦП, системы записи и сбора данных.

Описана процедура обработки данных и последующего восстановления параметров ШАЛ, использовавшаяся в предыдущей версии восстановления (т.н. "стандартный метод") [6]. В ходе этой процедуры из данных, набранных установкой Tunka-Rex по триггеру от установки Тунка-133, выделяется подвыборка, удовлетворяющая ряду критериев по отношению сигнал/шум, количеству сработавших станций и расстоянию между ними. К подвыборке применяется ряд фильтров, направленный на подавление помех, занимающих характерные полосы частот. После этого по данным из подвыборки методом триангуляции восстанавливается направление прихода ШАЛ, который сравнивается с направлением, восстановленным по данным установки Тунка-133. В дальнейшую обработку проходят те события, разница в направлениях прихода для которых составляет  $< 5^\circ$ . После этого проводится восстановление электрического поля на антенной станции, по огибающей которого подгоняется функция пространственного распределения амплитуды радиоизлучения ШАЛ (далее ФПР), используемая для восстановления параметров ШАЛ:

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

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.

Энергия восстанавливается по ФПР как параметризация амплитуды импульса на заданном расстоянии от оси ШАЛ:

$$E_{pr} = \kappa \left( \frac{\mathcal{E}_{\text{corr}}(d_0)}{\mu V/m} \right)^b \quad (2)$$

где  $\kappa$  - показатель наклона калибрационной кривой,  $\varepsilon(r)$  - скорректированная на асимметрию амплитуда,  $d_0$  – дистанция, являющаяся свободным параметром и  $b$  – также свободный параметр, определенный численно. В настоящем подходе  $d_0 = 120$  метров как характеризующаяся наилучшей корреляцией с энергией первичной частицы по результатам моделирования.

Для восстановления  $X_{max}$  в рамках стандартного подхода используется вариант параметризации, предложенной в [7] для обработки данных черенковских детекторов:

$$X_{max} = X_{det}/\cos\theta - (A + B \log(a_1 + \bar{b})). \quad (3)$$

Эта параметризация включает свободные параметры  $A$  и  $B$ , полученные путем фитирования модельных ливней, зависимый от расстояния до оси ливня параметр  $a_1 = \eta(r_x)$ , и фактор коррекции  $\bar{b}$ . Подробное описание подхода и значения параметров приведены в [8].

Приведены результаты восстановления энергетического спектра и массового состава КЛ в энергетическом диапазоне  $10^{17} - 10^{18}$  эВ с использованием стандартного метода, а также верификация результатов восстановления путем сравнения с результатами хост-детектора Тунка-133.

В **третьей главе** описывается разработанная при участии автора модель эффективности радиодетектора, позволяющая рассчитать эффективность (вероятность регистрации) регистрации ШАЛ с заданными параметрами. В модели используется метод Монте-Карло, в рамках которого ШАЛ отождествляется с областью на поверхности детектора, внутри которой радиоимпульс ШАЛ превышает амплитудный порог регистрации (т.н. отпечаток ШАЛ). Соотношение размеров отпечатка и параметров ШАЛ рассчитано с учетом параметров установки Тунка-Rex и определено следующим образом:

$$r_{th}(E, \theta, \alpha) = r_0 + \frac{1}{\eta_0 \cos\theta} \ln \frac{E_{th} \cdot \sqrt{\sin^2 \alpha + \epsilon^2}}{k S_{th}}, \quad (4)$$

где  $r_{th}$  - малая полуось эллипса отпечатка,  $r_0 = 120$  метров - референтная дистанция, характеризующаяся наилучшей корреляцией амплитуды сигнала с энергией,  $\eta_0$  - показатель наклона ФПР,  $\theta$  - зенитный угол,  $E_{th}$  - энергия первичной частицы,  $\alpha$  - геомагнитный угол,  $\epsilon = 0.085$  - поправочный коэффициент, определяющий усредненный вклад эффекта Аскарьяна в общее радиоизлучение ШАЛ,  $k = 884 \frac{\text{эВ}}{\text{В/м}}$  - показатель зависимости уровня сигнала ШАЛ от его энергии, полученный в ходе моделирования с использованием ПО CoREAS [9],  $S_{th} \approx 90$  мкВ/м -

пороговая амплитуда сигнала, определенная экспериментально. Большая полуось эллипса отпечатка рассчитывается соответственно как  $r_{th}/\cos(\theta)$ .

В общем работу модели можно описать следующим образом:

1. Задаются начальные параметры для работы модели: 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 положение оси 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 в рамках тестирования модели 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:

$$\varepsilon = \varepsilon(E, t, \theta, \alpha) = \frac{N_{detected}}{N_{total}}, \quad (5)$$

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

Для верификации модели и оценки точности ее работы была рассчитана эффективность установки Tunka-Rex для диапазона энергий от  $10^{16}$  до  $10^{18}$  эВ и диапазона направлений прихода по всей верхней полусфере (от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  по зенитному углу и для всех азимутальных) с разрешением размещения осей модельных ШАЛ по поверхности установки в 5 метров. Для настройки модели были использованы данные совместных измерений установок Tunka-Rex и Тунка-133 за 2012-2014 годы. В выборку для настройки были включены данные с одной и двумя антеннами на кластер. Область детектора, внутри которой проводилось моделирование, была определена как круг радиусом 400 метров (далее “эффективный радиус”). В качестве входных данных для тестирования модели использованы результаты восстановления параметров ШАЛ по данным установки Тунка-133 (энергия, угол прихода и положение оси ШАЛ). Для всей выборки данных была проведена пособытийная оценка эффективности, после чего проведено сравнение доли событий, для которых модель предсказывает эффективность  $> 90\%$ , и

доли событий, которые успешно прошли всю процедуру восстановления данных для установки Tunka-Rex. Результаты этого сравнения по экспериментальным данным Tunka-Rex и модельным данным CoREAS приведены на Рис. 1.

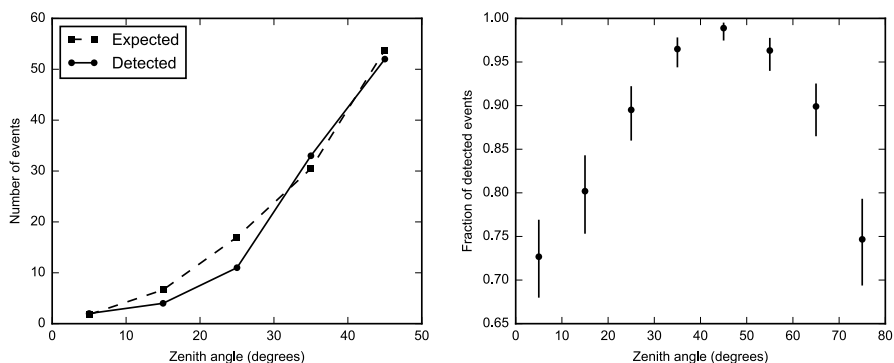


Рис. 1 — Сравнение количества событий с вероятностью регистрации более 90% по результатам работы модели, с количеством событий, успешно прошедших процедуру восстановления Tunka-Rex. Слева: сравнение для измерений 2012-2014 годов, справа: доля восстановленных событий по модельным данным CoREAS для конфигурации детектора с 2 антеннами на кластер. Падение доли восстановленных событий на малых и больших зенитных углах связано с вариациями расстояния до максимума значительным расстоянием до максимума ШАЛ.

С использованием модели и данных о временных интервалах работы детектора была рассчитана эффективная апертура и экспозиция Tunka-Rex для измерений 2012-2017 (Рис. 2).

Модель была использована в ходе 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:

- Эффективность > 90%;
- Радиусе отпечатка > 300 метров по малой полуоси;
- 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. Сравнение доли событий с достаточной для восстановления эффективностью регистрации с долей событий, прошедших процедуру восстановления, приведено в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение между ожидаемым согласно данной 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	Эфф-ность модели
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	$0.94^{+0.02}_{-0.03}$

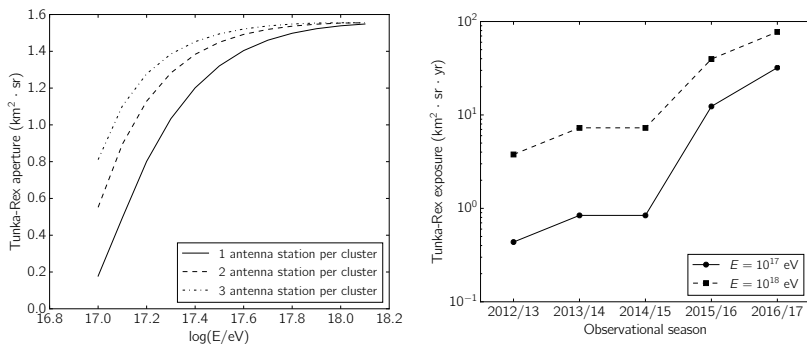


Рис. 2 — Слева: расчетная апертюра Tunka-Rex для диапазона зенитных углов  $0^\circ - 60^\circ$  в условиях отсутствия аппаратных неполадок. Справа: общая экспозиция в зависимости от времени для измерений 2012-2017.

В **четвертой главе** описывается разработанный при участии автора подход к удалению шумов из записанных данных с использованием нейросети архитектуры "автоэнкодер". Автоэнкодер – класс нейронных сетей, осуществляющих последовательное кодирование и декодирование 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). Количество нейронов на каждом слое энкодера последовательно уменьшается. Снижение размерности проводится путем свертки входных данных с серией фильтров, каждый из которых представляет собой оконную функцию, соответствующую какой-либо особенности входных данных (например, для сигнальной дорожки, поступающей на вход, это может быть узкий пик или другая характерная волновая форма) и последующей опе-

рации выделения максимального значения в окне заданного размера из входных данных. На стыке энкодера и декодера размерность достигает минимума. Это положение соответствует максимально абстрактному представлению данных (т.н. внутреннее представление). После кодирования данных начинается процесс декодирования с последовательным увеличением размерности слоя вплоть до идентичного 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) [10] 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.

Для обучения и тестирования автоэнкодера сформирована выборка данных, включающая 25 тысяч модельных пар из модельных сигнальных дорожек и наложенного на него шума, зарегистрированного на установке Tunka-Rex. Выбор оптимальной конфигурации автоэнкодера (количество слоев и сверточных фильтров в нейросети) проведен по двум метрикам: эффективность,  $N_{rec.}/N_{tot.}$  - доля импульсов, превысивших заданный амплитудный порог после обработки, и точность,  $N_{hit}/N_{rec.}$  - доля импульсов с отклонением восстановленной временной отметки от истинной  $|t_{rec.} - t_{true}| < 5$  нс. По итогам тестирования выбрана конфигурация автоэнкодера, включающая 3 сверточных слоя в кодирующей части и 8 фильтров на первом сверточном слое.

Предварительное тестирование автоэнкодера показало возможность его применения для восстановления низкоамплитудных импульсов ШАЛ. Пример обработки сигнальной дорожки Tunka-Rex с помощью автоэнкодера показан на Рис. 3 Однако, особенность работы выбранной архитектуры заключается в том, что для корректной работы нейросети необходимо нормировать входные данные в единый амплитудный диапазон, что приводит к потере информации об абсолютной амплитуде сигнала и делает невозможным применение метода анализа ФПР для восстановления параметров ШАЛ.

Для восстановления ФПР и восстановления параметров ШАЛ по данным, обработанным автоэнкодером, был разработан и испытан следующий подход:

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

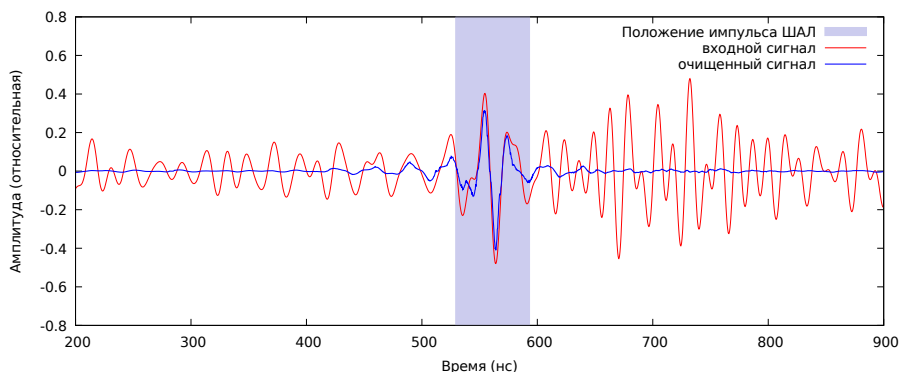


Рис. 3 — Результат обработки реальной сигнальной дорожки автоэнкодером. Как можно видеть, высокоамплитудная помеха сразу за импульсом успешно удалена.

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 автоэнкодера менее, чем на  $5^\circ$ . Также введен дополнительный критерий 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.

Результатом обработки события в соответствии с описанной процедурой является когерентная сумма сигнальных дорожек, сдвинутых в соответствии с восстановленными автоэнкодером временными отметками. Полученная сумма соответствует сигналу, зарегистрированному на расстоянии  $r$  от оси ливня, где  $r$  - усреднение расстояний между осью и вошедшими в событие станциями. В случае, когда полученная сумма имеет большее отношение сигнал/шум, чем входящие в нее дорожки, она проходит в дальнейшую обработку.

С использованием амплитуды сигнала и рассчитанного расстояния до оси ливня в просуммированной дорожке мы можем экстраполировать ФПР по одной точке:

$$S_0 = \frac{S}{\exp[\eta_0(r - r_0)]}, \quad (6)$$

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 пу-

тем [11]. 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 [12]:

$$E = S_{180} \cdot \kappa, \quad (7)$$

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

Таким образом мы провели обработку выборки низкоэнергетичных событий. Как уже было сказано выше, для проверки метода была использована выборка событий, записанных по триггеру установки Тунка-133 ( $\approx 100$  событий). 83 события превысили амплитудный порог, составляющий 0.2 от нормированной амплитуды максимума обработанной дорожки, и проверку по направлениям прихода (разница с результатами восстановления данным 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 показаны результаты восстановления энергии ШАЛ по обработанным автоэнкодером данным.

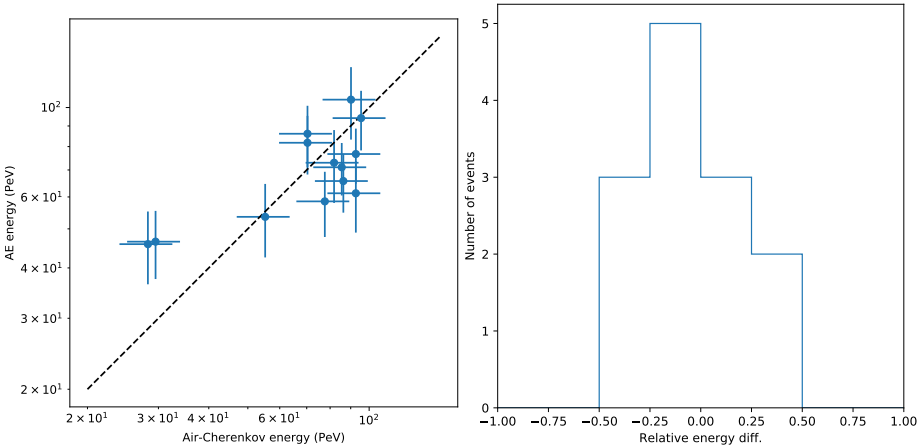


Рис. 4 — Сравнение энергии подпороговых событий, восстановленной с использованием автоэнкодера, и энергии, восстановленной по данным Тунки-133. Слева: прямое сравнение, справа: гистограмма отклонений.

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.



**Пятая глава** содержит описание новой методики восстановления глубины максимума ШАЛ, разработанной коллаборацией Tunka-Rex при участии автора. Методика учитывает форму импульса ШАЛ, эффективность регистрации и систематические эффекты, вносимые динамикой рефракции атмосферы. Глубина максимума ШАЛ является прямым указателем на массу первичной частицы. В рамках стандартного метода эти два параметра связываются через показатель наклона ФПР на определенном расстоянии от оси ШАЛ. Новая методика, предлагаемая в настоящей работе, может быть описана следующим образом:

1. Полная длина импульса ШАЛ определяется как расстояние между двумя минимумами огибающей сигнальной дорожки, 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. В дальнейшем мы будем называть область дорожки, соответствующую сигналу ШАЛ, сигнальным окном.
2. 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  $\text{SNR}_{\text{th}} = 16.0$ .
3. 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  $\text{SNR}_{\text{local}} \geq 10.0$
4. Исключение антенных станций, ассоциированных с высоким уровнем шума. На последних этапах расширения установки Tunka-Rex в силу расширения других установок обсерватории в данных 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 исключения из дальнейшей обработки.

5. Предварительное восстановление с использованием стандартного метода, основанного на анализе ФПП с изменениями, описанными выше. В этом восстановлении мы используем положение оси и угол прихода, восстановленные по данным установки Tunka-133, и энергию, восстановленную по данным установки Tunka-Rex по методике, описанной в [8].
6. 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 [13] с использованием модели QGSJet-II.04 [14]. Выбор конкретной модели адронных взаимодействий не оказывает существенного влияния на форму модельного импульса, а также качество дальнейшего анализа, как показано по ссылке [15]
7. Минимизация суммы  $\chi^2$ -отклонений между модельными импульсами и зарегистрированным импульсом ШАЛ, по итогам которой проводится восстановление энергии и глубины максимума ШАЛ.

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 [16]. 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%, малая полуось эллипса, соответствующего его отпечатку, должна быть не менее 300 метров, а ось ШАЛ должна быть расположена на расстоянии не менее 450 метров от центра установки.

Также в рамках данной работы проведен учет погрешности, вносимой динамикой атмосферной рефракции. Дело в том, что стандартная модель атмосферной рефракции, используемая в CoREAS, статична, в то время как реальная рефракция варьируется в зависимости от высотного распределения влажности и температуры атмосферы во время измерений. Для учета этой погрешности мы

провели пособытийное сравнение профилей атмосферной рефракции, определенных в модели CoREAS, с профилями, рассчитанными по данным спутниковых наблюдений во время регистрации соответствующих событий. Расчет профилей был проведен по открытым данным системы спутникового мониторинга атмосферы Global Data Assimilation System [17]. На Рис. 5 показана относительная разница между профилем рефракции по данным GDAS и профилем рефракции, записанным в CORSIKA. По результатам данных расчетов были установлены систематический сдвиг восстановленного  $X_{max}$  в 3% и ошибка от события к событию до 5%.

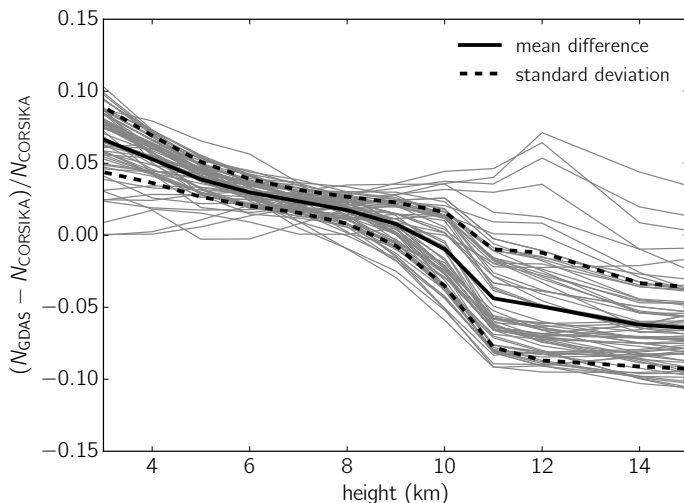


Рис. 5 — Разница между расчетным индексом рефракции согласно модельным параметрам CORSIKA и по данным GDAS в зависимости от высоты

Для оценки точности восстановления по выбранной методике было проведено сравнение с результатами восстановления по данным установки Тунка-133. Для событий, включенных в таблицу 1, среднее разрешение по энергии по данным восстановления Tunka-Rex составляет около 10%. Как показано по ссылке [18], чувствительность радиодетектора к глубине максимума ШАЛ возрастает с увеличением размера отпечатка ШАЛ. По данным последних измерений, 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 2 приводятся оценки точности восстановления  $X_{max}$  по данным установки Tunka-Rex при различных энергиях.

Таблица 2 — Величина стандартного отклонения, рассчитанная исходя из разницы между результатами восстановления глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex и результатами восстановления по данным установки Tunka-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	$\leq 25$

На Рис. 6 показана средняя глубина максимума, восстановленная с использованием описанного метода, в зависимости от энергии 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 зависимости от энергии первичной частицы) в сравнении с результатами восстановления по данным установки Tunka-133.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые 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 событий 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 вариация-

ми 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).

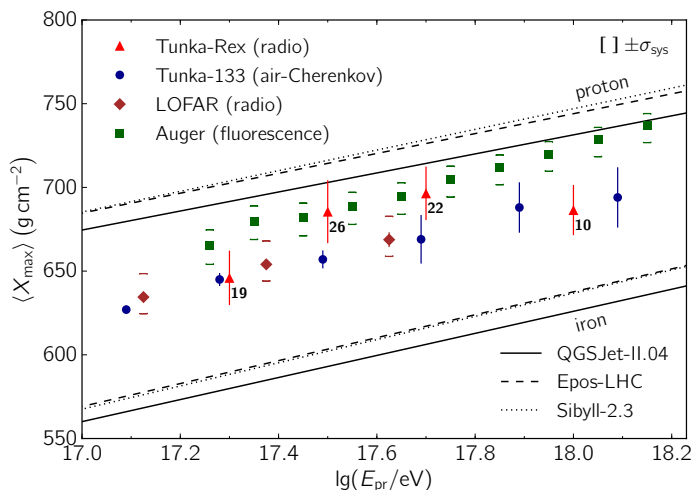


Рис. 6 — Средняя глубина максимума в зависимости от энергии первичной частицы, восстановленная с использованием новой методики по данным Tunka-Rex, в сравнении с результатами других экспериментов. Линиями обозначены предельные значения по данным различных моделей. [19]

## Публикации автора по теме диссертации

### В изданиях из списка ВАК РФ

1. П. Безъязыков и др. Повышение точности восстановления максимума ливня в эксперименте Tunka Radio Extension // Известия РАН, серия физическая. — 2019. — Т. 83, № 8. — С. 1099—1101.
2. П. Безъязыков и др. Улучшение восстановления сигнала при помощи согласованной фильтрации и нейронных сетей для эксперимента Tunka-Rex // Известия РАН, серия физическая. — 2019. — Т. 83, № 8. — С. 1114—1116.

### В сборниках трудов конференций

3. P. Bezyazekov et al. (Tunka-Rex collaboration) Improving reconstruction methods for radio measurements with Tunka-Rex // 25th European Cosmic Ray Symposium (ECRS 2016) Turin, Italy, September 04-09, 2016. — 2017. — arXiv: 1701.05158 [astro-ph.IM].

4. *P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration)* Advanced Signal Reconstruction in Tunka-Rex with Matched Filtering and Deep Learning // 3rd International Workshop on Data Life Cycle in Physics (DLC-2019) Irkutsk, Russia, April 2-7, 2019. — 2019. — arXiv: [1906.10947](https://arxiv.org/abs/1906.10947) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
5. *O. Fedorov, P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration)* Detector efficiency and exposure of Tunka-Rex for cosmic-ray air showers // ICRC2017 proceedings. ICRC2017. — 2017. — PoS (ICRC 2017) 387. — eprint: [1712.00974](https://arxiv.org/abs/1712.00974).

## В прочих изданиях

6. *P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration)* 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](https://arxiv.org/abs/1509.05652) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)].
7. *P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration)* 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](https://arxiv.org/abs/1803.06862) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].

## 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. *Greisen K.* End to the Cosmic-Ray Spectrum? // Physical Review Letters. — 1966. — Vol. 16. — P. 748–750.
5. *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.
6. *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](https://arxiv.org/abs/1509.05652) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)].
7. *Prosin V.* [et al.] Tunka-133: Results of 3 year operation // Nucl. Instrum. Meth. — 2014. — Vol. A756. — P. 94–101.
8. *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.

9. *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 \[astro-ph.HE\]](#).
10. *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 World AI Systems with Applications in EHealth, HCI, Information Retrieval and Pervasive Technologies. — NLD : IOS Press, 2007. — C. 3—24.
11. *Bezyazeev P.* [et al.] Reconstruction of sub-threshold events of cosmic-ray radio detectors using an autoencoder // PoS. — 2021. — Vol. ICRC2021. — P. 223. — arXiv: [2108.04627 \[astro-ph.IM\]](#).
12. *Hiller R.* [et al.] Tunka-Rex: energy reconstruction with a single antenna station // EPJ Web Conf. — 2017. — Vol. 135. — P. 01004. — arXiv: [1611.09614 \[astro-ph.IM\]](#).
13. *Heck D.* [et al.] CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers: FZKA Report / Forschungszentrum Karlsruhe. — 1998. — No. 6019.
14. *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 \[hep-ph\]](#).
15. *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 \[astro-ph.IM\]](#).
16. *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](#).
17. *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).
18. *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 \[astro-ph.IM\]](#).
19. *Kostunin D.* [et al.] Seven years of Tunka-Rex operation // HAWC Contributions to the 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). — 2019. — arXiv: [1908.10305 \[astro-ph.HE\]](#).

*Безъязыков Павел Александрович*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ МАКСИМУМА ШАЛ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ  
TUNKA-REX

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_