

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от **19.06.2025** г. № **29/7**

О присуждении **Петрову Никите Александровичу**, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование состава космических лучей в диапазоне энергий 1,5 - 100 ПэВ на архивных данных эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения» по специальности 1.3.15. — «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» принята к защите 13.02.2025 г., протокол № 24/2 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Петров Никита Александрович 1997 года рождения. В 2020 году соискатель с отличием окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика» (диплом-1054244610754 выдан 02 июля 2020 года). В 2020 году поступил в аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный государственный университет» по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, где и обучается по настоящее время. Справка о сдаче кандидатских экзаменов по научной специальности 1.3.15. — «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» выдана в 2024 году Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский

государственный университет». В настоящее время также работает в должности стажёра-исследователя в лаборатории обработки больших данных в физике частиц и астрофизике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории обработки больших данных в физике частиц и астрофизике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель – Кузнецов Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, лаборатория обработки больших данных в физике частиц и астрофизике, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Быков Андрей Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук (ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе), руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики,

Деркач Денис Александрович, кандидат наук (PhD, университет Париж XI, Франция), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), заведующий лабораторией методов анализа больших данных факультета компьютерных наук, дали положительные отзывы на диссертацию.

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

В своем положительном заключении, подписанном Румянцевым Дмитрием Александровичем, доктором физ.-мат. наук, доцентом, профессором кафедры теоретической физики физико-технического факультета ЯрГУ и утверждённым ректором Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный университет

им. П. Г. Демидова», доктором юридических наук, профессором Иванчиным Артемом Владимировичем указала, что работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Петров Никита Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Соискатель имеет 3 опубликованных работы по теме диссертации, из них 2 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также 1 работа в трудах конференций. Все 3 публикации проиндексированы в базе данных Scopus.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно.

Список основных работ по результатам диссертационного исследования:

1. Methods of machine learning for the analysis of cosmic rays mass composition with the KASCADE experiment data / M. Y. Kuznetsov, N. A. Petrov, I. A. Plokhikh, V. V. Sotnikov. — Текст: электронный // Journal of Instrumentation. — 2024. — Янв. — Т. 19, № 01. — P01025. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/01/P01025>; Дата публикации: 25.01.2024.
2. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays with the KASCADE experiment data and machine learning / M. Yu. Kuznetsov, N. A. Petrov, I. A. Plokhikh, V. V. Sotnikov. — Текст: электронный // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2024. — Май. — Т. 2024, № 05. — С. 125. — URL: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/05/125>; Дата публикации: 30.05.2024.
3. Towards mass composition study with KASCADE using deep neural networks / V. Sotnikov, M. Kuznetsov, N. Petrov, I. Plokhikh. — Текст: электронный // Proceedings of 27th European Cosmic Ray Symposium — PoS(ECRS). Т. 423.

— 2023. — С. 092. — URL: <https://doi.org/10.22323/1.423.0092>; Дата публикации: 14.12.2023.

Аннотация полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и аннотацию поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация обладает внутренним единством, содержит важные физические и методические результаты, имеющие большое научное значение и практическую ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

1. В работе, как и в используемом моделировании методом Монте-Карло, исследуется пять массовых компонент первичных частиц: протоны, гелий, углерод, кремний, железо. Из диссертации не вполне ясно, под «компонентой» подразумевается группа ядер близких масс, или ядра с конкретной массой? Первичные частицы в Монте-Карло имеют конкретные массы (p, He, C, Si, Fe), но не ясно, содержат ли наборы моделирований частицы со всеми массами, которые потом делятся на пять групп. Стоило более подробно описать эти понятия в диссертации.
2. В связи с предыдущим замечанием, не ясно, нет ли поправок при применении методов восстановления массы первичной частицы при переходе от данных Монте-Карло к реальным данным, где представлено большее разнообразие масс частиц. Также не обсуждается, что происходит с первичными частицами промежуточных масс из реальных данных — они отбрасываются или причисляются к одной из массовых групп? В первом случае, надо пояснить, как это происходит, в во втором — объяснить, как сравнивать данные по массовым компонентам с IceTop, где всего 4 массовые компоненты, а не 5.

3. Было бы желательно пояснить, возможно ли обучать CNN классификатор одновременно на моделях Монте-Карло с разными генераторами адронных взаимодействий (например, всеми современными) и имеет ли это смысл.
4. Некоторые термины, используемые в диссертации, поясняются не сразу или недостаточно подробно (напр., анфолдинг, классификатор, случайный лес). В разделе 2.1 было бы полезно более подробное описание различных классификаторов и базовых принципов их действия.
5. При первичном анализе данных были применены критерии отбора, рекомендованные KASCADE, при этом не обсуждается влияния этих критериев, с учётом новых подходов к анализу данных.
6. Найденные коленоподобные структуры (в частности, железное) могли бы быть более подробно интерпретированы.
7. Во Введении желательно было бы расширить обзор литературы по экспериментам, связанным с комплексным изучением космических лучей сверхвысоких энергий как настоящих, так и будущих.
8. В тексте диссертации (раздел 3.5) отмечено, что спектральный индекс после излома уменьшается для железа, но какой-либо теоретической модели не предлагается.
9. Ограниченный объём Монте-Карло моделирования является важным источником неопределённостей в матрицах отклика. Решение вопроса об увеличении объёма моделирования могло бы помочь уменьшить эти неопределённости и улучшить процесс обучения моделей машинного обучения.
10. 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.
11. 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.

В целом, диссертация написана хорошим языком и характеризуется понятным стилем изложения, но не лишена небольшого количества опечаток, грамматических и стилистических ошибок. Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Соискатель Петров Н. А. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и высказанные замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Разработана методика восстановления энергетических спектров пяти индивидуальных массовых компонент (протоны, гелий, углерод, кремний, железо) в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ на архивных данных эксперимента KASCADE в диапазоне энергий 1,5 – 100 ПэВ с использованием классификатора на основе машинного обучения для пособытийной реконструкции массовой компоненты первичной частицы с точностью восстановления, выше, чем в оригинальном исследовании KASCADE, а также в современных экспериментах (IceTop).

2. Получены энергетические спектры пяти массовых компонент в диапазоне энергий от 1,5 ПэВ до 100 ПэВ с использованием Монте-Карло моделирования, основанного на современных генераторах адронных взаимодействий QGSJet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3c. Учтены «теоретические» неопределённости, связанные с выбором генератора.

3. Продемонстрировано доминирующее поведение спектра протонной компоненты над остальными в диапазоне энергий 1,5 – 10 ПэВ (~10 раз при энергии 10 ПэВ), находящееся в противоречии с оригинальными результатами KASCADE, в которых доминирует гелиевая компонента.

4. Проведено сравнение полученных в данной работе результатов с последними результатами экспериментов IceTop, TALE и LHAASO. Показано согласие результатов с ними в рамках «теоретических» неопределённостей.

5. Исследовано поведение энергетических спектров индивидуальных массовых компонент. Впервые обнаружено статистически значимое коленоподобное поведение в случае протонной (более 5σ) и гелиевой (более 3σ) компонент при энергиях ~4,4 ПэВ и ~11 ПэВ соответственно. Впервые получено указание ($2,4\sigma$) на излом в железной компоненте при энергии ~4,5 ПэВ.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована тем, что:

- 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 экспериментов в физике частиц открывает путь к увеличению точности результатов, благодаря возможности находить неявные корреляции и закономерности в данных.
- Повторный анализ открытых архивных экспериментальных данных с использованием новых методов демонстрирует важность сохранения и публикации данных и других экспериментов.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Достоверность полученных результатов подтверждается с помощью различных проверок и тестов, проведённых в диссертационной работе, сравнением полученных результатов с другими экспериментами, а также публикацией результатов данного исследования в рецензируемых научных журналах и обсуждениями на научных конференциях и научных семинарах.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор лично проводил предварительную обработку данных и обучение свёрточной нейронной сети для классификации типа первичной частицы, а также разработку и валидацию классификатора. Автор самостоятельно провёл анфолдинг и получил полные и индивидуальные энергетические спектры массовых компонент, включая оценку систематических неопределённостей. Кроме того, автором выполнен поиск коленоподобных структур и изломов в спектрах и их интерпретация.

На заседании 19 июня 2025 года диссертационный совет принял решение присудить **Петрову Никите Александровичу** ученую степень кандидата физико-математических наук за разработку методики восстановления массового состава космических лучей по данным эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения и обнаружение изломов в

индивидуальных спектрах космических лучей (протоны, гелий) с высоким уровнем статистической значимости.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.15. — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 18, против - 2, недействительных бюллетеней - 1.

Председатель

диссертационного совета 24.1.163.01

доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

_____ Кравчук Л. В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01

кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С. В.

19.06.2025

м.п.