

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Безъязыкова Павла Александровича

«Восстановление глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.04 — радиопизика.

Космические лучи — потоки протонов, ядер и гамма-квантов, поступающие на Землю извне, — продолжают оставаться важным источником информации о свойствах ядерного взаимодействия при высоких, в том числе недостижимых на современных ускорителях, энергиях, а также о характеристиках галактического и межгалактического пространства, в котором происходит их распространение. Следует отметить, что в настоящее время не существует единого, общепринятого, мнения как о природе возможных объектов-источников космических лучей и физических процессов, обеспечивающих ускорение частиц вплоть до максимальных наблюдаемых энергий $\sim(10^{19}-10^{20})$ эВ, так и о происхождении характерных особенностей, обнаруженных в их энергетическом спектре. Таким образом, новые экспериментальные данные о космических лучах высокой энергии необходимы для решения многих проблем, лежащих на стыке ядерной физики, физики элементарных частиц, астрофизики, астрономии, что обуславливает **актуальность** их дальнейшего исследования в настоящую эпоху. Одно из направлений таких исследований — регистрация импульсов радио-излучения, генерируемых заряженной компонентой каскадных ливней, которые образуются при взаимодействии энергичных частиц космических лучей с веществом атмосферы (т. н. широкие атмосферные ливни, ШАЛ), — составляет **предмет** рассматриваемой диссертационной работы.

Диссертация хорошо структурирована логически. В **первой**, вводной, главе, дан общий обзор природы космических лучей и истории их исследований, а также обосновано использование метода регистрации ШАЛ как единственного практически доступного средства для экспериментального изучения космических лучей сверхвысокой энергии, начиная от $\sim(10^{14}-10^{15})$ эВ и выше. Перечислены достоинства и недостатки различных методик исследования ШАЛ: распределенных детекторных систем для непосредственной регистрации заряженных частиц ливня, детекторов черенковского и флуоресцентного излучения в оптическом (видимый и ближний

ультрафиолет) диапазоне длин волн, детекторов радио-излучения. Объяснены физические эффекты, приводящие к генерации кратковременных импульсов радио-излучения при прохождении заряженных частиц фронта ШАЛ, и представлены соображения в пользу перспективности подхода, основанного на регистрации таких импульсов, к задаче исследования ШАЛ: тесная корреляция амплитуды регистрируемого сигнала с общим числом частиц в максимуме развития ливня N_e (а как следствие и с энергией E_0 породившей ливень первичной частицы космических лучей), независимость измерений от погодных условий и времени суток, относительно низкая, по сравнению с другими методами регистрации ШАЛ, стоимость отдельных элементов антенной установки, позволяющая создавать детекторы большой площади, которые необходимы для исследования космических лучей предельно высоких энергий, $E_0 > 10^{18}$ эВ. Отмечено, что, хотя механизмы генерации радиоизлучения частицами ШАЛ были теоретически понятны уже в 1960–1970-х годах, и такие импульсы были действительно обнаружены в ливневых экспериментах того времени, практическое применение этой методики в дальнейшем не получило развития из-за чрезвычайно высокого уровня антропогенных помех, а также атмосферных, ионосферных и космических шумов, сильно осложняющих выделение полезного радио-сигнала ШАЛ. Лишь с начала 2000-х годов достигнутый уровень развития электроники, вычислительной техники, искусственного интеллекта, современных методов математического моделирования и цифровой обработки сигналов обеспечил дальнейший прогресс в развитии радио-метода исследования ШАЛ. Во **второй** главе, которая также носит обзорный характер, представлены различные системы детекторов, обеспечивающих регистрацию ШАЛ на научном полигоне Тунка, который служил экспериментальной базой для выполнения рассматриваемой диссертационной работы. В частности, здесь описано расширение (extention) комплекса ливневых детекторов Тунка системой антенн для приема радио-сигналов от ШАЛ — Tunka-Rex, а также разработанные для этого эксперимента алгоритмы анализа аналоговых записей сигналов (осциллограмм), зарегистрированных в антенных каналах. Отмечено, что именно в эксперименте Tunka-Rex впервые в мировой практике удалось одновременно и независимо определить энергетический спектр и массовый состав космических лучей как по информации от установки традиционного типа (Тунка-133 — система оптических детекторов для регистрации черенковского излучения ШАЛ), так и по

сигналам радио-излучения ШАЛ, причем обе серии результатов продемонстрировали хорошую корреляцию друг с другом.

Непосредственное изложение результатов, полученных автором в ходе выполнения рассматриваемой диссертационной работы, начинается с **третьей** главы. Здесь представлена разработанная автором расчетная модель для определения эффективной апертуры применяемых в эксперименте Tunka-Rex антенных систем. Знание такой апертуры необходимо для абсолютной нормировки распределений, построенных для зарегистрированных на установке ливневых событий, и их корректного сопоставления с результатами других экспериментов. Эффективность основанной на регистрации радио-сигналов установки зависит от большого числа независимых параметров, в первую очередь включающих в себя геометрический фактор: общий размер установки и плотность расположения антенных групп по ее площади. Свое влияние на эффективность оказывают также диаграмма направленности и угловая чувствительность антенных станций, выбранная полоса частот, характерные уровни шума, качество сигнальной цепи, характеристики системы сбора данных, методики выделения полезного сигнала на фоне шума и другие параметры. Кроме того, эффективность установки зависит и от индивидуальных характеристик породившей ШАЛ первичной частицы космических лучей: зенитного и геомагнитного углов ее траектории, расположения оси ШАЛ относительно центра антенной системы, энергии E_0 , от которой зависит суммарное число заряженных частиц в ливне N_e , и массового числа A , которое определяет положение максимума развития ливня над уровнем наблюдения. Разработанная автором диссертации расчетная модель позволяет корректно учитывать влияние всех этих разнообразных факторов. Модель была успешно протестирована путем сравнения предсказанных ею вероятностей регистрации ШАЛ с числом ливней, реально регистрировавшихся в экспериментах на установке Tunka-Rex.

Четвертая глава диссертации посвящена применению современных технологий глубокого обучения (deep learning) к задаче, связанной с обработкой записей радио-излучения от детекторов установки Tunka-Rex, в которой остро стоит вопрос о выделении импульсного сигнала ШАЛ на фоне сравнимых с ним по мощности шумовых помех. Проблема дополнительно осложняется тем, что в случае ливневых экспериментов как суммарная интенсивность помех, так и специфические особенности их частотного спектра сильно меняются с течением времени, а сами спектры имеют

вид, близкий к степенному, то есть весьма отличны от белого шума, что делает малоэффективными аналитические методы цифровой фильтрации. Известно, что для решения подобных задач более подходящим может оказаться использование искусственных нейронных сетей класса autoencoder, архитектура которых предусматривает регулярное уменьшение размерности промежуточных слоев нейронов в направлении от входного слоя к середине сети (кодирующая часть, encoder), с последующим ее увеличением, вплоть до величины, идентичной входной размерности, от середины к выходному слою (decoder). Такая архитектура автоматически обеспечивает последовательное кодирование и декодирование входных данных при передаче их через сеть, с результирующим понижением мощности стохастических помех. Сеть может быть обучена путем подачи на ее вход истинных импульсных сигналов от радио-детекторов ливневой установки с наложенным на них шумовым фоном и сравнения выходных данных сети с теми же импульсами без шумового сигнала. Автором диссертационной работы была подобрана оптимальная конфигурация нейронной сети и создана эффективная методика ее обучения и тестирования на модельных и реальных данных установки Tunka-Rex. Для решения этой задачи использовались современные библиотеки программ глубокого обучения TensorFlow и Keras, а модельные сигналы для обучения сети генерировались на основе пакета CoREAS. В результате было показано, что нейронная сеть с оптимизированной для данной задачи конфигурацией способна эффективно выделять радио-импульс ШАЛ на фоне сильно зашумленных сигналов, поступающих от антенных усилителей установки Tunka-Rex. Эффективное возрастание отношения сигнал/шум при передаче сигнала через сеть позволяет существенно снизить энергетический порог анализируемых ШАЛ и получить адекватные результаты при обработке ливневых событий с первичной энергией порядка $\sim 10^{16}$ эВ, вместо обычных для радио-метода минимальных значений энергии $E_0 \sim 10^{17}$ эВ. Корректность оценок, полученных для параметров ШАЛ малой энергии, которые были получены в результате применения нейронной сети к анализу радио-данных, была протестирована путем их сравнения с аналогичными характеристиками, следующими для тех же ШАЛ из данных установки Tunka-133 традиционного типа (система детекторов для регистрации черенковского излучения). В результате получена удовлетворительная корреляция между оценками этих двух типов.

Предмет **пятой** главы диссертации составляет новая методика обработки получаемых с помощью детектора Tunka-Rex данных, которая создавалась при

непосредственном участии автора и, в отличие от ранее применявшихся методов, предполагает детальный анализ формы аналогового радио-сигнала. Новый метод основан на аппроксимации огибающей импульса радиоизлучения в каждом зарегистрированном событии набором стандартных модельных шаблонов, рассчитанных для различных комбинаций первичной энергии E_0 и глубины максимума развития ливня в атмосфере X_{max} . В совокупности с учетом систематических эффектов, вносимых вариациями параметров атмосферы, эта процедура существенно повышает точность определения глубины максимума развития ШАЛ по радио-данным, уменьшая стандартное отклонение оценок X_{max} практически до величины, характерной для основанной на детекторах черенковского излучения установки Тунка-133. В ходе выполнения работы были построены энергетические зависимости средней глубины максимума $X_{max}(E_0)$, полученные в области первичных энергий $E_0=(10^{17}-10^{18})$ эВ для ШАЛ, регистрировавшихся на двух типах ливневых установок, Tunka-Rex и Тунка-133, и отмечено хорошее согласие между этими группами результатов, а также опубликованными данными других экспериментов (LOFAR, Auger).

Таким образом, можно констатировать, что **достоверность** всех результатов, достигнутых в настоящей диссертационной работе на основе развиваемого в ней метода регистрации ШАЛ по радио-излучению, адекватно подтверждена их сравнением с аналогичными данными, полученными с помощью других, независимых, методик. При этом автором был достигнут ряд важных **новых** результатов: разработана математическая модель для расчета эффективной площади системы ливневых детекторов, основанной на регистрации импульса радио-излучения от частиц ШАЛ, определена конфигурация нейронной сети, позволяющей эффективно выделять импульсный радио-сигнал ШАЛ на фоне интенсивных помех и существенно снизить энергетический порог для регистрации ливневых событий по их радио-излучению, и, наконец, предложена оригинальная процедура обработки аналоговых записей формы радио-импульса для определения глубины максимума развития ШАЛ в атмосфере X_{max} .

В свою очередь, глубина максимума X_{max} представляет собой один из ключевых параметров, на основе статистического распределения которых по ансамблю ливневых событий делается вывод о массовом распределении частиц космических лучей, а следовательно и о природе возможных объектов-источников этих частиц в космосе и процессах их ускорения в различных диапазонах первичной энергии E_0 . Поэтому достигнутое повышение точности в определении глубины X_{max} имеет большую

практическую значимость для физики космических лучей. Помимо этого, большое значение имеет внесенный автором вклад в дальнейшее развитие техники регистрации ШАЛ по радио-излучению их заряженной компоненты, практическое применение которой представляется весьма перспективным средством исследования космических лучей как в составе комплекса детекторов Тунка, так и на других ливневых установках в силу ряда присущих этому методу уникальных достоинств. К последним можно отнести возможность создания антенных установок большой площади с непрерывным периодом эффективной работы, что позволяет исследовать спектр космических лучей в области предельно больших энергий. Немаловажным является то обстоятельство, что при использовании радио-метода практически реализуется калориметрический подход к регистрации ШАЛ, поскольку существует непосредственная связь между амплитудой регистрируемого сигнала, размером ливня N_e и энергией E_0 первичной частицы космических лучей. Наконец, особо ценна возможность применения данного метода для взаимной абсолютной калибровки экспериментальных данных, полученных на различных ливневых установках. В частности, методики, разработанные с участием автора для установки Tunka-Rex, предполагается использовать при обработке информации, полученной от детекторов радио-расширения комплексной установки космических лучей на Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН.

Все достигнутые в ходе выполнения рассматриваемой работы результаты были опубликованы в реферируемых научных журналах и адекватно представлены в пунктах, выносимых на защиту. Содержание автореферата полностью соответствует основному тексту диссертации. При обработке полученных от экспериментальной установки результатов измерений автор продемонстрировал квалифицированное владение весьма широким кругом современных математических методов и программных средств для работы с данными.

К недостаткам работы следует отнести чрезмерно сжатое изложение и большое количество опущенных деталей, местами затрудняющее понимание представленных в ней результатов.

Отмеченный недостаток не влияет на общую высокую оценку диссертационной работы. Основываясь на современных методах цифрового анализа импульсов радио-излучения, которые генерируются заряженной компонентой ШАЛ, автор внес существенный вклад в дальнейшее развитие ведущихся на Тункинском полигоне экспериментальных исследований ядерного состава космических лучей.

Диссертационная работа П. А. Безъязыкова «Восстановление глубины максимума ШАЛ по данным установки Tunka-Rex» соответствует паспорту специальности 01.03.04 — радиофизика и удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года №335, а ее автор Безъязыков Павел Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.04 — радиофизика.

18 апреля 2022 г

Официальный оппонент:



Щепетов Александр Леонидович
д. ф.-м. н. по специальности 01.04.01
«приборы и методы экспериментальной физики»,
ведущий научный сотрудник
Физического института им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук.

119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 53, ФИАН

телефон: +7 (499) 135 1429, +7 (499) 135 4264.

e-mail: ashep@tien-shan.org

ПОДПИСЬ



ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ДИРЕКТОРА



Савинов С.Ю.