

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Куринова Кирилла Олеговича «Изучение энергетического спектра космических лучей в области энергий 10-100 ПэВ с использованием нейтронной компоненты ШАЛ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

**Актуальность темы** диссертационного исследования не вызывает сомнений, т.к. регистрация тепловых нейтронов, рождающихся в результате ядерных реакций, происходящих не только в атмосфере в результате развития широких атмосферных ливней (ШАЛ), но и в окружающей среде (почве, зданиях), а также в рабочем объеме детекторов, открывает новые перспективы изучения адронной компоненты ШАЛ. Данные электронно-нейтронного детектора (эн-детектора), созданного для решения этой задачи, позволяют, как следует из названия, проводить исследования энергетического спектра первичных космических лучей, используя информацию как по нейтронной, так и по электромагнитной компоненте. Совместный анализ этих данных может помочь дать более точную астрофизическую интерпретацию ключевой наблюдаемой особенности спектра первичных космических лучей — излома при энергии  $\sim 3$  ПэВ.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, словаря терминов, списка иллюстраций, списка таблиц и списка литературы из 84 наименований. Объем диссертации составляет 126 страниц.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, дан краткий обзор литературы, сформулированы цели и задачи, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится описание экспериментальной базы исследования. Даются характеристики установок ENDA-LHAASO и ENDA-INR, оснащенных сетью эн-детекторов. Обсуждается методика регистрации нейтронной и электромагнитной компонент ШАЛ. Приводятся характеристики осциллограмм событий ШАЛ, используемых в дальнейшей работе для формирования выборок данных машинного обучения.

**Вторая глава** посвящена изложению основных положений предлагаемого нового метода выделения нейтронных импульсов для эн-детекторов с

применением методов глубокого машинного обучения. Представлены результаты обработки с использованием сверточных нейронных сетей данных эн-детекторов установки ENDA-INR, полученных за 11 месяцев работы. Проведено сравнение результатов предлагаемой методики с результатами базисного метода, применяемого на установке в настоящее время. Главным результатом главы является вывод о том, что предлагаемая методика на тестовой выборке данных показывает лучшее качество выделения нейтронных событий по сравнению с базисным методом.

В **третьей главе** приводятся результаты моделирования ШАЛ с использованием принятого в этой области исследований кода CORSIKA, а также отклика детекторов от прохождения ШАЛ в атмосфере. Соискателем предложено два способа решения второй задачи: с использованием стандартного пакета моделирования детектора Geant4 и с использованием разработанной авторской программы быстрого Монте-Карло моделирования. В работе указано, что результаты расчетов, полученные с использованием авторской программы с меньшими в  $\sim 2000$  раз временными затратами, хорошо согласуются с результатами пакета Geant4, которые в исследовании считались эталонными. По данным моделирования получена функция пространственного распределения (ФПР) тепловых нейтронов в ШАЛ, а также интегральный спектр по числу нейтронов в ливне.

В **четвертой главе** решалась задача получения количественных оценок точности реконструкции параметров ливня (направление прихода и положение оси ливня, полное число адронов и заряженных частиц) в рамках базисного подхода и предлагаемого нового подхода с использованием методов машинного обучения. Показано, что использование информации о нейтронной компоненте ШАЛ позволяет уменьшить ошибку восстановления положения оси ливня в  $\sim 4$  раза. Предложен метод реконструкции энергии первичной частицы с использованием данных о нейтронной компоненте ШАЛ с оценкой неопределенности такого восстановления с использованием методов машинного обучения. Показано, что такой подход позволяет улучшить качество восстановления энергии первичных частиц на  $\sim 10.5\%$ .

В **пятой главе** с использованием предлагаемых в работе методик по экспериментальным данным эксперимента ENDA-INR проведены расчеты ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ. Показано, что полученные ФПР хорошо согласуются с результатами моделирования и с результатом установки PRISMA-32. По данным эксперимента ENDA-INR получен интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ. Установлено, что показатель спектра равен

~2.0, что согласуется с результатами PRISMA-32, PRISMA-YBJ и с результатом эксперимента KASCADE для спектра по числу адронов.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации.

**Степень обоснованности выводов, их достоверность и новизна.** Результаты, полученные в диссертационном исследовании, в научном отношении являются новыми. Их достоверность обеспечена сопоставлением с имеющимися экспериментальными данными, результатами моделирования с использованием широко известных программных продуктов, верифицированных в многочисленных независимых исследованиях. Сформулированные выводы не противоречат научным концепциям и устоявшимся положениям, принятым мировым научным сообществом в данной области исследования. Основные научные положения и выводы работы обоснованы, подтверждены теоретическими расчетами и экспериментальными результатами.

**Ценность работы для теории и практики** обусловлена тем, что впервые для решения фундаментальной научной проблемы, связанной с восстановлением энергетического спектра космических лучей в области ПэВ-ных энергий, предложена оригинальная методика, основанная на регистрации задержанных тепловых нейтронов ШАЛ и восстановлении параметров ливней и первичного космического излучения с использованием методов глубокого машинного обучения. Предлагаемый подход позволяет повысить точность восстановления энергии первичных частиц более чем на ~10%.

**По степени опубликованности результатов** диссертационная работа соответствует требованиям ВАК. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и приравненных к ним, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Аннотация по своему содержанию в целом соответствует диссертации.

Вместе с тем, при ознакомлении с диссертацией и аннотацией у оппонента возник ряд вопросов и замечаний.

1. Во второй главе диссертации предлагается новая методика выделения нейтронных импульсов с применением сверточных нейронных сетей. Одним из финальных шагов реализации предлагаемого соискателем алгоритма является понижение размерности данных методом стохастического вложения соседей с t-распределением (t-SNE) до двух, что в конечном итоге позволяет

приписать вероятность принадлежности каждого исследуемого импульса (эмбединга) к заряженной или нейтронной компоненте. Результат t-SNE представления показан на рисунке 2.5. Однако из этого рисунка создается впечатление, что принадлежность эмбедингов к заряженной или нейтронной компоненте известна еще до преобразования t-SNE. Хотелось бы получить более подробное пояснение этого этапа работы алгоритма.

2. Методы машинного обучения использовались также в 4 главе, например, при восстановлении направления прихода ливня. Признаками обучения выступали времена срабатывания всех 16 эн-детекторов. Не совсем понятно, откуда берутся значения целевой функции. В параграфе 4.3.1 (стр. 60, третий абзац) приводится непонятная фраза «Для поиска лучшего алгоритма реконструкции было проведено сравнение распределений по углу отклонения  $\psi$  восстановленного вектора прихода от истинного для.» Что означает «для»? Откуда взято истинное направление прихода ливня?

3. Создается впечатление, что структура работы не совсем логична. Возможно первые 4 параграфа главы 5, в которых обсуждаются детали обработки экспериментальных данных, следовало бы поместить в главу 1. Например, на рисунках 1.6 и 1.7 по смыслу показано то же самое, что на рисунках 5.7 и 5.8.

4. В параграфе 4.2.2 главы 4 (стр. 47) приведена функция пространственного распределения заряженных частиц (4.6) статьи [48]. Однако, в работе [48] нет этого результата.

5. Диссертация нацелена на изучение энергетического спектра космических лучей в области энергий 10-100 ПэВ с использованием нейтронной компоненты ШАЛ. Однако, в работе отсутствует обсуждение полученных результатов по спектру всех частиц в указанной области энергий.

6. В автореферате на стр. 11 и 13 указывается, что «в тексте приводится ...», «далее текст посвящен ...», «далее в тексте приводится ...». В каком тексте? В диссертации?

**Заключение.** Результаты диссертационного исследования К.О. Куринова соответствуют пунктам 4, 8 и 13 паспорта научной специальности 1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Анализ содержания работы свидетельствует о том, что диссертация К.О. Куринова является законченным научным исследованием имеющим все перспективы для внедрения полученных в ней результатов в качестве дополнительной или альтернативной методики обработки экспериментальных данных установки ENDA-INR. Высокий научный уровень и полученные

оригинальные результаты свидетельствуют о соответствии диссертации требованиям положения «О Порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Кирилл Олегович Куринов, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой радиофизики и  
теоретической физики федерального  
государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Алтайский  
государственный университет»,  
656049, Россия, Алтайский край,  
г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61,  
тел. +7 (3852) 296-668,  
e-mail: lagutin@theory.asu.ru,  
доктор физико-математических наук по  
специальности 01.04.16 – физика  
атомного ядра и элементарных частиц,  
профессор

Лагутин Анатолий Алексеевич

09.02.2026 г.

Подпись удостоверяю

Начальник управления документационного обеспечения  
Шехтман Татьяна Анатольевна

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Lagutin A.A. Spectra of Protons and Helium Nuclei from Tevatrons Recorded in Satellite Experiments: Indication of Nonclassical Nature of Cosmic Ray Diffusion //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2025. – Vol. 89, No. 6. – Pp. 928-932.
2. Lagutin A.A. Where are the Pevatrons that Form the Knee in the Spectrum of the Cosmic Ray Nucleon Component around 4 PeV? //Physics of Atomic Nuclei, 2023. – Vol. 86, No. 6. – Pp. 1076-1082.
3. Lagutin A.A. Interpretation of Fluxes of Cosmic-Ray Nuclei and Electrons within a Nonclassical Diffusion Model //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023. – Vol. 87, No. 7. – Pp. 878-883.
4. Lagutin A.A. New Break Near 10 TeV in the Energy Spectrum of Protons According to Data from Space-Based Instruments: Astrophysical Interpretation //Physics of Atomic Nuclei, 2023. – Vol. 86, No. 6. – Pp. 1069-1075.
5. Lagutin A.A. Restoration of the All-Weather Mode of the AIRS/AMSU Hyperspectral System of the AQUA Satellite Using the ATMS Microwave Radiometer of the SUOMI-NPP and NOAA-20 Satellites // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2022. – Vol. 58, No. 2. – Pp. 180-187.

