

В диссертационный совет Д 24.2.306.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Иркутский Государственный Университет”

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Васильева Романа Валерьевича на диссертацию Безъязыкова Павла Александровича «Восстановление глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. — радиофизика.

Исследование космических лучей — потоков высокоэнергичных элементарных частиц от источников расположенных на значительном удалении от солнечной системы, важное направление фундаментальной науки тесно связанное с физикой элементарных частиц, астрофизикой, устройством вселенной и материи. На текущий момент не существует общепринятой модели возникновения и ускорения наблюдаемых космических лучей высоких и сверхвысоких энергий. Слабые потоки частиц космических лучей требуют приложения значительных усилий для их регистрации, определения энергии и направления прихода. Для этих целей создаются комплексные детекторы, регистрирующие космические лучи по электромагнитному излучению генерируемому каскадами вторичных частиц в атмосфере Земли, возникающими в результате взаимодействия первичной частицы с воздухом. Такие каскады частиц имеют устоявшееся название — широкие атмосферные ливни (ШАЛ).

Диссертация Безъязыкова П.А. посвящена вопросам восстановления глубины максимума развития ШАЛ, инициированных первичными частицами космических лучей с энергиями от 10^{17} до 10^{18} эВ. Работа проведена с использованием результатов наблюдений на установке Tunka-Rex, которая регистрирует импульсы радиоизлучения от ШАЛ генерируемые геосинхротронным механизмом и током электронов возникающим в результате аннигиляции позитронов на лету. По своей сути эта установка является решёткой магнитных антенн ортогональной поляризации. Регистрация радиосигналов принятых антенной решёткой Tunka-Rex ведётся в частотном диапазоне 30-80 МГц при помощи 12-битных АЦП с частотой дискретизации 200 МГц.

Радиометод регистрации ШАЛ был предложен к использованию достаточно давно, однако его практическое применение до недавнего времени было ограничено возможностями аппаратуры. **Актуальность** темы исследования продиктована необходимостью разработки методик обработки данных наблюдений радиоизлучения от ШАЛ, которые позволят восстанавливать параметры ШАЛ с более высокой точностью.

Целью диссертации является разработка комплекса методик обработки радиосигналов от ШАЛ, позволяющих восстанавливать глубину максимума ШАЛ, и применение этих методик для обработки данных наблюдений установки Tunka-Rex. Для достижения поставленной цели автору пришлось решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику расчета эффективности регистрации ШАЛ антенной решеткой, и применить эту методику для расчета эффективной апертуры антенной решетки в зависимости от энергии КЛ.

2. Провести моделирование радиосигналов от ШАЛ с учетом передаточной функции конкретных радиодетекторов.

3. Разработать методику выделения радиосигналов от ШАЛ на фоне шума с использованием технологии свёрточных нейросетей.

4. Разработать методику восстановления энергии первичной частицы по характеристикам найденных радиосигналов от ШАЛ.

5. Определить связь формы радиоимпульса от ШАЛ и глубины максимума ШАЛ.

6. Разработать программное обеспечение, необходимое для внедрения вышеперечисленных методик в процедуру обработки данных Tunka-Rex.

Верификация разработанных методик и точность их работы осуществлялась сопоставлением глубины максимума ШАЛ полученной установкой Tunka-Rex с результатами наблюдения этой характеристики на установке Тунка-133.

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

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

В первой главе проведен обзор истории исследования космических лучей, кратко описана их природа. Достаточно детально описаны механизмы возникновения и эволюции ШАЛ в атмосфере Земли и способы их наблюдения. Также проведен обзор механизмов радиоизлучения ШАЛ, описаны установки регистрирующие космические лучи по радиоизлучению ШАЛ.

Во второй главе проводится детальный обзор детектора Tunka-Rex и сопутствующих установок, работающих в Тункинской астрофизической обсерватории. Приведено подробное описание аппаратуры и программного обеспечения установки Tunka-Rex, а также подходов к обработке данных установки и восстановления параметров первичных частиц.

В третьей главе описан способ определения эффективности регистрации ШАЛ на антенной решетке. Приведено описание модели эффективной апертуры антенной решетки, настройки этой модели и ее верификация при помощи данных установки Tunka-Rex.

В четвертой главе описан подход к выделению радиосигналов ШАЛ на фоне шума с использованием сверточной нейросети архитектуры «автоэнкодер». Описаны принцип работы, архитектура и процесс обучения нейросети. Предложена методика восстановления энергии низкоэнергетичных событий ШАЛ с использованием данных, обработанных нейросетью. Приведена оценка точности методики путем сравнения с результатами наблюдений установки Тунка-133.

В пятой главе приведено описание новой методики восстановления глубины максимума ШАЛ с учетом формы импульса ШАЛ и систематических эффектов, вносимых динамикой атмосферной рефракции. С использованием методики проведено восстановление средней глубины максимума ШАЛ в зависимости от энергии первичной частицы, по данным установки Tunka-Rex. Приведено сравнение результатов восстановления с результатами, полученными на других установках.

В заключении сформулированы основные результаты и подведены итоги проведенного исследования.

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 частиц 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. 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.

Соответствие научной специальности. Тематика и содержание работы диссертационной работы соответствуют направлениям исследований 4, 5 и 7 паспорта специальности 01.03.04. - 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. В процедуре выделения сигнала на фоне шума не проведены измерения фонового уровня радиопомех, что приводит к сложной процедуре оценки соотношения сигнал/шум и процедуре определения порога срабатывания.

2. Автор пишет: «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.» При каком уровне шума выделяется сигнал ШАЛ? На сколько амплитуда шума может превышать амплитуду ШАЛ для успешного выделения сигнала от ливня? Кроме этого рисунок 4.6 содержит примеры корректного и некорректного срабатывания обученной нейронной сети, но на них нет никакой информации о том какова доля ложных срабатываний по отношению к корректным. Иными словами утверждение не имеет статистического подкрепления, а визуальное содержимое рисунка 4.6 не позволяет подтвердить достоверность сделанного утверждения.

3. Автор пишет: «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.» Ранее автор упоминает, что рассматриваются два эффекта радиоизлучения: дипольное расщепление в геомагнитном поле и ток отрицательных электронов в результате аннигиляции позитронов на лету. Если первый механизм приводит к линейной поляризации излучения, привязанной к геомагнитному полю, то второй приводит к радиальной поляризации. Радиальная поляризация на описанном антенном поле (ортогональные рамки) будет давать различные вклады в сигналы антенн одинаковой поляризации, в зависимости от местоположения оси ливня. Таким образом, когерентное суммирование применяемое автором должно производиться с учётом положения оси ливня. Если не учитывать положение оси, то когерентное суммирование будет неэффективным. В качестве иллюстрации сказанному, можно привести сигналы рисунка 4.9., слева. Очевидно, что полярность сигнала первой сверху дорожки не совпадает с полярностью сигналов остальных дорожек, что приводит к неэффективному когерентному суммированию.

Кроме этих замечаний в тексте работы был обнаружен ряд опечаток и стилистических неточностей.

Стр. 18. ...(порядка < ГэВ)... не очень удачное ограничение порядка ГэВ или меньше ГэВ.

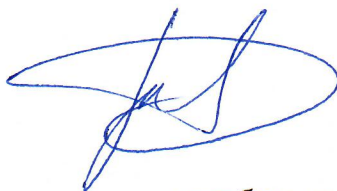
Стр. 21. Пропущено слово или неудачно построенное предложение «В последние годы точность восстановления параметров ШАЛ, достигаемая с использованием данных детекторов частиц, сопоставима с точностью, достигаемой детекторами, регистрирующими оптическое изображение ливня[50].»

Стр. 23. В предложении: «...КЛ высокой энергии входит в атмосферу и...» скорее всего следует изменить на «...частица КЛ высокой энергии входит в атмосферу и...»

Стр. 23. В предложении: «Пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы или распадаться, образуя мюонную и электронно-фотонную компоненты.», «ядрами атмосферы» лучше заменить на: «...ядрами атомов газовых компонент атмосферы...».

Заключение. Сделанные замечания не влияют существенно на научную и практическую значимость выполненной работы и полученных результатов. Положения, заложенные в работу для выполнения поставленных задач, соответствуют современным физическим представлениям. Результаты работы показывают согласие с результатами, полученными на других экспериментах, что обеспечивает их достоверность. Полученные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях, в том числе из списков ВАК, Web of Science и Scopus. Диссертация Безъязыкова П.А. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне, характеризуется новизной и значимостью. Диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года №335. Автор заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. - радиопизика.

Официальный оппонент



13 мая 2022 г

Васильев Роман Валерьевич

к.ф.-м.н. по специальности 01.04.01

«приборы и методы экспериментальной физики»,

заведующий лабораторией

Института солнечно-земной физики

Сибирского отделения

Российской Академии наук

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

телефон: +7(3952) 56 45 77

e-mail: roman_vasilyev@iszf.irk.ru

Подпись Васильева Р. В. заверяю



И.И. Салахутдинова

к.ф.-м.н.

ученый секретарь ИСЗФ СО РАН