

УТВЕРЖДАЮ
Ректор
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Ярославский государственный
университет им. П.Г. Демидова»
доктор юридических наук, профессор

_____Иванчин А.В.

«16» мая 2025 г.

Отзыв ведущей организации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

на диссертационную работу Петрова Никиты Александровича **«Исследование состава космических лучей в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ на архивных данных эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Актуальность темы диссертации.

Диссертационная работа Петрова Никиты Александровича посвящена исследованию состава космических лучей в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ на архивных данных эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения. Изучение космических лучей занимает важное место в современной астрофизике и физике высоких энергий. Несмотря на более чем столетнюю историю исследований, фундаментальные вопросы об источниках и механизмах ускорения этих частиц остаются открытыми. Большое внимание в таких исследованиях занимает энергетический спектр космических лучей и его массовый состав, поскольку эти характеристики несут важную информацию об их происхождении и распространении. В частности, особенности энергетического спектра, такие как «колено» в области ~4 ПэВ, являются предметом активных дискуссий и могут быть связаны с предельными энергиями ускорения в источниках или процессами распространения космических лучей в Галактике.

Основу диссертации составляет разработка и применение методики восстановления энергетических спектров индивидуальных массовых компонент космических лучей с использованием методов машинного обучения к архивным данным эксперимента KASCADE. Появление и реализация такой методики, основанной на современных алгоритмах машинного обучения и примененной к большому объему экспериментальных данных, является важным шагом в данной области исследований.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы

из 88 наименований и одного приложения. Полный объём диссертации составляет 99 страниц, включая 38 рисунков и 10 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, отмечаются цель и задачи диссертационной работы, формулируется научная новизна полученных результатов, указывается их теоретическая и практическая значимость, описывается методология и методы исследования, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о публикациях автора и его личном вкладе в получение научных результатов. Описывается объем и структура диссертации.

Глава 1 посвящена описанию эксперимента KASCADE, архивные данные которого использованы в исследовании. В этой главе подробно рассматривается KASCADE Array, являющийся основной детекторной компонентой, использованной в работе. Также описываются основные аспекты, касающиеся экспериментальных данных и Монте-Карло моделирования эксперимента KASCADE, включая используемые версии генераторов адронных взаимодействий (QGSJet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3c, а также QGSJet-II.02 для сравнения с оригинальными результатами KASCADE) и процесс реконструкции параметров широких атмосферных ливней.

Глава 2 описывает предложенную методологию по определению энергетических спектров индивидуальных массовых компонент космических лучей. Ключевым элементом методологии является разработка и обучение классификатора типа первичной частицы на основе свёрточной нейронной сети (CNN). В главе детально рассматриваются процедуры оценки качества реконструкции типа первичной частицы, на основании которых был выбран CNN в качестве основного классификатора. Также представлено исследование классификатора типа первичной частицы, включающее анализ важности отдельных входных параметров, зависимости от реконструированной энергии и зенитного угла, влияния неработающих детекторных станций и зависимости от генераторов адронных взаимодействий. Отдельные разделы главы посвящены построению спектров индивидуальных массовых компонент прямым предсказанием классификатора до анфолдинга, самой процедуре анфолдинга по типу и энергии первичной частицы и подробному изучению систематических погрешностей полученных результатов. Завершается глава сравнением результатов, полученных разработанной методикой на открытой части экспериментальных данных с использованием генератора QGSJet-II.02, с оригинальными результатами KASCADE.

Глава 3 демонстрирует результаты применения разработанной методики к закрытой части экспериментальных данных KASCADE с использованием современных генераторов адронных взаимодействий QGSJet-II.04, EPOS-LHC и Sibyll 2.3c. Представлены восстановленные энергетические спектры индивидуальных массовых компонент с использованием генератора QGSJet-II.04, проведён учёт неопределённостей, связанных с различными генераторами адронных взаимодействий, выполнено представление спектров в виде среднего логарифма массы и проведено сравнение с результатами других экспериментов (IceTop, TALE, LHAASO). В заключительном разделе главы представлен поиск коленоподобных структур в спектрах индивидуальных компонент и проведено обсуждение полученных результатов.

В заключении перечисляются основные результаты исследования

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

1. Впервые была разработана и применена к данным эксперимента KASCADE методика по восстановлению спектров пяти массовых компонент (протонной, гелиевой, углеродной, кремниевой, железной) с использованием моделей машинного обучения.

2. Определены энергетические спектры пяти массовых компонент в диапазоне 1,5 – 100 ПэВ с точностью превышающей исследования KASCADE и других экспериментов.

3. С наибольшей на текущий момент статистической значимостью подтверждена коленоподобная структура протонной и гелиевой массовых компонент, а также впервые получено указание на излом в железном спектре в исследуемом диапазоне энергий.

Основные положения диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработанная методика с использованием методов машинного обучения позволяет определить энергетические спектры пяти индивидуальных массовых компонент (протоны, гелий, углерод, кремний, железо) в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ на архивных данных KASCADE.

2. Систематическая неопределённость энергетических спектров пяти индивидуальных массовых компонент (протоны, гелий, углерод, кремний, железо) космических лучей в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ на архивных данных KASCADE, полученных с помощью разработанной методики, ниже соответствующей в оригинальных работах KASCADE и в современных экспериментах (IceTop).

3. Получена оценка неопределённостей в спектрах индивидуальных массовых компонент, связанная с использованием трёх различных современных генераторов адронных взаимодействий: QGSJet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3c.

4. Энергетический спектр протонной компоненты демонстрирует избыток (~10 раз при энергии 10 ПэВ), а спектры остальных компонент — недостаток относительно оригинальных результатов KASCADE.

5. Коленоподобное поведение в спектрах протонной и гелиевой массовых компонент наблюдается со значимостью более 5σ и 3σ при энергиях ~4,4 ПэВ и ~11 ПэВ соответственно. Указание на излом в спектре железной компоненты обнаружено при энергии ~4,5 ПэВ.

Достоверность и обоснованность достигается с помощью проверок и тестов, проведённых в данном исследовании, сравнением полученных результатов с другими экспериментами, а также публикацией результатов данной работы в рецензируемых научных журналах и обсуждениями на научных конференциях. Выводы и положения диссертации полностью обоснованы.

Полученные результаты имеют **безусловную научную и практическую значимость**. Так, независимое измерение энергетических спектров массовых компонент в области энергий 1,5 – 100 ПэВ необходимо для проверки теоретических моделей, объясняющих происхождение и механизмы ускорения галактических космических лучей. Использование методов машинного обучения для анализа данных подобных экспериментов открывает путь к увеличению точности результатов, благодаря более эффективному использованию информации. А повторный анализ открытых архивных экспериментальных данных с использованием новых методов демонстрирует важность сохранения и публикации данных и других экспериментов.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации,

получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты диссертации отражены в 3 работах, из них 2 в научных журналах из списка ВАК, а также 1 работа в трудах конференций. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

Замечания. Существенных недостатков представленная диссертация не содержит. Тем не менее, по диссертации имеются замечания и некоторые пожелания:

1. Во Введении желательно было бы расширить обзор литературы по экспериментам, связанным с комплексным изучением космических лучей сверхвысоких энергий как настоящих, так и будущих.
2. В тексте диссертации (раздел 3.5) отмечено, что спектральный индекс после излома уменьшается для железа, но какой-либо теоретической модели не предлагается.
3. Ограниченный объем Монте-Карло моделирования является важным источником неопределённостей в матрицах отклика. Решение вопроса об увеличении объема моделирования могло бы помочь уменьшить эти неопределённости и улучшить процесс обучения моделей машинного обучения.
4. Для поиска коленоподобных структур используется аппроксимация спектров ломаным степенным законом. Хотя это и стандартный подход, однако стоит отметить, что выбор именно этой параметрической формы может повлиять на определение положения и значимости колена/излома. Другие функциональные зависимости могут дать несколько иные численные результаты.
5. В разделе 2.5.1, при обсуждении неопределённостей анфолдинга, критерий остановки итерационного процесса анфолдинга (значения $\chi^2 = 0,01$ и $0,1$) указаны без детального обоснования их выбора.

Высказанные замечания не являются принципиальными и ни в коей мере не умаляют высокого уровня работы и полученных результатов.

Заключение. Диссертация Н. А. Петрова является законченным научным исследованием. Полученные автором результаты имеют существенное значение для физики высоких энергий и астрофизики. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.** Диссертация Н. А. Петрова на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, 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, физика высоких энергий.

Отзыв на диссертацию Петрова Никиты Александровича «Исследование состава космических лучей в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ на архивных данных эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения» подготовлен на основании обсуждения ее материалов на семинаре кафедры теоретической физики

ЯрГУ 7 апреля 2025 года и утвержден на заседании кафедры теоретической физики ЯрГУ 16 апреля 2025 года, протокол № 8.

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры теоретической физики
физико-технического факультета ЯрГУ
тел. (4852) 79-77-66
email: rda@uniyar.ac.ru

Дмитрий Александрович
Румянцев

21.04.2025 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова» (ЯрГУ)

Почтовый адрес: 150003, Ярославская область, г. Ярославль, ул. Советская, д. 14

Контактные телефоны: (4852) 78-86-05; (4852) 73-21-50; (4852) 79-77-02; (4852) 79-77-94

Факсы: (4852) 25-57-87; (4852) 73-21-50

Адрес электронной почты: rectorat@uniyar.ac.ru

Сведения о ведущей организации:

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ФГБОУ «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	150003, Российская Федерация, Ярославская область, г. Ярославль, ул. Советская, д. 14.
Телефон	Тел. (485) 278-86-05
Адрес электронной почты	rectorat@uniyar.ac.ru
Веб-сайт	https://www.uniyar.ac.ru

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

1. Румянцев Д. А. The multiple Compton process in a strongly magnetized plasma. // T.A. Pukhov, D.A. Romyantsev, M.V. Chistyakov. Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – V. 21. – No. 4. P. 604-606.
2. Румянцев Д. А. Процесс расщепления фотона с учетом влияния позитрония. // Д.А. Румянцев, М.В. Чистяков, Д.М. Шленев. Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 166. - №2 (8). с. 209-215.
3. Румянцев Д. А. The process $\gamma \rightarrow e^+ e^- \gamma$ in a strongly magnetized medium // D. A. Romyantsev, A.A.Yarkov, M. V. Chistyakov, T. A. Pukhov. Physics of Atomic Nuclei. - 2023 – V. 86. - No. 4. P. 589–592
4. Румянцев Д. А. Radiation transfer in a strong Magnetic field with resonance effects taken into account // A. A. Yarkov, D. A. Romyantsev. Physics of Atomic Nuclei . -- 2023 – V. 86. - No. 5. P. 890–893.
5. Румянцев Д. А. Photon Damping in a Strongly Magnetized Plasma // A. A. Yarkov, D. A. Romyantsev, M. V. Chistyakov. Physics of Atomic Nuclei . -- 2022 – V. 85. - No. 9. P. 1566–1569.

6. Кузнецов А. В. Analysis of the spectrum of 27-day Igor S. Ognev. Monthly Notices of the GCR variations in 2015–2016 // S.A. Siruk, A.V. Kuznetsov, A.G. Mayorov, R.F. Yulbarisov. ADVANCE IN SPACE RESEARCH. - 2024 –V. 74. –No.4. P. 1978-1992.
7. Добрынина А. А. Bright X-ray pulsars as sources of MeV neutrinos in the sky // Aman Asthana, Alexander A. Mushtukov, Alexandra A. Dobrynina, Royal Astronomical Society. - 2023 –V. –No. 522. P. 3405–3411.