

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 **26.02.2026** № **41/3**

О присуждении **Долгих Константину Александровичу**, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук. Диссертация «Построение модели горячих пятен космических лучей предельно высоких энергий с учётом межгалактических магнитных полей» по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика, принята к защите 11.12.2025г., протокол № 38/16 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 Долгих Константин Александрович 1997 года рождения, в 2021 году окончил с отличием программу магистратуры Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению подготовки 03.04.02 – «Физика», (диплом ААТ 2802500, выданный 23.06.2021 г.). В 2025 году соискатель окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению 03.06.01 – Физика и астрономия, по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика (свидетельство 001625, выдано 30.09.2025г.). В настоящее время К.А. Долгих работает стажёром-исследователем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук в лаборатории обработки больших данных в физике частиц и астрофизике.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук в лаборатории обработки больших данных в физике частиц и астрофизике.

Научный руководитель – Рубцов Григорий Игоревич, доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией обработки больших данных в физике частиц и астрофизике.

Официальные оппоненты:

**Румянцев Дмитрий Александрович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова», кафедра теоретической физики, профессор.

**Деришев Евгений Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», отдел астрофизики и физики космической плазмы, старший научный сотрудник,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) (г. Москва, г. Троицк),

в своем положительном заключении, подписанном Зиракашвили Владимиром Николаевичем, утверждённым директором ИЗМИРАН Абуниным Артёмом Анатольевичем 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 Долгих Константин Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Соискатель имеет 5 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны при решающем участии соискателя.

Список основных работ по результатам диссертационного исследования:

1. K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz, I. Tkachev. Caustic-Like Structures in UHECR Flux after Propagation in Turbulent Intergalactic Magnetic Fields // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2023. — Vol. 136. — P. 704–710. DOI: 10.1134/S1063776123060031
2. K.A. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz and I. Tkachev. Caustic-like Structures in UHECR Flux after Propagation in Turbulent Intergalactic Magnetic Fields and the caused distortions of the image of a source // *Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC-2023)*. — 2023. — P.452. DOI: 10.22323/1.444.0452
3. Арбузова Е.В., Долгих К.А., Долгов А.Д., Калашев О.Е., Корочкин А.А., Панасенко Л.А., Поздняков Н.А., Рубцов Г.И., Руденко А.С., Ткачев И.И. Открытие новых окон в раннюю Вселенную с помощью многоканальной астрономии (Мини-обзор) // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. - 2024. - Vol. 119. - N. 7-8. - P. 481-491. DOI: 10.31857/S1234567824070024
4. K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz, I. Tkachev. Images of the Ultra-High Energy Cosmic Rays from Point Sources // *Advances in Space Research*. — 2024. — Vol. 74. — Iss. 10. — P. 5295–5301. DOI: 10.1016/j.asr.2024.07.081
5. K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz, I. Tkachev. Displacement of ultra-high-energy cosmic ray source images by the intergalactic magnetic field: the cases of Cen A and M83 // *International Journal of Modern Physics A*. — 2025. — P. 2540012. DOI: 10.1142/S0217751X25400123

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

В поступивших отзывах оппонентов и ведущей организации отмечено, что тема диссертации актуальна и значима, а сама диссертация выполнена на высоком

научном уровне и полностью удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

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

- В диссертации сделано утверждение, что при выводе формулы (4) используются «другие начальные условия», однако сами условия не приводятся.

- На стр. 37 диссертации делается утверждение, что число плоских волн в сумме, описывающей турбулентное магнитное поле равно 463, и приведено пояснение, почему сделан выбор в пользу этого числа, однако никаких численных оценок при этом не приводится. Например, не понятно, на сколько меньшее количество волн приводит к нежелательному эффекту доминирования в отклонении КЛПВЭ. С другой стороны, также не ясно, на сколько увеличится время расчета при большем количестве волн. Также спектр ограничен со стороны больших и малых волновых чисел и утверждается, что результаты слабо меняются при дальнейшем расширении диапазона. И не ясно, какие из результатов наиболее требовательны к ширине спектра при моделировании.

- В третьей главе предложена интерпретация горячего пятна КЛПВЭ в области Центавра А. При этом, в качестве возможных кандидатов ускорителей КЛПВЭ в этой области рассматриваются радиогалактика Центавр А и галактики NGC 4945 и M83. Однако, остается не совсем понятным, могут ли в области Центавра А существовать другие кандидаты на источники КЛПВЭ, например, активные ядра галактик.

- Для задания спектра мощности турбулентного магнитного поля используется приближение Колмогорова, то есть изотропный спектр с показателем  $-5/3$ . Вместе с тем, существуют и другие приближения для описания МГД-турбулентности в межзвездной (и межгалактической) среде, например, приближения Голдрейха-Шридхара или Крейчнана. В диссертации вопрос о зависимости результатов от конкретного выбора спектра турбулентности исследован ограниченно, только для магнитного поля, представленного в виде совокупности хаотически ориентированных доменов одного размера, при этом

утверждается неизменность появления каустикоподобных структур. Не ясно, сохраняется ли при этом размер структур и статистика ослабления/усиления потока и насколько мог бы повлиять на результат выбор другого приближения для спектра мощности турбулентного магнитного поля.

- В диссертации используется приближение изотропного и стационарного источника космических лучей. Это приближение может нарушаться, если частицы вылетают преимущественно вдоль открытых силовых линий поля и с сохранением адиабатического инварианта. Задержка при распространении космических лучей, которые отклоняются на угол порядка нескольких градусов (как получается из моделирования) может достигать до миллиона лет и применимость стационарного приближения может быть ограничена.

- В диссертации не обсуждается, к каким количественным изменениям в фактически наблюдаемой картине может привести то обстоятельство, что реальные инструменты обладают ограниченной точностью определения энергии космических лучей и их химического состава.

- Для вычисления типичной картины отклонения космических лучей в разных местах используются разные значения индукции межгалактического магнитного поля и его длины корреляции, но нет внятного объяснения такого выбора.

- В диссертации на стр. 14 и 34 приводятся численно различающиеся величины, характеризующие вероятность и величину отклонения распределения космических лучей от изотропного. Из текста диссертации неясно относятся ли разные числа к разным модельным ситуациям.

- Обычно эффект ГЗК (Грейзена-Зацепина-Кузьмина), упомянутый во введении относится только к потерям энергии протонов при взаимодействии с реликтовыми фотонами (так называемые фото-пионные процессы). Хотя в первых работах авторы упоминают фоторасщепление ядер, взаимодействующих с реликтовым излучением, обычно этот процесс к ГЗК не относят.

- Имеется пересечение результатов диссертации с работами Narari et al. 1999, 2002, на которые ссылается автор. В последней из этих работ так же получено каустико-образное распределение частиц, испущенных источником.

- Из текста диссертации не ясно, была ли проведена проверка того, влияет ли точность расчетов траекторий частиц на результаты и, в частности, не связано ли

с недостаточной точностью исчезновение каустико-образной структуры при радиусе 100 Мпк на рис. 7 в первой главе. Если структура становится сильно изрезанной, то, вероятно, нужна более высокая точность расчетов траекторий, чтобы ее увидеть.

- Текст диссертации содержит множество опечаток, жаргонизмов, пропущенные или наоборот лишние слова, надписи на некоторых рисунках частично или полностью сделаны на английском языке, некоторые утверждения следует раскрыть подробнее, а сокращения могут затруднять чтение.

В ходе защиты диссертации и обсуждения указанных замечаний соискатель Долгих К.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и согласился с замечаниями. В частности, соискатель подтвердил, что ссылается на работы Nagai с соавторами (ссылки [49-51,72]). В то же время в работах Nagai рассмотрена геометрия плоскопараллельного пучка, а в диссертации пучок, изотропно расходящийся от источника. Другая геометрия приводит к новым уравнениям, полученным в диссертации впервые, что можно увидеть из сравнения уравнения (4) и уравнения (3).

В отзывах указано, что вышеперечисленные замечания и опечатки не имеют принципиального характера и не снижают значимости и общей высокой оценки результатов работ автора диссертации.

Полученные соискателем результаты уже сейчас применяются в работах по исследованию космических лучей, а также могут быть использованы в работе научных организаций, таких как ФИАН, ИКИ РАН, ФТИ им. Иоффе, ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ, НГУ, ИКФИА СО РАН и др.

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

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Разработана методика оптимизации компьютерного моделирования распространения космических лучей предельно высоких энергий и алгоритмы визуализации результатов моделирования.

- Показано что при распространении космических лучей в турбулентном магнитном поле существует каустикоподобный режим.
- В каустикоподобном режиме исследовано перераспределение наблюдаемого потока от источников и наблюдаемые изображения источников, в зависимости от взаимного расположения источника и наблюдателя в турбулентном магнитном поле.
- Показано, что в каустикоподобном режиме, в отличие от классической теории диффузии, центр изображений источников не совпадает с направлением на источник.
- Исследованы интерпретации горячего пятна в области Центавра А, наблюдаемого обсерваторией Пьера Оже. Показано, что галактика М83 может быть источником горячего пятна с учетом отклонения космических лучей в галактическом магнитном поле. В то же время, сама радиогалактика Центавр А может быть источником наблюдаемого избытка только в случае взаимной компенсации отклонений в галактическом и внегалактическом магнитных полях, вероятность чего составляет около 0.5% при подходящей величине внегалактического магнитного поля.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: обнаружен новый режим распространения космических лучей в турбулентном поле, а также показано, что изображение источника зачастую не подчиняется распределению фон Мизеса–Фишера. Применительно к проблематике диссертации результативно использованы численные методы, а также проведена модернизация программного кода CRBeam.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что результаты уже применяются в работах по исследованию космических лучей.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Достоверность результатов подтверждается воспроизводимостью результатов при использовании разных подходов, а также согласием результатов диссертации с результатами других авторов в тех случаях, в которых это возможно.

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены соискателем лично или при его определяющем участии. Вклад соискателя во всех опубликованных совместных работах по теме диссертации является ключевым. Соискателем разработан новый модуль программного пакета CRBeam, выполнено моделирование распространения космических лучей предельно высоких энергий в межгалактических магнитных полях, реализован программный код для визуализации результатов моделирования. Соискателем исследован каустикоподобный режим диффузии, выполнен анализ систематического смещения изображений источников во внегалактических магнитных полях, проверены гипотезы о возможных источниках избытка потока космических лучей в области Центавра А.

На заседании 26 февраля 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Долгих К.А. ученую степень кандидата физико-математических наук за исследование нового режима распространения космических лучей в турбулентном магнитном поле.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 8 докторов наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - **18**, против - **0**, 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.

26.02.2026

м.п.