

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ И АЭРОНОМИИ
им. Ю.Г. ШАФЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКФИА СО РАН)

Просп. Ленина, 31, Якутск, 677980
Тел. 7 (411-2) 39-04-00
Факс 7 (411-2) 39-04-50
E-mail: ikfia@ysn.ru
<http://www.ikfia.ysn.ru>

05.05.2022 № 297.1-12/2171.1
На № _____

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИКФИА СО РАН,

д.ф.-м.н. Сергей Анатольевич
Стародубцев



«05» мая 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН) – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» на диссертацию **Безъязыкова Павла Александровича** «Восстановление глубины максимума ШАЛ по данным радиодетектора Tunka-Rex», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертация П.А. Безъязыкова посвящена обработке и анализу результатов регистрации радиоизлучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) от космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий. В ней рассматривается новый, более точный метод восстановления глубины максимума ШАЛ по данным радиоустановки Tunka-Rex, которая входит в состав УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», действующей на базе Тункинского астрофизического ЦКП ИГУ.

Актуальность темы исследования космических лучей в диапазоне 10^{15} - 10^{18} эВ обусловлена тем, что именно в этой области происходит переход от галактических к межгалактическим КЛ. Изучение массового состава КЛ требует высокой точности измерения различных параметров ШАЛ, которое требует большой площади установки с плотным расположением детекторов. Создание такой установки требует значительных затрат, но можно расширить существующие установки при помощи радиоантенн, что позволяет повысить точность измерений.

Исследования радиоизлучения ШАЛ были начаты давно, но, благодаря росту технических возможностей, в последнее время начали широко применяться в различных экспериментах как дополнительный метод для восстановления параметров

частицы, вызвавшей ливень. Что и изложено в диссертации П.А. Безъязыкова применительно к результатам Tunka-Rex.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является разработка комплекса методик обработки радиосигналов от ШАЛ, позволяющих восстанавливать глубину максимума ШАЛ, и применение этих методик для обработки данных, полученных на установке Tunka-Rex.

Для достижения поставленной цели решались 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 TunkaRex с использованием разработанных методик, сравнить результаты восстановления с результатами восстановления по данным установки Тунка-133, оценить точность восстановления.

Структура и объем диссертации. Диссертация объемом 106 страниц, содержит 43 рисунка и состоит из введения, 5 глав, заключения. Список литературы содержит 128 наименований.

Во введении формируется цель работы, обосновывается актуальность темы, научная и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе описывается, что такое КЛ и их наблюдаемые характеристики. Приводятся способы наблюдения КЛ для разных энергий. Также приводится описание ШАЛ и краткий исторический обзор исследований ШАЛ. Там же рассматриваются механизмы радиоизлучения ШАЛ, а также способы восстановления параметров ШАЛ, которые указывают на природу первичной частицы.

Во второй главе приводится детальный обзор детектора Tunka-Rex и экспериментов, работающих в Тункинской астрофизической обсерватории. Описываются детекторы, используемые на установке и приводится их техническое описание. Пункт 2.2 посвящен подробному описанию радиоустановки Tunka-Rex и описана процедура обработки данных.

Третья глава посвящена расчетам эффективности регистрации радиоустановки ШАЛ, разработанным и проведенным автором данной работы. Описана разработанная автором модель и принцип ее работы. Модель сравнивается с расчетами эффективности эксперимента Tunka-Rex.

Четвертая глава посвящена подавлению шумов и выделению сигналов с низкой магнитудой. В 4.1 приводится подробное описание автоэнкодера, принцип работы, архитектура и обучение модели. В 4.2 автоэнкодер используется для восстановления энергии первичной частицы в ливнях с низкой амплитудой радиосигнала. Рассчитана корреляция между энергиями ливней, восстановленных по данным радиоизлучения с ливнями, восстановленными по данным детекторов черенковского света для энергий 10^{16} - 10^{17} эВ.

В пятой главе приводится описание новой методики восстановления глубины максимума развития ШАЛ, разработанная при непосредственном участии автора. Получена зависимость средней глубины максимума от энергии первичной частицы.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

Основные научные результаты и их новизна. Основные научные результаты изложены автором в форме защищаемых научных положений:

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 Тунка-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).

Данные научных положений являются обоснованными, доказанными, они сформулированы впервые и являются новыми.

Практическая значимость работы. Научные результаты, полученные автором в процессе подготовки диссертационной работы, разработанные методики применены для обработки данных установки Tunka-Rex и могут быть использованы для обработки данных других установок при регистрации радиосигналов ШАЛ.

Новизна результатов диссертации в том, что разработана оригинальная методика расчета эффективной апертуры антенных решеток, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ. Для обработки экспериментальных данных радиодетектора ШАЛ использована методика выделения сигнала ШАЛ на фоне шума с использованием сверточной нейросети, протестированная на данных установки Tunka-Rex. Также разработана новая методика восстановления глубины максимума ШАЛ с учетом формы его радиоимпульса, позволившая повысить точность восстановления по данным установки Tunka-Rex.

Соответствие научной специальности. Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют направлениям исследований 4, 5 и 7 паспорта специальности 1.3.4. – радиофизика.

Замечания к работе. В целом работа выполнена на высоком уровне, поставленные задачи успешно решены. Диссертация свободна от существенных недостатков, однако необходимо сделать следующие замечания.

1. При описании краткой истории развития исследований космических лучей нет упоминаний о вкладе советских физиков: Вернова, Зацепина, Чудакова и др. При описании исследований радиоизлучения ШАЛ не упоминаются и нет

литературных ссылок на другие установки СССР в Харькове и Якутске, где тоже проводились исследования радиоизлучения.

2. На рис. 3.4 (стр. 67), из подписи не понятно, к какой конфигурации детектора (количество антенн) относится средняя эффективность регистрации, к 2012-2013, 2014-2016 или 2017-2019.

3. В работе имеются опечатки. Отсутствуют запятые после формул перед союзом где, например, на стр. 28.

4. Список литературы оформлен небрежно, с большим числом опечаток. Например, в литературе [15] – текст ссылки дан на английском, а далее идет «кириллица». И так во многих англоязычных ссылках. [16] – отсутствует год публикации, [20] – опечатка; [43] – опечатка; [70] – Vol. написано два раза.

5. Есть замечания к изложению работы, из-за которого местами появляются неудачные формулировки. На стр. 4 «Свойства каскада...», можно было опустить и оставить только то, что в скобках. На стр. 7 в задаче 7: «...сравнить результаты восстановления с результатами восстановления по данным установки Тунка-133, оценить точность восстановления». Стр. 78 «...информацию об абсолютной амплитуде сигнальной дорожки...». В заключении не очень удачная формулировка: «Предложен метод восстановления ФПР этих событий путем когерентного суммирования сигнальных дорожек со сдвигами, соответствующими восстановленным временным отметкам для последующего восстановления энергии первичной частицы». Также, использование терминов, которые, на наш взгляд, являются неудачным переводом с английского языка: «отпечаток ливня», «фитирование». Также, на стр. 22 в пунктах 3 и 5: «изображающих», «не изображающих», «протестирован».

Заключение. Сделанные замечания не влияют существенно на научную и практическую ценность полученных автором результатов и не меняют общей высокой оценки работы. Положения, заложенные в работу для решения поставленных задач, соответствуют современным физическим представлениям. Диссертант принимал активное участие в разработке программного обеспечения для обработки экспериментальных данных и восстановлению параметров ШАЛ, разработал модель апертуры радиодетектора для оценки эффективности установки, также, программного обеспечения для очистки экспериментальных данных от шумов и восстановления исходных сигналов радиоизлучения. Полученные результаты по данным установки Tunka-Rex показывают согласие с измерениями Тунка-133 и других установок. Этим обеспечивается достоверность полученных результатов.

Научная ценность заключается в том, что разработанные методики используются на установке Tunka-Rex и могут быть использованы на других установках по регистрации радиоизлучения ШАЛ.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации опубликованы в российских и международных журналах, входящих в перечень ВАК и базы Web of Science, Scopus, а также были доложены на всероссийских и международных конференциях.

Диссертация П.А. Безъязыкова представляет собой завершённое исследование актуальной научной проблемы, выполненное на высоком уровне, характеризующееся новизной и значимостью, свидетельствует о высокой квалификации автора.

Диссертация Павла Александровича Безъязыкова «Восстановление глубины максимума ШАЛ по данным радиодетектора Tunka-Rex», представленная на

2013 года №842, ред. От 11.09.2021), а сам Павел Александрович Безьязыков заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиоп физика.

Отзыв рассмотрен на расширенном семинаре Лаборатории Широких атмосферных ливней и утвержден на заседании Ученого совета Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук 4 мая 2022 г., протокол №3.

Отзыв подготовили:

ведущий научный сотрудник лаборатории широких атмосферных ливней, доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», с.н.с.

Иванов Анатолий Александрович

ведущий научный сотрудник лаборатории радиоизлучений ионосферы и магнитосферы, кандидат физико-математических наук по специальности 04.00.22 «Геофизика», с.н.с.

Козлов Владимир Ильич

Подписи Козлова В.И. и Иванова А.А. заверяю,
Учёный секретарь ИКФИА СО РАН,
кандидат физико-математических наук
Бондарь Елена Дмитриевна



Сведения о ведущей организации:

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН) – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Почтовый адрес: 677027, г. Якутск, пр. Ленина, д.31, ИКФИА СО РАН
Телефон: +7(4112)390-400. Факс 7 (4112) 390-450. e-mail: ikfia@ysn.ru