

УТВЕРЖДАЮ  
Ректор НИЯУ МИФИ  
Шевченко В.И.

« 9 » февраля 2026 г.

М.П.

## **ОТЗЫВ**

**ведущей организации Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Национальный  
исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
на диссертационную работу Куринова Кирилла Олеговича  
«Изучение энергетического спектра космических лучей в области  
энергий 10-100 ПэВ с использованием нейтронной компоненты ШАЛ»,  
представленной к защите на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.15  
Физика атомного ядра и элементарных частиц**

### **Актуальность диссертационной темы**

Диссертационная работа Куринова К.О. посвящена разработке методов анализа и реконструкции энергии первичных космических лучей в области энергий 10-100 ПэВ по данным установки ENDA-INR. Актуальность темы обусловлена тем, что нейтронная компонента ШАЛ является на сегодняшний день мало изученной. Информация о нейтронах в ШАЛ расширяет понимание процессов развития ливней и позволяет более детально интерпретировать результаты их исследования с точки зрения оценки энергетического спектра и состава первичных космических лучей.

Регистрация нейтронов ШАЛ является новым направлением и созданные и создаваемые в настоящее время установки (PRISMA-32, УРАН, ENDA-INR и ENDA-LHAASO) используются для отработки методов регистрации и анализа экспериментальных данных. Первые результаты анализа демонстрируют необходимость создания более крупных установок для мультикомпонентных исследований ШАЛ.

## **Основные результаты**

К основным результатам диссертационной работы можно отнести:

Метод для выделения сигналов от тепловых нейтронов в эн-детекторах с использованием сверточных нейронных сетей.

Метод реконструкции энергии первичной частицы с использованием данных о нейтронной компоненте ШАЛ и с оценкой неопределенности такого восстановления с помощью машинного обучения.

Функцию пространственного распределения тепловых нейтронов в ливне и интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ, полученные в ходе моделирования эксперимента ENDA-INR с использованием программ CORSIKA и разработанной в ходе выполнения работы программы быстрого Монте-Карло моделирования.

Полученную по данным установки ENDA-INR экспериментальную функцию пространственного распределения тепловых нейтронов в ливне, интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ и зависимость числа нейтронов от размера ливня.

## **Научная новизна полученных результатов**

Впервые для анализа широких атмосферных ливней, зарегистрированных одновременно по электрон-фотонной и нейтронной компонентам, разработан и применен метод реконструкции параметров, основанный на использовании машинного обучения.

## **Научно-практическая значимость работы**

Разработанные методы и подходы могут быть использованы для обработки данных установок для регистрации нейтронов ШАЛ PRISMA-32, УРАН, ENDA-INR и ENDA-LHAASO. Полученные в работе функции пространственного распределения тепловых нейтронов ШАЛ могут быть использованы для верификации моделей адронных взаимодействий.

## **Замечания по работе**

Название диссертации «Изучение энергетического спектра космических лучей в области энергий 10-100 ПэВ с использованием нейтронной компоненты ШАЛ» не совсем соответствует полученным результатам, поскольку энергетический спектр космических лучей в работе практически не обсуждается.

При моделировании отклика установки не учитывались времена высвечивания сцинтиллятора, временные характеристики ФЭУ и особенности интегратора-усилителя. В результате приведенная угловая точность восстановления направления оси ливня  $3.3^\circ$  (стр. 61), может оказаться завышенной.

В проведенном в работе моделировании максимальное расстояние между осями разыгрываемых ливней и кластером составляет лишь 30 метров. Следовало значительно увеличить это расстояние до нескольких сотен метров для изучения возможного влияния дальних ливней на имитацию внутрикластерных событий.

При анализе полученной в работе зависимости числа зарегистрированных нейтронов от реконструированной мощности ливня и функции пространственного распределения тепловых нейтронов ШАЛ отсутствует сопоставление с параметрами аналогичных распределений, полученных ранее на установке УРАН [Ф. А. Богданов и др. ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 4, с. 560–562].

Отсутствует четкая информация о статистической обеспеченности по числу событий и числу нейтронов в графиках главы 5, в том числе имеются противоречия. На стр. 89 «Всего было отобрано около 77 000 событий. Событий с осциллограммой, которая записывается в случае большого суммарного энерговыделения ( $N_{ch} > 6000$ ) или большого числа зарегистрированных нейтронов ( $N_n > 4$ ), было 715.», а на стр 98 «Была построена ФПР нейтронной компоненты для событий, в которых  $N_n \geq 4$ , в эксперименте таких событий было 39.»

Более мелкие замечания. Нарушена нумерация рисунков ссылка на рис. 4.16 соответствует рис. 4.15, ссылка на рис. 4.17 соответствует рис. 4.16. Нельзя писать «удалось улучшить ..... на ~ 10.5%. Не введено сокращение CNN.

### **Общая оценка работы**

Сделанные замечания несколько снижают в целом высокую оценку диссертации Куринова К.О., которая является законченной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц. Диссертационная работа вносит существенный вклад в развитие новых методов исследования ШАЛ и открывает новые возможности в изучении космических лучей высоких энергий.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались автором на российских и международных конференциях.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики высоких и сверхвысоких энергий, а также нейтронной физики.

Диссертация Куринова Кирилла Олеговича «Изучение энергетического спектра космических лучей в области энергий 10-100 ПэВ с использованием нейтронной компоненты ШАЛ» отвечает требованиям п.9 Положения о

присуждении ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц – за разработку новых методов моделирования и обработки данных установок для регистрации нейтронов ШАЛ с использованием методов машинного обучения.

Отзыв подготовил:

доцент Научно-образовательного  
центра НЕВОД Института ядерной  
физики и технологий НИЯУ МИФИ,

кандидат физико-математических наук Громушкин Дмитрий Михайлович

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен в качестве официального на заседании Научного технического совета Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ (протокол № 1-01/26 от 26 января 2026 г.).

И. о. директора Института ядерной физики  
и технологий НИЯУ МИФИ,

доктор физико-математических наук

Барбашина Наталья Сергеевна

Секретарь Научного технического совета  
Института ядерной физики  
и технологий НИЯУ МИФИ,

доктор физико-математических наук

Гуров Юрий Борисович

Председатель совет по аттестации и  
подготовке научно-педагогических  
кадров НИЯУ МИФИ

доктор физико-математических наук

Кудряшов Николай Алексеевич

**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», НИЯУ МИФИ

Почтовый адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

Телефон: +7 495 788-5699

Адрес электронной почты: info@mephi.ru

Интернет-адрес официального сайта: <https://mephi.ru/>

### Сведения о ведущей организации:

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	НИЯУ МИФИ
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	115409, г. Москва, Каширское Шоссе, д. 31.
Телефон	8(499) 324-87-80
Адрес электронной почты	<a href="mailto:nevod@mephi.ru">nevod@mephi.ru</a>
Веб-сайт	<a href="http://www.nevod.mephi.ru">http://www.nevod.mephi.ru</a>

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Yuzhakova E. A. et al. The EAS Size Spectrum Obtained by the NEVOD-EAS Array Data //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Т. 89. – №. 6. – С. 1011-1014.
2. Zhezhera S. Y. et al. Calibrating an Array of Thin Scintillation Detectors for the Registration of Extensive Air Showers //Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Т. 87. – №. 12. – С. 1843-1848.
3. Amelchakov M. B. et al. The Hybrid Trigger System of the Experimental Complex NEVOD //Instruments and Experimental Techniques. – 2024. – Т. 67. – №. 4. – С. 704-715.
4. Gromushkin D. M. et al. Characteristics of the EAS Neutron Component Taking into Account Efficiency of Neutron Detection //Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Т. 87. – №. 3. – С. 142-150.
5. Amelchakov M. B. et al. The PRISMA-36 array for studying variations of the thermal neutron flux //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2025. – Т. 1076. – С. 170547.