E-ISSN 2181-1466
9 772181 146004

ISSN 2181-6875
9 772181 687004

@buxdu_uz @buxdu1 @buxdu1 www.buxdu.uz

Научный вестник Бухарского государственного университета
Scientific reports of Bukhara State University
10(1)/2025

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTI



10(1)/2025

УДК 53

ПЕРВИЧНЫЕ ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Хамраев Юлдаш Бурханович,
Самаркандский государственный педагогический институт,
yu-hamrayev@mail.ru
Янке Виктор Гугович,
Институт Пушкова (ИЗМИРАН) РАН
yanke@izmiran.ru
Абдурахмонов Мухиддин,
Самаркандский государственный педагогический институт
Тошмуродов Нуриддин Пардакулович,
Самаркандский государственный педагогический институт
nuriddintoshmurodov94@mail.ru

Аннотация. *В настоящей работе выполнен комплексный анализ взаимодействия первичных галактических космических лучей (ГКЛ) с магнитным полем Земли и особенностей проявления геомагнитных эффектов. Рассмотрены широтные вариации потоков, энергия и направленная фильтрация частиц в магнитосфере, а также влияние солнечной активности на локальные значения жёсткости отсечки $R_c(\phi,t)$. Использованы обобщённые ряды наземных нейтронных мониторов, данные спутниковых миссий и модельные расчёты R_c. Полученные результаты важны для оценки радиационных рисков в авиации и на околоземных орбитах, а также для совершенствования прогностических моделей космической погоды.*

Ключевые слова: *галактические космические лучи, геомагнитный эффект, жёсткость отсечки, нейтронный монитор, магнитосфера, космическая погода, анизотропия, полярные эффекты.*

PRIMARY GALACTIC COSMIC RAYS AND GEOMAGNETIC EFFECTS

Abstract. *This paper presents a comprehensive analysis of interactions between primary galactic cosmic rays (GCRs) and the Earth's magnetic field, with emphasis on geomagnetic effects. Latitude-dependent flux variations, energy-dependent filtering of low-energy particles, and solar-activity-driven modulations are discussed. The study synthesizes ground-based neutron monitor records, satellite observations, and model computations of cutoff rigidity $R_c(\phi,t)$. The outcomes are relevant for radiation risk assessments in aviation and near-Earth space operations, and for improving space weather forecasting tools.*

Keywords: *galactic cosmic rays, geomagnetic effect, cutoff rigidity, neutron monitor, magnetosphere, space weather, anisotropy, polar effects.*

BIRINCHI GALAKTIK KOSMIK NURLAR VA GEOMAGNETIK TA'SIRLAR

Annotatsiya. *Ushbu maqolada birlamchi galaktik kosmik nurlarning Yer magnit maydoni bilan o'zaro ta'siri va geomagnit effektlarning namoyon bo'lishi tahlil qilinadi. Geomagnit kenglik va quyosh faolligiga bog'liq ravishda kosmik nurlar oqimi va energiya spektridagi o'zgarishlar ko'rib chiqildi. Tadqiqotda neytron monitorlari, sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari va R_c modellashtiruvi ishlatiladi. Natijalar aviatsiya va kosmik texnika uchun radiatsiya baholashda geomagnit omillarni hisobga olish zarurligini ko'rsatadi.*

Kalit so'zlar: *galaktik kosmik nurlar, geomagnit effect, qattiqlik (Rc), neytron monitor, magnitosfera, kosmik ob-havo, anizotropiya, qutb effektlari.*

Введение. Космические лучи (КЛ) – это поток высокоэнергетических заряженных частиц (в основном протонов и ядер лёгких элементов), приходящих из внешних источников галактики и внегалактических объектов. Первичные галактические космические лучи (ГКЛ) подвергаются модуляции в гелиосфере и фильтрации в магнитосфере Земли. Траектории заряженных частиц искривляются, часть частиц отклоняется, часть не достигает атмосферы из-за магнитного экрана — это и есть геомагнитные эффекты.

Долгосрочное наблюдение за потоками КЛ важно не только для фундаментальной астрофизики, но и для прикладных задач: оценки радиационной нагрузки на самолётах, прогнозирования условий для работы электроники спутников и планирования пилотируемых миссий. В последние годы наблюдательные миссии (AMS-02, PAMELA, ACE) и широкая сеть наземных нейтронных мониторов обеспечили большое число высококачественных данных, что позволяет сочетать наблюдения и моделирование для детального изучения $R_c(\phi,t)$ — жёсткости отсечки как функции широты и времени.

В работе поставлены цель и задачи, направленные на систематизацию знаний о влиянии магнитного поля Земли на доступность первичных ГКЛ, а также на оценку практической значимости этих эффектов.

Цель и задачи исследования. Цель: исследовать влияние магнитного поля Земли и его временных возмущений на пространственное распределение и спектральные характеристики первичных галактических космических лучей у поверхности Земли.

Задачи:

• Систематизировать наблюдательные ряды нейтронных мониторов по широтам.

• Построить и проанализировать модельную зависимость жёсткости отсечки $R_c(\phi)$.

• Оценить влияние магнитных бурь (индексы K_p, Dst) на локальные изменения потока.

• Выработать рекомендации по учёту геомагнитных эффектов в оценках радиационной безопасности.

Объект и методы исследования. Объект исследования: первичные галактические космические лучи и их взаимодействие с магнитным полем Земли (магнитосферой).

Методология:

1. Наблюдательные данные. Обобщённые ряды нейтронных мониторов (Oulu, Tashkent, Alma- Ata, Mexico City и др.) используются для оценки широтной зависимости интенсивности и временных вариаций.

2. Спутниковые данные. AMS-02, PAMELA, ACE – для определения формы энергетического спектра первичных частиц в диапазоне $0.1–10^3$ GeV.

Моделирование жёсткости отсечки. В приближённой форме жёсткость отсечки R_c аппроксимируется: $R_c(\phi) \approx R_0 \cos^4 \phi$,

где ϕ – геомагнитная широта, R_0 – параметр, зависящий от локальных особенностей магнитного поля. Более точные расчёты выполняются методом обратной трассировки траекторий заряженных частиц в заданной конфигурации магнитного поля (модель Tsyga- nenko и её модификации).

3. Статистический анализ. Корреляционный анализ временных рядов с индексами геомагнитной активности (K_p, Dst) и спектральный анализ краткосрочных вариаций.

4. Визуализация. Построение кривых $I(\phi)$ и $R_c(\phi)$ средствами pgfplots; табличное сравнение репрезентативных станций.

Анализ литературы. За последние 10–15 лет исследования в области модуляции КЛ и геомагнитной фильтрации существенно продвинулись. Potgieter (2013) дал обзор процессов модуляции в гелиосфере; Usoskin et al. (2017) — анализ вариаций потоков в полярных областях; Mishev et al. (2021) — моделирование отсечек; Koldobskiy et al. (2021) и Adriani et al. (2017) исследовали временную эволюцию спектров по данным AMS-02 и PAMELA. Работы по численному моделированию (Tsyganenko) обеспечивают инструменты расчёта локальных значений R_c с учётом возмущений магнитосферы.

Обзор показывает необходимость сочетания наблюдений и моделирования: наблюдательные ряды дают эмпирические тренды, а расчёты жёсткости отсечки позволяют интерпретировать энергетическую фильтрацию.

Результаты моделирования и наблюдений.

Широтная зависимость интенсивности

Модельные и наблюдательные данные демонстрируют возрастание интенсивности КЛ с увеличением геомагнитной широты. В простейшем подходе зависимость интенсивности $I(\phi)$ можно аппроксимировать как:

$$I(\phi) = I_0 + a\phi + b\phi^2,$$

где I_0, a, b — эмпирические параметры, определяемые по данным станций. На практике форма кривой определяется локальной топографией и высотой станции, а также текущим состоянием магнитосферы.

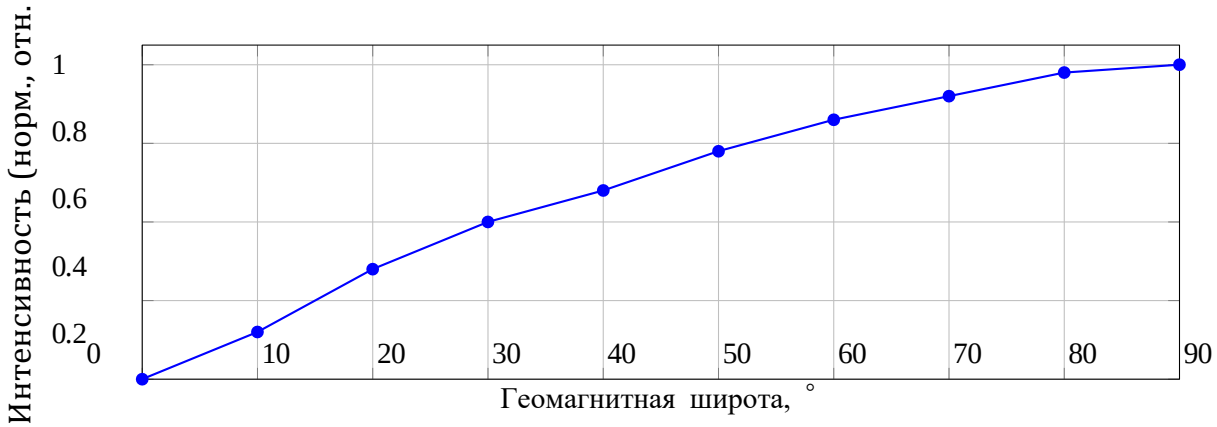


Рисунок 1. Модельная/идеализированная зависимость интенсивности КЛ от геомагнитной широты

Жёсткость отсечки $R_c(\phi)$

Используя приближение $R_c(\phi) \approx R_0 \cos^4 \phi$ с $R_0 \approx 15$ GV для приблизительной оценки, получаем характерную форму, убывающую к полюсам.

Жёсткость отсечки $R_c(\phi)$

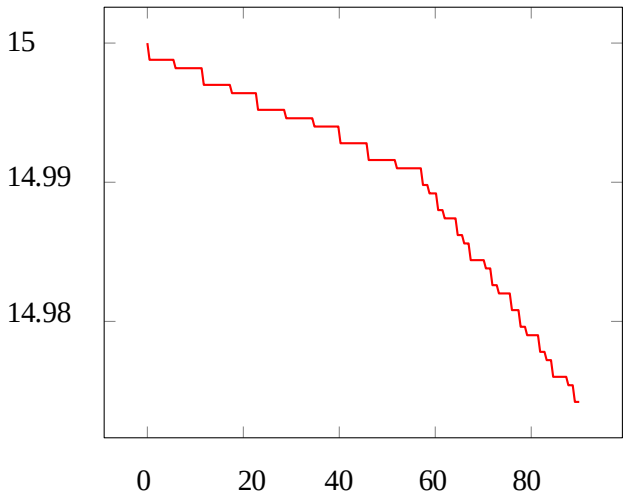


Рисунок 2. Модельная зависимость жёсткости отсечки $R_c(\phi)$ (приближённая формула)

Влияние магнитных бурь. Кратковременные возмущения магнитосферы (высокие значения индексов K_p, отрицательные всплески Dst) могут приводить к временному снижению R_c в отдельных областях и, как следствие, к вспышкам потока низкоэнергетических частиц на наземных станциях. Анализ корреляций показывает устойчивую связь между резкими изменениями нейтронного потока и крупными геомагнитными возмущениями.

Обсуждение. Результаты моделирования и анализ данных позволяют выделить несколько ключевых замечаний:

• Широтный эффект: экваториальные регионы демонстрируют наивысшие значения R_c, что

ограничивает проникновение низкоэнергетических компонент; полярные регионы наиболее подвержены доступу этих компонент.

• Энергетическая селективность: магнитосферный фильтр действует как энергоёмкий порог – частицы ниже локальной R_c не достигают атмосферы.

• Темпоральная изменчивость: магнитные бури и транзиентные возмущения изменяют локальные значения R_c и вызывают быстрые вариации нейтронного потока.

• Практические последствия: повышенная радиационная нагрузка на авиамаршрутах в высоких широтах и возможные риски для электроники спутников при бурных эпизодах.

Для точного количественного соответствия модели и наблюдений необходимо выполнять расчёты с использованием современных неоднородных моделей магнитного поля (Tsyganenko, TS04) и полной трассировки частичных траекторий в реальном времени.

Практическая значимость и научная новизна. Практическая значимость: предложенная схема анализа и модельные оценки R_c могут быть использованы при оперативной оценке радиационной обстановки для авиакомпаний и операторов космических аппаратов, а также при развитии систем прогноза космической погоды.

Научная новизна: интеграция обобщённых рядов нейтронных мониторов с приближенными и более точными расчётами жёсткости отсечки, а также акцент на временной изменчивости $R_c(\phi,t)$ при учёте магнитных бурь.

Сводная таблица (пример).

Таблица 1.

Репрезентативные станции и типичные относительные значения потока (иллюстрация)

Станция	Геогр. широта	Отн. интенсивность	Комментарий
Oulu (Finland)	65˚ N	Высокая	Близко к геомагнитному полюсу, чувствительна к полярным эффектам
Tashkent (Uzbekistan)	41˚ N	Средняя	Средние широты, влияние R_c заметно
Alma-Ata (Kazakhstan)	43˚ N	Средняя	Высота станции влияет на поток
Mexico City (Mexico)	19˚ N	Низкая	Экваториальные широты, высокая фильтрация

Выводы.

1. Геомагнитная конфигурация Земли определяет пространственное распределение и спектр первичных ГКЛ у поверхности.

2. Жёсткость отсечки $R_c(\phi,t)$ является ключевым параметром для оценки доступа низкоэнергетических частиц и должна учитываться при расчётах радиационной нагрузки.

3. Для прикладных задач (авиация, спутники) необходимо интегрировать расчёты R_c с оперативными данными о магнитосферной активности.

4. Перспективы: развитие динамических моделей $R_c(\phi,t)$ и их валидация по единой сети нейтронных мониторов и спутниковым наблюдениям.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Potgieter M.S. Solar modulation of cosmic rays // Living Reviews in Solar Physics. – 2013. – Vol. 10. – P. 3.

2. Usoskin I.G., Koldobskiy S.A., Kovaltsov G.A. et al. Cosmic ray variability and geomagnetic effects // Space Science Reviews. – 2017. – Vol. 212. – P. 383–408.

3. Bieber J.W., Evenson P.A. Cosmic ray anisotropy and geomagnetic effects // Astroparticle Physics. – 2019. – Vol. 104. – P. 47–58.

4. Mishev A., Usoskin I., Koldobskiy S. Modelling of geomagnetic cutoff rigidities // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2021. – Vol. 126, e2020JA028.

5. Maurin D., Melot F., Taillet R. Cosmic ray data from ground-based and satellite observations // Advances in Space Research. – 2014. – Vol. 54. – P. 350–365.

6. Gieseler J., Heber B., Herbst K. An empirical modification of the force field approach // Astronomy