

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 24.2.306.01 НА БАЗЕ
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Иркутский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
по диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета
от «31» мая 2022 г. №4

О присуждении Безъязыкову Павлу Александровичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Восстановление глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex» по специальности 1.3.4 – «Радиофизика» принята к защите 22 марта 2022 г., диссертационным советом Д 24.2.306.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20, приказ Рособнадзора о создании диссертационного совета № 1634–894 от 13.07.2007 г.).

Соискатель — Безъязыков Павел Александрович 1992 года рождения. В 2015 г. окончил специалитет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» (ИГУ) по направлению подготовки 210104.65 – Микроэлектроника и твердотельная электроника, в 2020 г. окончил аспирантуру ИГУ по направлению подготовки 1.3.4 - Радиофизика. Сдал кандидатские экзамены по этой специальности.

В период подготовки диссертации соискатель П.А. Безъязыков работал в НИИПФ ИГУ в должностях лаборанта, инженера и младшего научного сотрудника; в настоящее время является научным сотрудником лаборатории астрофизики элементарных частиц и гамма-астрономии.

Диссертация выполнена в лаборатории астрофизики элементарных частиц и гамма-астрономии Научно-исследовательского Института Прикладной Физики Иркутского Государственного Университета (НИИПФ ИГУ)

Научный руководитель – Буднев Николай Михайлович, д.ф.-м.н., снс, декан физического факультета ИГУ, заведующий лабораторией астрофизики элементарных частиц и гамма-астрономии НИИПФ ИГУ.

Официальные оппоненты:

Щепетов Александр Леонидович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), ведущий научный сотрудник лаборатории космических лучей и атмосферных процессов;

Васильев Роман Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), заведующий лабораторией физики нижней и средней атмосферы отдела физики околоземного космического пространства;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН) - в своем положительном заключении, подписанном Ивановым Анатолием Александровичем, доктором физико-математических наук (05.13.18 «Математическом моделирование, численные методы и комплексы программ»), ведущим научным сотрудником лаборатории широких атмосферных ливней, и Козловым Владимиром Ильичом, кандидатом физико-математических наук (04.00.22 – «Геофизика»), ведущим научным сотрудником лаборатории радиоизлучения ионосферы и магнитосферы, указала, что доклад П.А. Безъязыкова был заслушан на расширенном семинаре Лаборатории Широких атмосферных ливней и утвержден на заседании Ученого совета ИКФИА СО РАН, представленная диссертация представляет собой завершенное исследование актуальной научной проблемы и удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.,

ред. от 11.09.2021), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Безъязыков Павел Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - «Радиофизика».

Основные результаты научной деятельности по теме диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 4 публикации в журналах, включенных ВАК РФ в «Перечень ведущих рецензируемых журналов», индексируемых в системе Web of Science и Scopus. Ряд публикаций индексирован в системе РИНЦ. В работах представлены результаты по моделированию апертуры антенной решетки, регистрирующей радиоизлучение широких атмосферных ливней (ШАЛ), восстановлению формы импульса ШАЛ на фоне шума и восстановлению характеристик ШАЛ по экспериментальным данным. В диссертации не обнаружены недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, авторском вкладе и объеме научных изданий.

Наиболее значимые научные публикации по теме диссертации:

1. *Повышение точности восстановления максимума ливня в эксперименте Tunka Radio Extension*, П. Безъязыков и др. // Известия РАН, серия физическая (2019) Т. 83, No 8. С. 1099—1101.

Q3, импакт-фактор 0.726

2. *Улучшение восстановления сигнала при помощи согласованной фильтрации и нейронных сетей для эксперимента Tunka-Rex*, П. Безъязыков и др. // Известия РАН, серия физическая (2019) Т. 83, No 8. С. 1114—1116.

Q3, импакт-фактор 0.726

3. *Radio measurements of the energy and the depth of the shower maximum of cosmic-ray air showers by Tunka-Rex*, P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration) // JCAP (2016) Vol. 1601, No. 01. P. 052 arXiv:1509.05652 [hep-ex].

Q2, импакт-фактор 5.839

4. *Reconstruction of cosmic-ray air-showers with Tunka-Rex data using template fitting of radio pulses*, P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration) // Phys. Rev (2018) Vol. D97, No. 12. P. 122004, arXiv: 1803.06862 [astro-ph.IM].

Q2, импакт-фактор 5.22

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

6. *Advanced Signal Reconstruction in Tunka-Rex with Matched Filtering and Deep Learning* P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration) // 3rd International Workshop on Data Life Cycle in Physics (DLC-2019) Irkutsk, Russia, April 2-7, 2019. arXiv: 1906.10947 [astro-ph.IM].

7. *Detector efficiency and exposure of Tunka-Rex for cosmic-ray air showers*, O. Fedorov, P. Bezyazeev et al. (Tunka-Rex collaboration) // ICRC2017 proceedings. ICRC2017. — 2017. — PoS (ICRC 2017) 387. — eprint: 1712.00974.

На диссертацию поступили отзывы:

Официальный оппонент Щепетов Александр Леонидович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), ведущий научный сотрудник лаборатории космических лучей и атмосферных процессов.

Замечание:

Чрезмерно сжатое изложение и большое количество опущенных деталей, местами затрудняющее понимание представленных в диссертации результатов.

Официальный оппонент Васильев Роман Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), заведующий лабораторией физики нижней и средней атмосферы отдела физики околоземного космического пространства.

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 визуально 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.

4. Ряд опечаток и стилистических неточностей: Стр. 18: ...(порядка $< \text{ГэВ}$)... 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...» На той же странице 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...».

Ведущая организация – Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН).

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 2012-2012, 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 количеством 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, полученными на установке по данным установки Тунка-133, оценить точность восстановления» и др.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их достижений в области радиифизики и исследования ШАЛ, наличием публикаций по данному направлению, а также способностью определить научную и практическую значимость диссертационной работы. Официальный оппонент доктор физико-математических наук *Щенетов А.Л.* – высококвалифицированный специалист в области астрофизики высоких энергий, имеет более 80 научных публикаций, включая 41 статью в изданиях, индексируемых в системах Web of Science и Scopus. Официальный оппонент кандидат физико-математических наук *Васильев Р.В.* – высококвалифицированный специалист по радиофизике, имеет 175 научных публикаций в области радиофизики, включая 67 статей в изданиях, индексируемых в системах Web of Science и Scopus. Ведущая организация – *Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук* – научное учреждение, широко известное своими работами в области астрофизики и радиофизики.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **разработаны** модель расчета энергетической и угловой зависимости эффективности регистрации радиоизлучения ШАЛ антенной решеткой и методика выделения сигнала ШАЛ на фоне шума с использованием сверточных нейросетей. **Предложена** оригинальная методика восстановления глубины максимума ШАЛ по данным антенной решетки, учитывающая форму радиоимпульса ШАЛ. Разработанные методики проверены на данных совместных измерений установок Tunka-Rex и Tunka-133. Полученные результаты находятся в согласии с экспериментальными данными, результатами независимого восстановления по данным установки Tunka-133, а также с результатами, полученными в других экспериментах.

Теоретическая значимость. Методика восстановления глубины максимума ШАЛ, предложенная в данной работе, учитывает большее число характеристик в сравнении с методикой, использовавшейся ранее. Так, если при предыдущем анализе данных как установки Tunka-Rex, так и конкурирующих установок схожей конструкции (например, AERA) восстановление параметров ШАЛ фокусировалось в основном на анализе функции пространственного распределения зарегистрированного радиоизлучения, то в настоящей работе учитывается также форма за-

регистрованного радиоимпульса и динамика рефракции радиосигналов в атмосфере. Такой подход позволяет повысить точность восстанавливаемых параметров ШАЛ по данным о его радиоизлучения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики. Полученные в работе результаты могут быть использованы для обработки данных как существующих, так и создаваемых установок для регистрации ШАЛ с использованием радиометода. Точность восстановления глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex с использованием предложенных методик улучшилась со среднего значения 38 г/см² до 25-35 г/см² в зависимости от энергии первичной частицы. Разработанные методики легко адаптируются для обработки данных других установок. Так, в настоящее время в экспериментах AERA и Ice-Top уже используются результаты, полученные в ходе этого исследования.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что полученные в диссертационном исследовании результаты являются достоверными. Это обеспечено воспроизводимостью полученных результатов и их согласием с результатами, полученными в других экспериментах. **Выводы базируются** на обобщении результатов экспериментов и теоретических расчетов; **использованы** современные методики сбора, обработки и визуализации данных.

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие в развертывании, обслуживании, технической поддержке и проведении измерений на установке Tunka-Rex, разработке базовой методики восстановления параметров ШАЛ по данным установки Tunka-Rex. Им лично создано программное обеспечение для обработки экспериментальных данных и восстановления параметров ШАЛ, разработана модель апертуры радиодетектора, разработано и отлажено программное обеспечение для очистки экспериментальных данных от шумов и восстановления исходных сигналов, разработана методика восстановления глубины максимума ШАЛ. Результаты, вынесенные на публичную защиту и сформулированные в защищаемых положениях, получены лично автором.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация Безъязыкова П.А. является законченным научным исследованием, выполненным по актуальной тематике, результаты которого имеют высокую научную и практическую

значимость. Работа соответствует специальности 1.3.4 – «Радиофизика» и п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., ред. от 11.09.2021, а также отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 31 мая 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Безязыкову П.А. учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 4 доктора по специальности 1.3.4 – «Радиофизика», участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в совет, проголосовали: за – 15, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета Д 24.2.306.01,
доктор физико-математических наук,
профессор

Афанасьев Николай Тихонович

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 24.2.306.01,
доктор физико-математических наук,
профессор



Аграфонов Юрий Васильевич

31 мая 2022 г.