

## ОТЗЫВ

официального оппонента Держача Д. А.

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

Работа Куринова Кирилла Олеговича выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Диссертационное исследование посвящено актуальной задаче физики космических лучей — изучению энергетического спектра первичного космического излучения в области энергий 10–100 ПэВ с использованием нейтронной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). В основе работы лежит применение современных методов машинного обучения для обработки данных установки ENDA-INR.

Актуальность темы не вызывает сомнений. Исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей в области «колена» (~4 ПэВ) является ключевым для понимания механизмов ускорения и природы источников космических лучей. Предложенный автором метод регистрации адронной компоненты ШАЛ через тепловые нейтроны, а также применение алгоритмов машинного обучения для анализа данных, соответствует современным тенденциям развития экспериментальной физики высоких энергий.

**Анализ содержания работы.** Автореферат структурирован в соответствии с требованиями. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список литературы. Объём работы — 126 страниц, содержит 84 источника.

*Во введении* обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения об апробации и публикациях.

*Первая глава* посвящена описанию установки ENDA-LHAASO и её прототипа ENDA-INR, принципов работы электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов) и методики регистрации тепловых нейтронов.

*Во второй главе* представлен разработанный автором метод выделения сигналов от тепловых нейтронов с использованием свёрточной нейронной сети (CNN), показано значительное улучшение качества классификации по сравнению с базовым алгоритмом.

*Третья глава* описывает моделирование эксперимента, включая программы CORSIKA и Geant4, а также создание быстрого Монте-Карло моделирования отклика установки.

*Четвёртая глава* посвящена методам реконструкции параметров ШАЛ и энергии первичной частицы. Автор предлагает подход на основе градиентного бустинга над решающими деревьями (GBDT), который демонстрирует улучшение точности восстановления энергии на ~10,5 % по сравнению с традиционными методами.

*Пятая глава* содержит анализ экспериментальных данных установки ENDA-INR, включая построение функции пространственного распределения тепловых нейтронов и интегрального спектра по числу нейтронов в ШАЛ. Результаты согласуются с данными моделирования и результатами других установок (PRISMA-32, PRISMA-YBJ, KASCADE).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан и применён метод выделения сигналов от тепловых нейтронов в эн-детекторах с использованием свёрточных нейронных сетей.
2. Предложен метод реконструкции энергии первичной частицы на основе нейтронной компоненты ШАЛ с использованием алгоритмов машинного обучения.
3. Впервые проведён анализ данных установки ENDA-INR, получены функция пространственного распределения тепловых нейтронов и интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость работы состоит в получении новых данных по энергетическому спектру космических лучей, необходимых для проверки современных моделей их происхождения и ускорения. Практическая ценность заключается в демонстрации

эффективности методов машинного обучения для обработки данных физических экспериментов, а также в разработке программного обеспечения для моделирования и анализа данных установки ENDA.

**Степень достоверности результатов** обеспечивается корректным применением методов моделирования, машинного обучения и статистической обработки данных, а также сравнением полученных результатов с данными других экспериментов. Работа прошла апробацию на ведущих российских и международных конференциях, основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах. Обоснованность выводов работы не вызывает сомнений.

Личный вклад автора является определяющим. Куринов К. О. самостоятельно выполнил предобработку данных, разработал архитектуру и обучил нейронную сеть для выделения нейтронных сигналов, создал программу быстрого Монте-Карло моделирования, разработал методику реконструкции параметров ШАЛ и энергии первичной частицы, провёл анализ экспериментальных данных.

Замечания по работе носят рекомендательный характер:

1. В работе не уделено достаточного внимания оценке влияния различных критериев отбора событий на конечные результаты, особенно с учётом применения новых методов анализа.
2. Интерпретация полученных спектральных характеристик могла бы быть более подробной в контексте современных теоретических моделей.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

#### **Заключение.**

Диссертационная работа Куринова Кирилла Олеговича соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

#### **Официальный оппонент:**

Деркач Денис Александрович, PhD, Заведующий научно-учебной лабораторией методов анализа больших данных Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)

Почтовый адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20,  
e-mail: dderkach@hse.ru  
Тел. (495) 772-95-90, доб 27266

«10» февраля 2026 г.

\_\_\_\_\_/Д. А. Деркач

Подпись Д. А. Деркача заверяю, специалист по персоналу Шостак И. С.

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

1. Деркач Д. А. и др. Optimization of the Accelerator Control by Reinforcement Learning: A Simulation-Based Approach // Physics of Particles and Nuclei, 2025 - № 56. – 1476-1481.
2. Деркач Д. А. и др. Calibrating for the Future: Enhancing Calorimeter Longevity with Deep Learning // Moscow University Physics Bulletin, 2024, - № 79. – S591-S597.
3. Деркач Д. А. и др. Neutron Reconstruction in the BM@N Experiment Using Machine Learning // Physics of Particles and Nuclei, 2024 - № 55. – 995-999.
4. Деркач Д. А. и др. RatanSunPy: A robust preprocessing pipeline for RATAN-600 solar radio observations data // Astronomy and Computing, 2025 - № 51. – 100918.
5. Деркач Д. А. и др. A full detector description using neural network driven simulation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023 - № 1046. – 167591.
6. Деркач Д. А. и др. Toward an understanding of the properties of neural network approaches for supernovae light curve approximation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023 - № 677. – A16.
7. Деркач Д. А. и др. Stokes inversion techniques with neural networks: analysis of uncertainty in parameter estimation // Solar Physics, 2023 - № 298. – 98.