

На правах рукописи

Куринов Кирилл Олегович

**Изучение энергетического спектра
космических лучей в области энергий 10–100 ПэВ
с использованием нейтронной компоненты ШАЛ**

1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Щеголев Олег Борисович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, лаборатория лептонов высоких энергий, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Лагутин Анатолий Алексеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет», институт цифровых технологий, электроники и физики, заведующий кафедрой радиофизики и теоретической физики.

Деркач Денис Александрович, кандидат наук (PhD), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Институт искусственного интеллекта и цифровых наук, директор института по прикладным исследованиям и разработкам.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. С момента открытия в 1912 году Виктором Гессом космических лучей, прошло уже больше ста лет, но фундаментальные вопросы, относительно источников, механизмов ускорения и распространения космических лучей остаются пока до конца не ясны. Исследование энергетического спектра, а также массового состава космических лучей, даст ключ к ответу на вышеописанные вопросы. К настоящему времени было сделано большое количество сообщений об энергетическом спектре, а также о массовом составе космических лучей, однако между ними существуют серьезные разногласия, особенно относительно последнего.

Энергетический спектр и массовый состав космических лучей измеряется прямыми методами на высотных аэростатах и спутниках (JACEE, Dampe, Calet) до энергий ~ 50 ТэВ (были опубликованы данные с энергией выше 100 ТэВ, но они имеют большие статистические ошибки). При больших энергиях используются непрямые измерения с применением установок по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Полученный по данным различных установок энергетический спектр первичного космического излучения, подчиняется степенному закону с несколькими особенностями: излом в области нескольких ПэВ (“колено”), второй излом в области $\sim 10^{17}$ эВ (“второе колено”), обратный изгиб в области $10^{18} - 10^{19}$ эВ (“лодыжка”) и обрезание при энергиях выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ (“ГЗК-эффект”). Причина появления колена в энергетическом спектре до сих пор неизвестна.

В подавляющем большинстве для исследования ШАЛ использовались методы, основанные на регистрации электромагнитной и мюонной компонент с использованием сцинтилляционных, черенковских и флуоресцентных детекторов. В очень редких случаях использовались калориметры для регистрации адронной компоненты. Их применение не получило широкого распространения и чаще всего они имеют весьма ограниченную площадь несопоставимую с

размерами изучаемых ливней из-за экономических и технических причин.

Хотя адронная компонента ливня составляет всего около 1% от общего числа частиц в ШАЛ, она оказывает самое большое влияние на развитие каскада, поскольку является источником всех других компонент ливня. Адронная компонента чувствительна к первичному составу космических лучей и информация о ней позволяет восстанавливать энергию первичной частицы.

В 2001 году Ю. В. Стенькин из ИЯИ РАН предложил регистрировать адроны вблизи оси ливня путем регистрации задержанных тепловых нейтронов, которые рождаются в результате ядерной реакции в веществе окружающей среды (например, в почве, зданиях, материалах детектора и воздухе). Из результатов моделирования было получено, что число тепловых нейтронов прямо пропорционально количеству адронов ШАЛ, попавших на площадь установки. Из чего следует, что метод позволяет регистрировать адронную компоненту ливня по всей площади установки. Созданный для этой задачи детектор позволяет одновременно регистрировать также и электромагнитную компоненту ливня, из-за чего и получил свое название электронно-нейтронный детектор (эн-детектор).

В настоящее время эн-детекторы применяются для регистрации ШАЛ в установке ENDA (и её прототипе ENDA-INR) в эксперименте LHAASO, в установках PRISMA-36 и УРАН, входящих в экспериментальный научный комплекс НЕВОД. Вышеперечисленные установки позволяют восстановить энергетический спектр первичных космических лучей, используя информацию как по нейтронной, так и по электромагнитной компоненте, что поможет для более точного исследования области “колена”.

Цели работы. Целью данной работы являлась разработка методов анализа и реконструкции энергии первичных космических лучей в области энергий от 10-100 ПэВ по данным установки ENDA-INR.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создание программы быстрого моделирования отклика установки ENDA-INR.
2. Создание алгоритма для выделения сигналов от тепловых нейтронов в эн-детекторах.
3. Создание метода для определения энергии первичной частицы с использованием информации о нейтронной компоненте ливня.
4. Обработка и анализ экспериментальных данных установки ENDA-INR, сравнение с результатами моделирования и данными других установок.

Методы исследования. В основе данной работы лежат методы машинного обучения (нейронные сети, градиентный бустинг над решающими деревьями, случайный лес) для решения задач выделения нейтронных сигналов и определения энергии первичной частицы, методы Монте-Карло и методы статистической обработки данных.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработан метод выделения сигналов от тепловых нейтронов с использованием сверточных нейронных сетей в эн-детекторах.
2. Разработан метод реконструкции энергии первичной частицы с использованием данных о нейтронной компоненте ШАЛ и с оценкой неопределенности такого восстановления с помощью методов машинного обучения.
3. Функция пространственного распределения тепловых нейтронов в ливне и интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ, полученный в ходе моделирования эксперимента ENDA-INR, проведенного с использованием программ CORSIKA и разработанной в ходе выполнения работы программы быстрого Монте-Карло моделирования.

4. Точность восстановления параметров ШАЛ (направление прихода и положение оси ливня, полное число адронов и заряженных частиц), полученные при использовании разработанной методики обработки событий.
5. Полученная по данным эксперимента функция пространственного распределения тепловых нейтронов в ливне для установки ENDA-INR.
6. Полученный по данным эксперимента интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ для установки ENDA-INR

Научная новизна.

1. Впервые был разработан и применен метод восстановления энергии космических лучей с использованием данных о нейтронной компоненте ШАЛ с помощью методов машинного обучения.
2. Впервые был разработан и применен метод выделения сигналов от тепловых нейтронов в эн-детекторах с использованием сверточных нейронных сетей.
3. Впервые был проведен анализ экспериментальных данных установки ENDA-INR и получены следующие результаты: временное и пространственное распределение тепловых нейтронов в ШАЛ, зависимости мощности ливня и полного энерговыделения в событии от зарегистрированного числа нейтронов и распределение ШАЛ по числу нейтронов.

Теоретическая и практическая значимость. Независимое измерение энергетического спектра космических лучей в области энергий 10 - 100 ПэВ необходимо для проверки теоретических моделей, объясняющих их происхождение и механизмы ускорения. Использование методов машинного обучения при обработке данных позволяет улучшить точность результатов, за счет более эффективного использования информации.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается с помощью различных проверок, проведенных в данной работе, сравнением с результатами других экспериментов, а также публикацией результатов данной работы в рецензируемых научных журналах и апробацией на научных конференциях.

Основные результаты диссертации представлены на следующих конференциях:

1. 64-ая Всероссийская научная конференция МФТИ (2021)
2. 37 и 38 Всероссийская конференция по космическим лучам (2022, 2024)
3. 4-ый Международный симпозиум по космическим лучам и астрофизике (ISCRA – 2023, 2025)
4. 2-ая конференция LHAASO (2024)

Работа поддержана грантом Российского научного фонда №23-72-01086, "Моделирование эксперимента ENDA-LHAASO".

В составе коллектива авторов получено свидетельство о регистрации двух программ ЭВМ: "Программа моделирования установки ENDA", № 2024667840 от 30.07.2024 и "Программа быстрого моделирования установки ENDA-INR", №2025667745 от 09.07.2025.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях в журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад. Личный вклад автора в получение научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автором были выполнены этапы по предобработке данных, выборе архитектуры и обучению сверточной нейронной сети для задачи выделения сигналов от тепловых нейтронов в эн-детекторах. Также автором была создана программа быстрого Монте-Карло моделирования отклика установки ENDA-INR, которая была основана на зависимостях и распределениях, полученных из программы моделирования на Geant4. Автор разработал методику рекон-

структуре параметров ШАЛ с использованием методов машинного обучения, которая включает в себя оценку неопределенности восстановленных параметров, а также провел сравнение с традиционными методами реконструкции для установки ENDA-INR. Автором был разработан метод реконструкции энергии первичной частицы с использованием информации о нейтронной компоненте с использованием методов машинного обучения и проведено сравнение качества реконструкции для трёх алгоритмов (линейная регрессия с полиномиальными признаками, случайный лес и градиентный бустинг над решающими деревьями), а также с результатами двух базисных подходов. Автором была проведена предобработка экспериментальных данных установки ENDA-INR, работа по определению временных задержек между детекторами и временного разрешения, получена функция пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ, а также интегральный спектр по числу нейтронов в ливне, проведено сравнение с результатами моделирования и с экспериментальными результатами установок PRISMA-32, PRISMA-YBJ и KASCADE.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка иллюстраций, списка таблиц, словаря терминов и списка литературы из 84 наименований. Основной текст занимает 126 страниц.

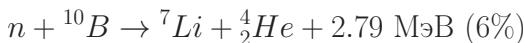
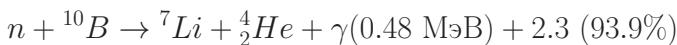
Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность и значимость данной работы в контексте существующих исследований, формулируются цели и ставятся задачи.

Первая глава посвящена описанию установки ENDA-LHAASO, её прототипа ENDA-INR, эн-детекторов, используемых в этих установках, и методики регистрации.

В качестве сцинтиллятора в эн-детекторах используется специализированный тонкий (толщина 50 мг/см²) сцинтиллятор на основе

неорганического сцинтилляционного компаунда $ZnS(Ag) + B_2O_3$ с необогащенным бором. Из-за малой толщины сцинтиллятора сигнал от прохождения одиночных заряженных частиц лежит ниже порога регистрации, но в то же время сцинтиллятор обладает большим световым выходом при регистрации тепловых нейтронов. Эффективность захвата теплового нейтрона в сцинтилляторе составляет $\sim 20\%$. Нейтроны регистрируются с помощью следующих реакций:



Количество зарегистрированных нейтронов, которые рождаются высокоэнергетичными адронами ШАЛ в результате ядерной реакции в грунте вблизи детекторов, определяется числом импульсов (с порогом по амплитуде от 5 мВ) во временном окне от 100 мкс до 5 мс после прихода фронта ливня. Такой временной интервал позволяет избежать просчетов, связанных с прохождением мощных ливней, вызывающих насыщение электроники, и связанным с этим мертвым временем.

Часть задержанных импульсов создается одновременным прохождением нескольких заряженных частиц через сцинтиллятор, а также шумами ФЭУ. Для выделения сигнала от нейтронов используются алгоритмы, основанные на разнице форм импульса нейтронной и заряженной/шумовой компоненты (рис. 1).

Фон тепловых нейтронов оценивается по специальному программному триггеру (нулевой мастер), который запускается каждые 10 секунд. Суммарное по всем детекторам для установки ENDA-INR число фоновых нейтронов подчиняется распределению Пуассона, и его среднее составляет 0.47 нейтронов на событие.

Во **второй главе** приводится описание базисного алгоритма разделения сигналов от нейтронной и заряженной/шумовой компоненты, который ранее использовался в эксперименте ENDA-INR. Алгоритм основан на сравнении величины фронта нарастания импульса с некоторым пороговым значением, однако из-за малого вре-

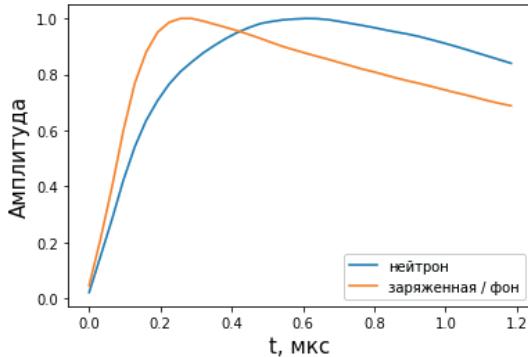


Рис. 1: Фронт импульса заряженной и нейтронной компоненты

мени интегрирования сигнала (1 мкс) такой алгоритм имеет низкое качество классификации. С целью улучшения качества выделения нейтронных импульсов была создана модель сверточной нейронной сети (CNN, Convolutional Neural Net).

Приводится описание процесса создания обучающей выборки и архитектуры модели. Представлены результаты сравнения качества классификации базисного алгоритма и CNN. На рисунке 2 представлены матрицы ошибок обоих методов.

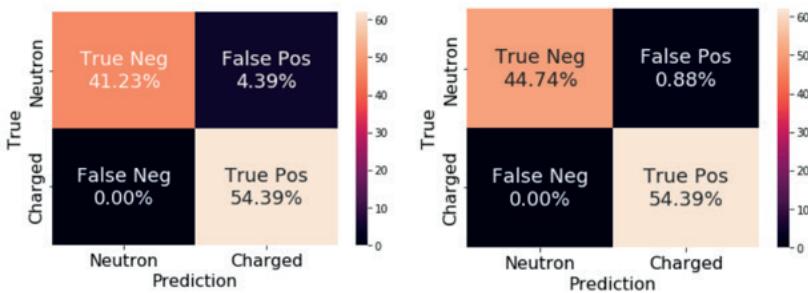


Рис. 2: Матрица ошибок. Базисный метод (слева), CNN (справа)

Значения, расположенные в левом нижнем и правом верхнем углу матрицы, показывают процент неверно классифицированных импульсов. В таблице 1 представлены значения основных метрик

классификации для сравнения по данным тестирующей выборки.

Таблица 1: Сравнение результатов для тестирующей выборки

Метрика	Базисный метод	CNN
Precision	95%	99%
Recall	96%	99%
F1-score	96%	99%

В третьей главе подробно описан процесс моделирования эксперимента, который включал в себя моделирование ШАЛ с помощью программы CORSIKA и двух программ моделирования отклика установки на его прохождение.

Первая программа моделирования отклика установки была написана с помощью фреймворка Geant4, в тексте приводится описание программы и модели эн-детектора. Далее текст посвящен описанию шагов по созданию программы быстрого Монте-Карло моделирования отклика установки, основанной на приближениях, полученных с помощью Geant4. Представлено сравнение откликов установки на прохождение ШАЛ двух программ моделирования.

Приводится описание смоделированных выборок по отклику установки, на которых проводилось проверка алгоритмов реконструкции параметров ШАЛ и энергии первичной частицы, а также обучение алгоритмов машинного обучения. Для этого использовались такие модели адронных взаимодействий высоких энергий, как QGSJET-II-04, EPOS-LHC и SIBYLL-2.3d.

Четвертая глава посвящена методам реконструкции параметров (направления прихода, положения оси, мощности и полного числа адронов) ШАЛ и энергии первичной частицы. Приводятся результаты качества реконструкции параметров с использованием традиционного метода восстановления, а также с применением методов машинного обучения.

Реконструкция энергии для базисного подхода была основана на использовании степенной зависимости (1) первичной энергии E_0 от полного числа частиц определенной компоненты ливня N_x (мощ-

ности ливня N_e и полного числа зарегистрированных нейтронов N_n) с некоторыми коэффициентами a, b , которые были получены по данным смешанной выборки, в которой все разыгранные типы первичных частиц были в равной пропорции.

$$\lg(E_0) = a \times \lg(N_x) + b. \quad (1)$$

В подходе с использованием машинного обучения была создана модель, которая в качестве признаков использовала все наиболее чувствительные к энергии первичной частицы параметры: зенитный угол (θ), десятичный логарифм числа нейтронов $\lg(N_n)$, десятичный логарифм мощности $\lg(N_e)$, возраст (s) и положение оси (X, Y) ШАЛ. Далее было проведено сравнение трех различных алгоритмов машинного обучения, где лучшее качество было получено с использованием алгоритма градиентного бустинга над решающими деревьями (GBDT, Gradient Boosting on Decision Trees).

На рисунке 3 приведены сравнения качества реконструкции энергии первичной частицы для метода GBDT с базисным подходом с использованием мощности ливня и числа зарегистрированных нейтронов для модели QGSJET-II-04.

Полученные распределения были профитированы распределением Гаусса, а оценкой качества реконструкции служила величина среднеквадратичного отклонения (σ). При использовании базисного подхода с использованием мощности ливня $\sigma = 0.27$, при использовании числа нейтронов $\sigma = 0.35$, при использовании машинного обучения для модели GBDT $\sigma = 0.24$.

Затем было проведено сравнение на выборках с другими моделями адронных взаимодействий, в которых качество реконструкции энергии первичной частицы с помощью метода GBDT удалось улучшить на 4.3% для модели EPOS-LHC и на 7.6% для модели Sibyll-2.3d.

Смещение среднего значения μ относительно нуля зависело от химического состава выборки, поэтому была проведена оценка ошибки реконструкции для каждого отдельного типа первичной

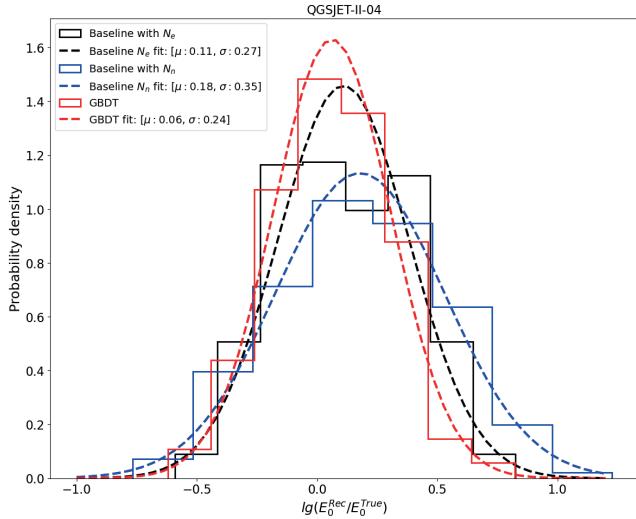


Рис. 3: Распределения отношения реконструированной и истинной энергии первичной частицы для алгоритма GBDT и базисного подхода для модели QGSJET-II-04

частицы. Для этого был использован параметр ξ (2):

$$\xi = \frac{\lg E_0^{\text{Rec.}} - \lg E_0^{\text{True}}}{\lg E_0^{\text{True}}} \quad (2)$$

Оценкой энергетического разрешения служило среднеквадратичное отклонение параметра ξ , в таблице 2 представлены результаты среднего и среднеквадратичного отклонения параметра ξ для трёх валидационных выборок для реконструкции с использованием метода GBDT. При использовании алгоритма GBDT значение среднего отклонения ξ не превышало 4.5%, а энергетическое разрешение было менее 7%.

Далее в тесте приводится описание метода оценки неопределенности реконструированных параметров.

В **пятой главе** описан процесс обработки экспериментальных данных, сравнение полученных результатов с результатами моделирования и с результатами других установок.

Таблица 2: Результаты оценки точности реконструкции первичной энергии при восстановлении с помощью метода GBDT

Первичная частица	QGSJET-II-04		EPOS-LHC		Sibyll-2.3d	
	$\mu[\xi], \%$	$\sigma[\xi], \%$	$\mu[\xi], \%$	$\sigma[\xi], \%$	$\mu[\xi], \%$	$\sigma[\xi], \%$
p	4.17	6.64	2.77	5.46	3.53	5.87
He	-0.73	5.66	0.62	5.62	0.54	5.76
N	-2.61	4.52	-2.44	4.63	-2.13	3.91
Si	-3.67	4.49	-3.56	4.11	-3.00	3.91
Fe	-4.33	3.30	-4.51	3.61	-4.78	4.17

Приводится описание анализа работы установки, процесса амплитудной и временной калибровки детекторов, сравнение полученного временного и пространственного распределения тепловых нейтронов ШАЛ с данными моделирования, а также с результатами, полученными на установке PRISMA-32.

На рисунке 4 представлена полученная экспериментально полученная функция пространственного распределения (ФПР) тепловых нейтронов в ШАЛ совместно с данными моделирования.

Далее приводятся результаты зависимости среднего числа зарегистрированных нейтронов от суммарного энерговыделения и мощности ливня и интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ (рис. 5), полученный для различных вариантов отбора нейтронных импульсов. Спектр соответствует степенному закону с показателем $I \sim N_n^{-\beta}$, значения полученных показателей β представлены в таблице 3.

Таблица 3: Значение показателя спектра по числу нейтронов для различных вариантов отбора

Метод отбора	Порог по амплитуде	β
CNN	5 мВ	-1.96 ± 0.20
CNN	7 мВ	-2.01 ± 0.18
Базисный алгоритм	5 мВ	-2.02 ± 0.22
Без отбора	5 мВ	-2.16 ± 0.18

Измеренные показатели степени β согласуются с данными уст-

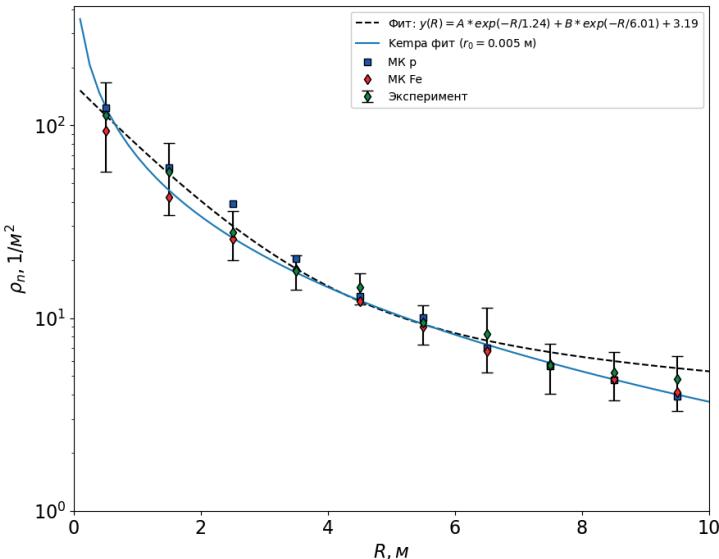


Рис. 4: ФПР тепловых нейтронов

новки PRISMA-32 ($\beta = -2.0$) и с результатом PRISMA-YBJ ($\beta = -1.95 \pm 0.05$), а также с данными адронного калориметра KASCADE, в котором показатель спектра наклона по числу адронов был в диапазоне $1.9 \div 2.0$ в зависимости от выбора пороговой энергии.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Был разработан метод выделения сигналов от тепловых нейтронов с использованием сверточных нейронных сетей в эн-детеекторах. Метод показал лучшее качество по сравнению с использующимся на данный момент в установке и в дальнейшем будет применен для обработки данных эксперимента ENDA.
2. Была создана программа быстрого Монте-Карло моделирования отклика установки ENDA на прохождение ШАЛ. Программа показала результаты, близкие к результатам програм-

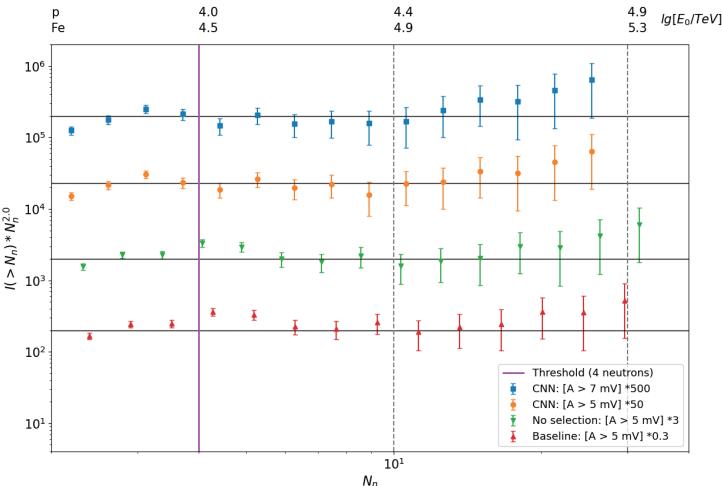


Рис. 5: Экспериментально полученный интегральный спектр по числу нейтронов. Спектры были домножены на указанные в легенде коэффициенты с целью устранения слияния их друг с другом. Отбор с помощью CNN (с порогом 7 мВ по амплитуде импульса (синие точки), с порогом 5 мВ (оранжевые точки)), базисный метод (красные точки), без отбора по форме импульса (зеленые точки).

мы моделирования на Geant4, а её время вычисления оказалось меньше в ~ 2000 раз. По данным моделирования была получена функция пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ, а также интегральный спектр по числу нейтронов в ливне.

3. Была получена оценка точности реконструкции параметров ливня (направление прихода и положение оси ливня, полное число адронов и заряженных частиц) для базисного подхода и подхода с использованием методов машинного обучения.
4. Был разработан метод реконструкции энергии первичной частицы с использованием данных о нейтронной компоненте ШАЛ и с оценкой неопределенности такого восстановления с помощью методов машинного обучения. С помощью методов

машинного обучения удалось улучшить качество реконструкции первичной энергии на $\sim 10.5\%$.

- По данным эксперимента ENDA-INR была получена функция пространственного распределения тепловых нейтронов в ливне, которая показала хорошее согласие с результатами моделирования и с результатом установки PRISMA-32.
- По данным эксперимента ENDA-INR был получен интегральный спектр по числу нейтронов в ШАЛ, имеющий степенной вид с показателем ~ 2.0 , который показал хорошее согласие с результатом установок PRISMA-32, PRISMA-YBJ и с результатом установки KASCADE для спектра по числу адронов.

Публикации соискателя по теме диссертации

- Куринов К.О., Кулешов Д.А., Лагуткина А.А., Стенькин Ю.В., Щеголев О.Б.* Выделение сигналов от тепловых нейтронов в электронно-нейтронных детекторах с использованием сверточных нейронных сетей в эксперименте ENDA // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики — 2023. — Т. 163. — С. 524–530.
- Kurinov K.O., Kuleshov D.A., Stenkin Yu.V., Shchegolev O.B.* Techniques for data analysis and primary mass reconstruction in the ENDA experiment // Physics of Atomic Nuclei — 2023. — Т. 86. — С. 1063–1068.
- Куринов К.О., Кулешов Д.А., Малий И.О., Стенькин Ю.В., Щеголев О.Б.* Первые экспериментальные результаты, полученные на установке ENDA-INR // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики — 2025 — Т. 168. — С. 343–349.
- Куринов К.О., Кулешов Д.А., Малий И.О., Стенькин Ю.В., Щеголев О.Б.* Быстрое Монте-Карло моделирование установки ENDA // Краткие сообщения по физике ФИАН — 2025 — Т. 9. — С. 15–26.
- Куринов К.О., Кулешов Д.А., Малий И.О., Стенькин Ю.В., Степанов В.И., Щеголев О.Б.* Восстановление направления прихода ШАЛ в эксперименте ENDA-INR // Ядерная физика и инжиниринг — 2026 — Т. 17. — С. 236–240.

Научное издание
Куринов Кирилл Олегович
Изучение энергетического спектра
космических лучей в области энергий 10–100 ПэВ
с использованием нейтронной компоненты ШАЛ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Принято в печать 16.12.2025
Ф-т 60х84/16 Уч.-изд.л. 1,3 Зак. № 044/25 Тираж 80 экз. Бесплатно
Печать цифровая
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а