

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЗМИРАН

кандидат физ.-мат. наук,

А.А.Абунин

М.П. 29.01.2026

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В.Пушкова Российской Академии Наук
на диссертацию Долгих Константина Александровича "Построение модели
горячих пятен космических лучей предельно высоких энергий с учётом меж-
галактических магнитных полей", представленную на соискание ученой сте-
пени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоре-
тическая физика.

Диссертационная работа К.А.Долгих посвящена исследованию
распространения частиц космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ)
в межгалактическом магнитном поле. Тема является важной и актуальной
как для общей проблемы происхождения космических лучей, так и для
анализа имеющихся в настоящее время экспериментальных данных,
полученных в крупнейших экспериментах Telescope Array и Auger, в которых
были обнаружены области небесной сферы, в направлении на которые
наблюдается избыток частиц с энергией больше 10^{19} эВ (так называемые
«горячие пятна»).

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и
двух приложений, полный объем составляет 88 страниц.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации,
формулируются цели и приводятся основные результаты и положения,
выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматривается распространение частиц КЛСВЭ,
изотропно выпущенных из одной точки в случайном магнитном поле.
Исследуется распределение концентрации частиц на сфере, окружающей
источник для случая слабых отклонений. Обнаружено, что при радиусе
сферы меньше 100 корреляционных длин случайного магнитного поля
концентрация частиц сильно неоднородна. Наблюдаются узлы и филаменты с
повышенной концентрацией и области с пониженной концентрацией (войды).
Выведена аналитическая формула (5) для концентрации частиц.

Во **второй главе** исследуется угловое распределение частиц,
приходящих от точечного источника. Показано, что это распределение сильно

зависит от того, куда попадает наблюдатель - в узел, филамент или войд. Разработан специальный метод нацеливания, позволяющий увеличить вероятность попадания частиц в область наблюдения, и, как следствие, сократить время вычислений.

В третьей главе полученные результаты используются для моделирования распространения от близких потенциальных источников КЛСВЭ. Показано, что угловой размер «горячего пятна» может быть меньше, чем средний угол отклонения, вычисленный в приближении диффузии по углам. Это связано с тем, что частицы распространяются в конкретной реализации случайного магнитного поля. При моделировании распространения от галактик Центавр А и М83 учитывается отклонение не только в случайном межгалактическом поле, но и в магнитном поле нашей Галактики. Сделан вывод о том, что наиболее вероятным источником «горячего пятна», обнаруженного в эксперименте Auger является активная галактика М83.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и новизна

Использованные в диссертации подходы и методы изложены подробно и являются хорошо обоснованными. Все результаты, полученные автором являются новыми. По материалам диссертации опубликовано 5 работ в журналах, рекомендуемых ВАК.

Значимость

Результаты, полученные в диссертации могут быть использованы в работе научных организаций, таких как ФИАН, ИКИ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ и др., а также при формировании программ будущих исследований по астрофизике.

Из интересных результатов следует отметить обнаруженное сильное влияние случайного магнитного поля на наблюдаемый спектр КЛСВЭ (Рис.13, глава 2), а также возможность того, что угловой размер «горячего пятна» может быть меньше, чем средний угол отклонения, вычисленный в приближении диффузии по углам (глава 3).

Замечания:

- 1) Обычно эффект ГЗК (Грейзена-Зацепина-Кузьмина), упомянутый во введении, относят только к потерям энергии протонов при взаимодействии с реликтовыми фотонами (так называемые фотопионные процессы). Хотя в первых работах этих авторов и упоминается фоторасщепление ядер, взаимодействующих с реликтовым излучением, обычно этот процесс к ГЗК эффекту не относят.
- 2) 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.

- 3) Была ли проведена проверка того, влияет ли численная точность расчетов траекторий частиц на результаты? В частности, не связано ли с недостаточной точностью исчезновение каустико-образной структуры при радиусе сферы в 100 Мпк (Рис.7, глава 1)? Если структура становится сильно изрезанной, то, вероятно, необходима более высокая точность расчетов траекторий, чтобы ее увидеть.
- 4) В тексте встречаются опечатки.

Указанные замечания никоим образом не снижают важности проделанной работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержит интересные результаты, полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Долгих Константин Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По материалам диссертации был сделан доклад на общеинститутском теоретическом семинаре ИЗМИРАН 19 января 2026 г.

Отзыв составил главный научный сотрудник
Лаборатории астрофизических исследований ИЗМИРАН
д.ф.-м.н.

В.Н.Зиракашвили
27.01.2026

Сведения об организации:

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук

Адрес: 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4 , ИЗМИРАН

Тел: +7 (495) 851-01-20

Факс: +7 (495) 851-01-24

E-mail: izmiran@izmiran.ru

Подпись заверяю:

Ученый секретарь ИЗМИРАН,
кандидат физ.-мат. наук:

А.И. Рез

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации
соискателя

в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. **Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I.**, Galactic origin of ultrahigh energy cosmic rays // *Physical Review D*. 2024. -Т. 110. -№. 2 - С. 023016.
2. **Дворников М. С., Ахметьев П. М.**, Эволюция магнитного поля в пространственно-неоднородных аксионных структурах // *Теоретическая и математическая физика*. 2024. -Т. 218. -№ 3. -С. 601–618.
3. **Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунин А.А., Мелкумян А.А., Прямушкина И.И., Оленева В.А., Янке В.Г.**, ОСНОВНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И СОПУТСТВУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ В МАГНИТНЫХ ОБЛАКАХ // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2024. -Т. 64. -№ 1. - С. 29-38.
4. **Akhmetiev P, Dvornikov M.**, Magnetic fields in inhomogeneous axion stars // *International Journal of Modern Physics D* 2024. -Т. 33. -№ 2. -С. 2450001.
5. **Dvornikov M.**, PRODUCTION OF RELIC GRAVITATIONAL WAVES AND THE BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE BY RANDOM HYPERMAGNETIC FIELDS // *Physics of Atomic Nuclei*. 2023. -Т. 86. -№ 4. -С. 577-582.
6. **Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I.** CONTRIBUTION FROM NEARBY SOURCES TO THE OBSERVED SPECTRA AND ANISOTROPY OF ULTRAHIGH-ENERGY COSMIC RAYS // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023. -Т. 87. -№ 7. -С. 890-892.
7. **Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I.**, ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS FROM PAST ACTIVITY OF ANDROMEDA GALAXY // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. 2022. - Т. 519. -№ 1. -С. L5-L9.
8. **Dvornikov M., Semikoz V.B.**, INFLUENCE OF THE HYPERMAGNETIC FIELD NOISE ON THE BARYON ASYMMETRY GENERATION IN THE SYMMETRIC PHASE OF THE EARLY UNIVERSE // *The European Physical Journal C - Particles and Fields*. 2021. -Т. 81. -№ 11. -С. 1001.
9. **Птускин В.С., Зиракашвили В.Н.**, О ДИФФУЗИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ОБРАТНЫМ ВЛИЯНИЕМ НА КАСКАД МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. -Т. 85. -№ 4. -С. 490-493.