DOI: 10.12737/szf-123202608
EDN: BAXQQR
УДК 523-62, 523.9

Поступила в редакцию 10.02.2026
Принята к публикации 30.04.2026

СВЯЗЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ПАРАМЕТРАМИ ГЕЛИОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ БУРИ 10–12 МАЯ 2024 Г.

RELATIONSHIP BETWEEN GEOMAGNETIC THRESHOLDS OF GALACTIC COSMIC RAYS AND HELIOSPHERIC PARAMETERS DURING THE MAY 10–12, 2024 STORM

О.А. Данилова
Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия, md1555@mail.ru

В.Е. Сдобнов
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sdobnov@iszf.irk.ru

O.A. Danilova
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch RAS,
St. Petersburg, Russia, md1555@mail.ru

V.E. Sdobnov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sdobnov@iszf.irk.ru

Аннотация. Галактические космические лучи представляют собой потоки заряженных энергичных частиц, пронизывающие межпланетное пространство. Под действием геомагнитного поля заряженные частицы космических лучей меняют свою траекторию. Часть из них, с жесткостью ниже характерного для пункта их измерения порогового значения (называемого жесткостью геомагнитного обрезания или геомагнитным порогом, R), не доходит до земной поверхности.

В данной работе геомагнитные пороги R, а также их изменения ΔR во время очень сильной магнитной бури 10–12 мая 2024 г. по отношению к спокойным условиям на шести разноширотных станциях были рассчитаны двумя методами: 1) методом, в котором траектории частиц космических лучей вычисляются численно в модельном магнитном поле магнитосферы ($R_{эфф}$); 2) методом спектрографической глобальной съемки по наблюдательным данным регистрации космических лучей мировой сетью станций (R_{crc}).

Проведено сравнение полученных результатов. Выявлено, что изменения геомагнитных порогов космических лучей для данной бури, вычисленные обоими методами, хорошо коррелируют между собой. Наиболее геоэффективными являются вертикальная составляющая B_z и полное скалярное значение B межпланетного магнитного поля, в то время как его B_y-компонента практически не влияет на изменения пороговых жесткостей для всех станций. Также ΔR хорошо коррелируют с геомагнитными индексами Dst и K_p, с параметром электрического поля E_y и с динамическими параметрами солнечного ветра — плотностью и давлением, тогда как со скоростью солнечного ветра сколько-нибудь существенной корреляции не наблюдается. Анализ показал, что реакция ΔR на контролирующие электромагнитные параметры и индексы геомагнитной активности с широтой станции наблюдения для данной бури почти не меняется.

Abstract. Galactic cosmic rays (CRs) are charged energetic particle fluxes that penetrate interplanetary space. Under the influence of the geomagnetic field, charged cosmic ray particles change their trajectories. Some of these particles, with rigidity below the threshold value characteristic of the measurement site (called the geomagnetic cutoff rigidity, or geomagnetic threshold, R), do not reach the Earth surface.

In this study, geomagnetic thresholds R as well as their changes relative to quiet conditions (ΔR) for six stations at different latitudes have been calculated using two methods: 1) a method in which cosmic ray particle trajectories are calculated numerically in a model magnetic field of the magnetosphere (R_{eff}); 2) a spectrographic global survey based on observational data from cosmic ray recordings by a global network of stations (R_{sgs}) during a very strong magnetic storm on May 10–12, 2024.

The obtained results were compared. It was found that the changes in cosmic ray geomagnetic thresholds for this storm, calculated by both methods, correlate well with each other. The most geoeffective components are the vertical component of the interplanetary magnetic field B_z and its full scalar value B, whereas the B_y component of the field has virtually no effect on changes in threshold rigidities for all stations. ΔR also correlates well with the geomagnetic indices Dst and K_p, with the electric field parameter E_y, and with the solar wind's dynamic parameters (density and pressure), while no significant correlation is observed with solar wind speed. Analysis has shown that the response of ΔR to the controlling electromagnetic parameters and geomagnetic activity indices remains virtually unchanged with the latitude of the observation station for the given storm.

Keywords: cosmic rays, geomagnetic threshold, cosmic ray cutoff rigidity, interplanetary magnetic field, geomagnetic activity.

© 2026. Данилова О.А., Сдобнов В.Е.
Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY-NC-ND) License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Ключевые слова: космические лучи, геомагнитные пороги, жесткость геомагнитного обрезания, межпланетное магнитное поле, индексы геомагнитной активности.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная буря 10–12 мая 2024 г., вызванная серией рентгеновских вспышек на Солнце и связанными с ними корональными выбросами массы (coronal mass ejection, CME), была одной из самых мощных бурь в 25-м солнечном цикле. В эти дни магнитосфера Земли пережила сильнейшее возмущение за последние двадцать лет, названное в иностранной литературе бурей Гэннон (в честь доктора Дженнифер Гэннон — ведущего специалиста в области исследований космической погоды, скончавшейся за неделю до этого события) [Lawrence et al., 2025].

Эта буря была связана с большой активной областью AR13664, расположенной в центре солнечного диска чуть ниже экватора, которая 7 мая (координаты этой области на этот день: S21°, E05°) стремительно выросла в размерах (до 15 диаметров Земли в поперечнике, по размеру она стала близка к известному пятну Кэррингтона, вызвавшему в 1859 г. самую сильную за время наблюдений магнитную бурю) и приобрела сложную магнитную структуру, способствующую образованию рентгеновских вспышек класса X и M. С 8 по 11 мая AR13664 дала шесть вспышек класса X: X1.0, X1.0, X2.2, X1.1, X3.9, X5.8, которые вызвали CME со скоростями от 530 до 1614 км/с [Hayakawa et al., 2025]. Именно эти CME и стали причиной магнитной бури 10–12 мая 2024 г.

Общепринятыми две независимые классификации силы магнитных бурь:

- По трехчасовому планетарному индексу геомагнитной активности K_p [Bartels et al., 1939], который оценивает возмущения геомагнитного поля и отражает влияние солнечного ветра на магнитосферу Земли в высоких широтах.
- По буревому индексу *Dst* [Loewe, Prölss, 1997], который показывает эффект глобального западного кольцевого тока, вызывающего уменьшение *H*-компоненты геомагнитного поля на главной фазе магнитных бурь на низких широтах.

В табл. 1 представлена классификация магнитных бурь из работы [Loewe, Prölss, 1997].

Таблица 1

Классификация магнитных бурь

K_p	Класс	Тип бури	*Dst*
$K_p=5$	G1	слабая	$Dst<-30$ нТл
$K_p=6$	G2	умеренная	$Dst<-50$ нТл
$K_p=7$	G3	сильная	$Dst<-100$ нТл
$K_p=8$	G4	очень сильная	$Dst<-200$ нТл
$K_p=9$	G5	экстремальная	$Dst<-350$ нТл

Следует отметить, что классификация бурь по индексу *Dst* занижена по интенсивности относительно K_p.

Данная магнитная буря относится к наиболее сильным (экстремальным) геомагнитным бурям ($Dst<-350$ нТл), которые вызываются преимущественно транзиентными событиями — CME и связанными с ними межпланетными структурами: коротирующими областями взаимодействия, областями сжатия перед межпланетными CME, магнитными облаками и магнитными «поршнями» [Gosling, 1993; Gonzalez et al., 1999; Yermolaev et al., 2013; Richardson, 2018]. Кроме того, эта сильнейшая буря относится к классу бурь с внезапным началом (storm sudden commencement, SSC), которым предшествует внезапное изменение магнитного поля Земли, сопровождающееся заметным изменением величины индексов геомагнитной активности *Dst* и K_p.

В наши дни мощные геомагнитные возмущения представляют серьезную угрозу для общества, зависимого от технологий. Геомагнитно-индуцированные токи, протекающие в наземных системах в периоды повышенной геомагнитной активности, могут нанести ущерб электросетям [Boteler et al., 1989; Pulkkinen et al., 2001; Rodger et al., 2017], железным дорогам [Liu et al., 2016; Love et al., 2019; Patterson et al., 2023], нефте- и газопроводам [Khanal et al., 2019; Ingham et al., 2022; Oliveira et al., 2024] и подводным кабелям [Chakraborty et al., 2022; Boteler et al., 2024]. Экстремальные космические погодные явления также могут нарушать спутниковую навигацию, искажая или задерживая передачу сигнала через ионосферу [Roy, Paul, 2013; Hapgood, 2017; Демьянов, Ясюкевич, 2021; Пилипенко и др., 2023].

Последствия бури в мае 2024 г. были обобщены в нескольких исследованиях: Parker, Linares [2024] описывают, как возмущения геомагнитного поля во время события повлияли на траектории спутников на низкой околоземной орбите; в работе [Schennetten et al., 2024] описано влияние события на радиационные поля на используемых в авиации высотах.

После двух десятилетий преимущественно мягких геомагнитных условий 25-й солнечный цикл принес увеличение частоты вспышек на Солнце, что, вероятно, вызовет дальнейшие геомагнитные бури и потенциально суровую космическую погоду. Поэтому изучение информации об экстремальных событиях, таких как буря 10–12 мая 2024 г., важно для понимания их истинного воздействия как в глобальном, так и в локальном масштабе. Непрерывные наблюдения и дальнейшие исследования солнечной активности, распространения CME в межпланетном пространстве и обусловленных ими космических и наземных эффектов необходимы для улучшения возможностей прогнозирования с целью уменьшения воздействия экстремальных геомагнитных бурь в будущем [Lawrence et al., 2025] .

Вариации потоков КЛ на Земле во время магнитных бурь обусловлены изменениями геомагнитных порогов, или пороговой жесткости геомагнитного обрезания КЛ (ΔR). Эти величины зависят от экра-

нирующих свойств магнитного поля Земли. Геомагнитное экранирование уменьшается во время бурь, поскольку магнитное поле внутри магнитосферы уменьшается из-за формирования и усиления глобальных токовых систем. В результате этого космические частицы могут проникать на более низкие широты. В свою очередь, динамика токовых систем зависит от динамики электромагнитных параметров солнечного ветра (СВ) в околоземном пространстве.

Отклик геомагнитного экранирования на изменения в электромагнитной обстановке, в СВ и межпланетном магнитном поле (ММП) во время магнитных бурь недостаточно изучен, несмотря на ряд исследований в этой области с использованием теоретических и экспериментальных подходов [Kanekal et al, 1998; Belov et al., 2005; Kress et al., 2010; Adriani et al., 2016]. Однако однозначного ответа на вопрос о том, какие параметры ближнего космоса контролируют транспортировку КЛ во время возмущений, еще не найдено. Для того чтобы можно было сделать обобщенные выводы об изменении геомагнитного экранирования во время межпланетных и геомагнитных возмущений, как минимум необходима достаточно обширная база соответствующих данных для геомагнитных бурь различного типа и интенсивности, вызванных разными источниками на Солнце и в межпланетном пространстве, к тому же происходящих на разных фазах солнечного цикла. Ранее мы вычислили (см. [Птицына и др., 2019; Данилова и др., 2023, 2025] и ссылки там) изменения геомагнитных порогов и их корреляции с параметрами гелио- и геосферы для одной умеренной и восьми сильных геомагнитных бурь 23-го, 24-го и 25-го циклов солнечной активности. Большинство рассмотренных бурь было зарегистрировано на фазах спада и в минимуме циклов. В настоящей работе для дальнейшего расширения нашего архива данных рассмотрены ΔR во время экстремальной суперсильной бури в мае 2024 г. вблизи максимума 25-го цикла, имеющей другие причины возникновения и иной ход развития, нежели бури, рассмотренные в предыдущих наших работах. Это исследование является логическим продолжением работы [Данилова и др., 2025].

Цель данной работы — определение геомагнитных порогов R, рассчитанных двумя разными методами, в период экстремальной бури 10–12 мая 2024 г., анализ зависимости их изменений ΔR от электромагнитных параметров СВ и определение наиболее геоэффективных параметров для этой бури.

1. МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Геомагнитные пороги R получены двумя независимыми методами:

1. $R_{эфф}$ (модельные пороги) — методом траекторных расчетов, который заключается в численном интегрировании траекторий КЛ [Shea et al., 1965] в магнитном поле возмущенной магнитосферы по модели Цыганенко Ts01 (см. [Tsyganenko et al., 2003] и ссылки там). Источниками магнитного поля магнитосферы в этой модели являются основные токовые системы: токи Чепмена—Ферраро, которые удерживают земное магнитное поле внутри границы магнитосферы, симметричный и частичный объемные круговые токи, система токов хвоста, продольные токи и токи на магнитопаузе. Параметризация токовых систем была проведена с использованием спутниковых данных, измеренных во время 37 геомагнитных бурь с $Dst \leq -65$ нТл [Tsyganenko et al., 2003]. Чтобы ограничить поле внутри магнитосферы, был включен блок, описывающий поле взаимодействия, которое представляет собой эффект проникновения ММП внутрь магнитосферы. Поле взаимодействия представлено в виде однородного магнитного поля, которое пропорционально поперечной компоненте и направлено вдоль нее. Для расчетов магнитного поля от внутренних источников используется представление главного магнитного поля Земли в виде разложения в ряд по сферическим гармоническим функциям до $n=10$. В модели Ts01 в качестве входных параметров используются буревой индекс Dst, динамические параметры СВ — плотность N и скорость V, а также компоненты ММП B_y и B_z.

2. $R_{СГС}$ (наблюдательные пороги) — методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [Kovalev et al., 2022]. Этот метод позволяет по наземным наблюдениям КЛ на мировой сети станций получать информацию о распределении первичных КЛ по энергиям и питч-углам в ММП, а также об изменениях планетарной системы геомагнитных порогов за каждый момент наблюдений.

Вариации геомагнитных порогов ΔR определялись для шести станций космических лучей, расположенных таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали основную область пороговых жесткостей R_c, подверженных влиянию геомагнитного поля (табл. 2). R_c — это минимальная жесткость или энергия, которой должна обладать заряженная частица космических лучей, чтобы проникнуть сквозь магнитное поле Земли и быть зарегистрированной конкретным наземным детектором (нейтронным монитором или мюонным телескопом).

Значения ΔR получены для каждого часа как разности между R, рассчитанными за период 10–12 мая 2024 г. и в спокойный день 8 мая 2024 г.

Затем вычислялись коэффициенты корреляции k и стандартные ошибки s (полученные из анализа регрессионных уравнений) между значениями геомагнитных порогов ($\Delta R_{СГС}$ и $\Delta R_{эфф}$) на перечисленных станциях и параметрами СВ, ММП и индексами геомагнитной активности. Индексы K_p и Dst и параметры ММП (B, B_z, B_y), электромагнитного поля (азимутальная составляющая E_y) и СВ (N, V, P и плазменное β) взяты на сайте [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html]. (Плазменное β — это отношение давления плазмы к магнитному давлению (β-параметр равен отношению теплового давления к магнитному: $\beta = NkT/(B^2/(8\pi))$) на интервалах времени развития геомагнитных бурь.)

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Изменения параметров гелиосферы и геомагнитных порогов во время магнитной бури 10–12 мая 2024 г.

Как уже отмечалось, скорость СМЕ, явившегося одной из причин геомагнитной бури 10–12 мая 2024 г.,

Таблица 2

Станции космических лучей

Название станции	Международный код	Географическая широта	Географическая долгота	R_c, ГВ
Кингстон (Австралия)	KGSN	42.99° S	147.29° E	1.9
Москва (Россия)	MOSC	55.47° N	37.32° E	2.08
Иркутск (Россия)	IRKT	52.47° N	104.03° E	3.13
Алматы (Казахстан)	AATB	43.25° N	76.92° E	5.21
Рим (Италия)	ROME	41.90° N	12.52° E	6.11
Обсерватория Emilio Segre (Израиль)	ESOI	33.30° N	35.80° E	10.73



Рис. 1. Полярное сияние ночью с 10 на 11 мая (с 23:30 до 23:50 LT) 2024 г. в Ленинградской области (снимки сделаны А. Ковалем на Мурманском шоссе в 60 км от Санкт-Петербурга)

оказалась выше обычной почти в два раза, величина магнитного поля пятна — в шесть раз, направление магнитного поля выброса также было подходящим для начала магнитной бури, поэтому первый удар по земной магнитосфере произошел уже вечером 10 мая.

По данным обсерватории ИКИР ДВО РАН, буря началась 10 мая (DOY = 131) в 17:06 UT и сразу превысила уровень G4. После полуночи на 11 мая буря усилилась до максимального уровня G5. В течение суток 11 мая уровень возмущенности был не ниже G4 с периодическими подъемами до G5.

Поскольку Земля попадала в сектор распространения CME, специалисты по космической погоде прогнозировали магнитную бурю самого высокого класса. В реальности же за счет наложения эффектов от шести CME скорость нарастания возмущенности и ее средний уровень превзошли все прогнозы.

Область полярных сияний распространилась на всю территорию России, вплоть до Кавказа. На рис. 1 представлены фотографии полярного сияния в окрестности Санкт-Петербурга. Всполохи полярных сияний наблюдали жители всей Европы, до ее южных регионов — Италии, Франции и Испании, а также в США, Мексике и Новой Зеландии. Впервые после 1859 и 1921 гг. увидели полярное сияние жители Пуэрто-Рико.

Спад геомагнитной активности начался 12 мая, но поскольку 10 и 11 мая на Солнце произошли крупные вспышки, то были основания ожидать, что они окажут воздействие на геомагнитную обстановку. Однако выбросы плазмы от этих вспышек хотя и подошли к Земле 12 мая, но при своем распространении в межпланетной среде отклонились и взаимодействовали с магнитосферой Земли по касательной. Уровень геомагнитных возмущений 12–13 мая не превышал G2–G3, и эта повторная геомагнитная буря завершилась к полудню 13 мая.

На рис. 2 представлены параметры гео- и гелиосферы во время геомагнитной бури 10–12 мая 2024 г. Приведены кривые (сверху вниз), соответствующие полному скалярному значению ММП B и его компоненте B_z, азимутальной компоненте E_y электрического поля, параметру плазмы β, скорости V, плотности N, давлению P СВ, а также индексам геомагнитной активности K_p и Dst. Как видно на рис. 2, главная фаза началась около 17:00 UT 10 мая, когда Dst начинает резко падать. В 02:00 UT 11 мая Dst достигает минимума (−406 нТл).

Считается, что отрицательное значение B_z в течение длительного времени (≥3 ч) является необходимым условием возникновения магнитной бури [Gonzalez, Tsurutani, 1987]. Характерной особенностью этой бури является то, что на главной фазе B_z-компонента неоднократно резко меняла не только значение, но и знак (см. рис. 2). Вариации E_y были похожими на вариации B_z, но обратной ориентации и достигли пикового значения 26.2 за два часа до мак-

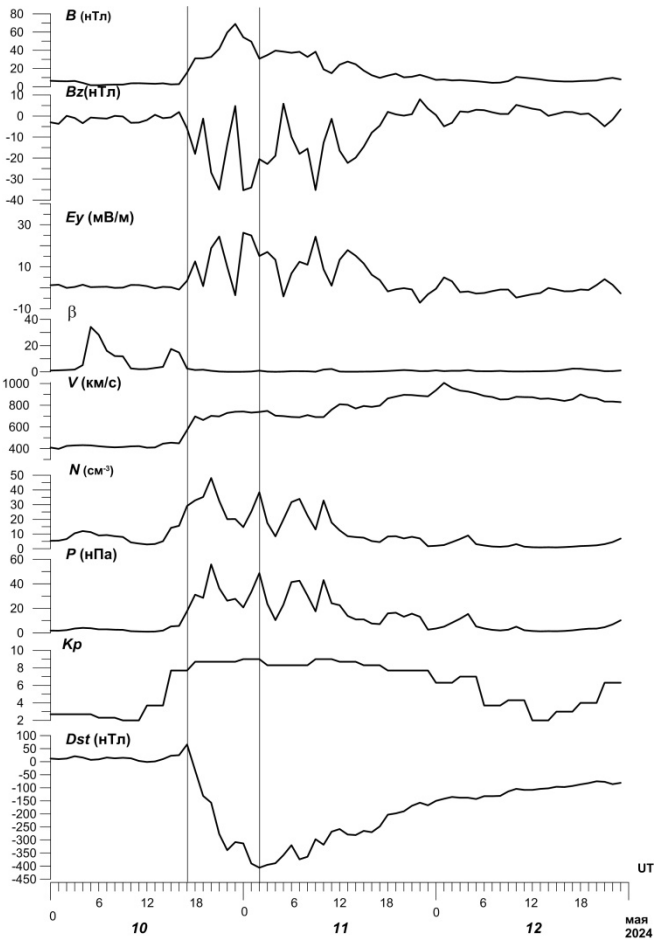


Рис. 2. Параметры ММП и солнечного ветра, а также индексы геомагнитной активности во время бури 10–12 мая 2024 г. (сверху вниз). Вертикальные линии отмечают границы главной фазы бури

симума бури. Трехчасовой индекс K_p сохранял значение в районе 8–9 в течение почти полутора суток, с 15:00 UT 10 мая до 0:00 UT 12 мая, и только после этого начал постепенно снижаться. Параметр плазмы β на главной фазе бури почти не менялся, оставаясь близким к нулю, как и в дальнейшем на фазе восстановления. На рис. 2 видна связь в поведении большинства параметров.

На рис. 3 приведены рассчитанные вариации геомагнитных порогов $\Delta R_{эфф}$ (*а*) и ΔR_{crc} (*б*) для всех исследуемых станций во время бури 10–12 мая 2024 г. Кривые $\Delta R_{эфф}$ расположены сверху вниз в порядке убывания пороговых жесткостей R_c (увеличения широты станции, кроме станции KGSN, находящейся в Южном полушарии). Для иллюстрации связи динамики геомагнитных порогов с эволюцией бури на рисунке показаны также вариации давления СВ (панель *в*) и *Dst*-индекса (панель *г*). Рисунок 3, *а*, *б* демонстрирует нестандартное поведение изменения порогов во время данной бури. На рис. 3, *а* видно, что $\Delta R_{эфф}$ достигают минимальных значений не только во время максимума бури (минимума *Dst*), но и несколькими часами позже. Отличие от других бурь состоит в том, что максимальное понижение порогов на величину $\Delta R_{эфф} \approx -1.4$ ГВ сначала наблюдается на самой низкоширотной станции ESOI на главной фазе в 02:00 UT 10 мая, в момент максимума бури (*Dst*=−406 нТл), затем через час — на станции MOSC с более высокой широтой и через четыре часа — на среднеширотной станции IRKT.

Из рис. 3, *б* видно, что ΔR_{crc} резко снижается на главной фазе и достигает максимального падения (−1.1 ГВ) в 22:00 UT 10 мая, за 4 часа до максимума бури, на среднеширотных ст. MOSC и IRKT. Кроме того, значения ΔR_{crc} на ст. IRKT имеют второй выраженный минимум −1.0 ГВ на восстановительной фазе в 10:00 UT 11 мая.

Наш результат подтверждает ранее полученные сведения о том, что жесткости геомагнитного обрезания наиболее сильно подавляются в максимуме главной фазы бури, когда *Dst* достигает минимума. Ответ геомагнитного экранирования на изменения условий в СВ вне главной фазы гораздо менее понят к настоящему времени.

В целом, как видно на рис. 3, кривые ΔR неплохо отражают изменения *Dst*, имея аналогичные подъемы и падения, и показывают, что спад интенсивности бури начинается только к 13 мая.

В работе [Kress et al., 2004] на основе анализа наблюдений и расчетов показано, что увеличение динамического давления СВ *P* подавляет жесткости геомагнитного обрезания во время SSC бури 24 ноября 2001 г. Из работ [Flückiger et al., 1990; Belov et al., 2005] следует, что геомагнитные пороги, наоборот, увеличиваются в начале бури по отношению к уровню спокойного поля из-за образования токов на магнито-

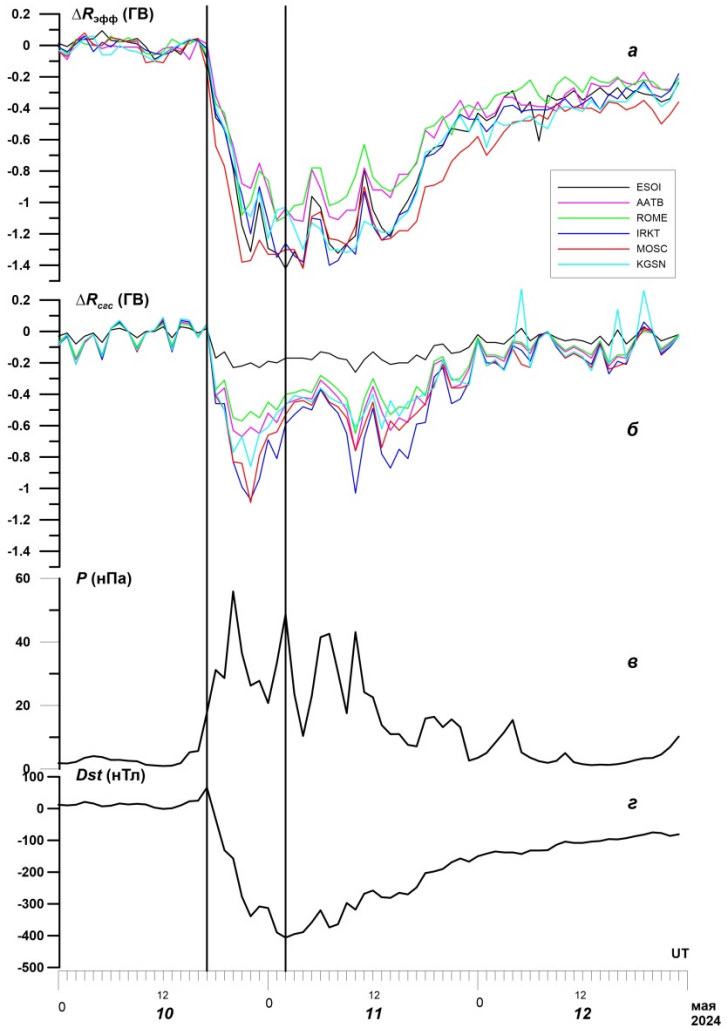


Рис. 3. Вариации геомагнитных порогов $\Delta R_{эфф}$ (*а*) и $\Delta R_{сгс}$ (*б*), давления СВ P (*в*) и *Dst*-индекса (*г*) во время бури мая 2024 г. Вертикальные линии отмечают границы главной фазы бури

паузе. В работах [Kress et al., 2010, 2015] указано, что увеличение P может вызвать как увеличение, так и уменьшение жесткостей в зависимости от условий в СВ и местного времени. Для данной бури мы видим (см. рис. 3), что рост P влечет за собой падение значений ΔR.

2.2. Корреляционный анализ

На временных кривых (см. рис. 3) видно, что как $\Delta R_{эфф}$, так и $\Delta R_{сгс}$ изменяются в соответствии с изменениями параметров СВ, ММП и геомагнитной активности, т. е. с эволюцией бури. Для того чтобы количественно оценить связь вариаций геомагнитных порогов и исследуемых параметров, были вычислены коэффициенты корреляции k и стандартные ошибки s, представленные в табл. 3 и 4.

Из табл. 3, 4 видно, что самая высокая корреляция наблюдается между изменениями геомагнитных порогов ΔR и индексами геомагнитной активности *Dst*, а следовательно, вклад кольцевого тока в геомагнитное экранирование во время этой бури наибольший. При этом для $\Delta R_{эфф}$ значения коэффициентов корреляции с *Dst* несколько выше, чем для $\Delta R_{сгс}$. Так, для ст. AATB и IRKT значения k для $\Delta R_{эфф}$ максимальны — 0.98 ± 0.10, для остальных станций они почти такие же, в то время как для $\Delta R_{сгс}$ колеблются в районе 0.8. Также высокая, но несколько меньшая отрицательная корреляция видна в обоих случаях для K_p-индекса. Заметим, что ошибки вычисления s малы для более высоких k (с параметрами электромагнитного поля и геомагнитной активности) и увеличиваются при малых k, таким образом, самые большие ошибки оказываются у наименее геоэффективных параметров.

Следует отметить тот факт, что коэффициенты корреляции ΔR со всеми параметрами, рассчитанные для станций на разных широтах обоими методами, крайне незначительно различаются между собой. Таким образом, для рассматриваемой бури мы не наблюдаем ярко выраженной широтной зависимости.

Результаты, полученные двумя различными методами, находятся в хорошем согласии. Это подтверждается высокими коэффициентами корреляции (выше 0.8) между значениями $\Delta R_{эфф}$ и $\Delta R_{сгс}$ (последняя строка табл. 4).

Как видно из табл. 3 и 4, наибольшее влияние как на $\Delta R_{эфф}$, так и на $\Delta R_{сгс}$ на всех станциях оказывают геомагнитная активность (*Dst*- и K_p-индексы), E_y-компонента электрического поля, B_z-компонента

Таблица 3

Коэффициенты корреляции $\Delta R_{эфф}$ с параметрами гео- и гелиосферы

	ESOI	ROME	AATB	IRKT	MOSC	KGSN
Dst	0.97±0.11	0.97±0.10	0.98±0.08	0.98±0.10	0.96±0.13	0.97±0.11
K_p	–0.79±0.29	–0.80±0.22	–0.78±0.23	–0.77±0.29	–0.82±0.27	–0.77±0.28
E_y	–0.71±0.33	–0.72±0.25	–0.69±0.27	–0.69±0.34	–0.67±0.35	–0.65±0.33
B_z	0.70±0.33	0.71±0.26	0.68±0.27	0.67±0.34	0.66±0.36	0.63±0.34
B_y	–0.09±0.47	–0.07±0.36	–0.07±0.37	–0.06±0.47	–0.09±0.47	–0.09±0.44
B	–0.81±0.27	–0.81±0.21	–0.78±0.23	–0.78±0.29	–0.81±0.28	–0.75±0.29
V	–0.39±0.43	–0.39±0.34	–0.40±0.34	–0.40±0.43	–0.47±0.42	–0.43±0.40
N	–0.48±0.41	–0.51±0.31	–0.47±0.33	–0.47±0.41	–0.47±0.42	–0.42±0.40
P	–0.71±0.33	–0.73±0.25	–0.71±0.26	–0.70±0.33	–0.71±0.34	–0.66±0.33
β	0.45±0.42	0.44±0.33	0.43±0.33	0.44±0.42	0.48±0.42	0.44±0.40

Таблица 4

Коэффициенты корреляции $\Delta R_{сгс}$ с параметрами гео- и гелиосферы, а также с $\Delta R_{эфф}$

	ESOI	ROME	AATB	IRKT	MOSC	KGSN
Dst	0.82±0.05	0.82±0.11	0.81±0.13	0.80±0.19	0.80±0.16	0.77±0.16
K_p	–0.74±0.05	–0.75±0.12	–0.75±0.15	–0.74±0.21	–0.74±0.18	–0.71±0.17
E_y	–0.63±0.06	–0.65±0.15	–0.65±0.17	–0.65±0.24	–0.63±0.21	–0.62±0.19
B_z	0.62±0.06	0.64±0.15	0.64±0.17	0.64±0.24	0.62±0.21	0.61±0.20
B_y	–0.10±0.08	–0.11±0.19	–0.12±0.22	–0.15±0.31	–0.13±0.27	–0.10±0.25
B	–0.77±0.05	–0.78±0.12	–0.78±0.14	–0.78±0.20	–0.81±0.16	–0.79±0.15
V	–0.26±0.08	–0.24±0.19	–0.24±0.22	–0.23±0.31	–0.26±0.26	–0.21±0.24
N	–0.56±0.07	–0.57±0.16	–0.56±0.18	–0.55±0.26	–0.57±0.22	–0.59±0.20
P	–0.73±0.06	–0.73±0.13	–0.73±0.15	–0.71±0.22	–0.72±0.19	–0.73±0.17
β	0.33±0.08	0.33±0.18	0.33±0.21	0.32±0.30	0.34±0.25	0.31±0.23
$\Delta R_{эфф}$	0.85±0.04	0.87±0.09	0.85±0.12	0.84±0.17	0.87±0.13	0.80±0.15

и общее ММП *B*, а также динамические параметры СВ *P* и *N*. При этом B_y-компонента ММП, скорость СВ *V* и β-параметр плазмы не оказывают сколько-нибудь значительного влияния ни на $\Delta R_{сгс}$, ни на $\Delta R_{эфф}$.

3. ВЫВОДЫ

Проведенный в данной статье анализ связи пороговых жесткостей КЛ и параметров гео- и гелиосферы во время экстремальной бури 10–12 мая 2024 г. показал следующее:

1. Изменение модельных порогов $\Delta R_{эфф}$ показывает максимальное падение ~−1.4 ГВ на станции с самой низкой широтой ESOI (что явилось для нас неожиданностью) на главной фазе, в момент максимума бури (*Dst*=−406 нТл), через час наблюдается второе падение $\Delta R_{эфф}$ до такого же уровня на станции с более высокой широтой — MOSC, а через 4 ч — на среднеширотной станции IRKT.

2. Изменение наблюдательных порогов $\Delta R_{сгс}$ резко снижается на главной фазе и показывает максимального падения (−1.1 ГВ) за 4 ч до максимума бури на ст. MOSC и IRKT. Кроме этого, значения $\Delta R_{сгс}$ имеют второй выраженный минимум −1.0 ГВ на восстановительной фазе 11 мая на ст. IRKT.

3. Наиболее высокая корреляция между изменениями порогов ΔR и *Dst* свидетельствует о наибольшем вкладе кольцевого тока в геомагнитное экранирование.

4. Высокая корреляция наблюдается между значениями ΔR и электромагнитными параметрами магнитосферы *B*, B_z, E_y, а также динамическим давлением СВ *P*, в то время как с другими параметрами она значительно ниже.

5. Изменения геомагнитных порогов $\Delta R_{эфф}$ и $\Delta R_{сгс}$ практически не зависят от B_y-компоненты ММП.

6. Специфический отклик в изменении жесткости геомагнитного обрезания ΔR на изменения параметров гелиосферы и магнитосферы на разных фазах магнитной бури, а также зависимость этого отклика от широты обусловлены различным относительным вкладом магнитосферных глобальных токовых систем в эти периоды.

Однако определение однозначных зависимостей ΔR от конкретной токовой системы на каждом этапе бури является сложной и до сих пор нерешенной задачей, поскольку взаимодействие солнечного ветра и магнитосферы, которое контролирует вариации ΔR, еще недостаточно понято. Для выявления пространственных особенностей геомагнитных эффектов в проникновении КЛ в магнитосферу Земли и их сравнения для различных бурь требуются дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы количественно оценили, какие параметры геомагнитосферы внесли наибольший вклад в вариации геомагнитных порогов и были наиболее геоэффективными в период сильной магнитной бури 10–12 мая 2024 г. Для этого мы провели анализ корреляций значений ΔR, рассчитанных двумя методами, с параметрами геомагнитной активности, СВ и ММП. Выявлено, что геомагнитные пороги, вычисленные обоими методами, наиболее сильно коррелируют с геомагнитной активностью, особенно с *Dst*-индексом, что указывает на наибольший вклад кольцевого тока в вариации жесткостей.

Может показаться очевидным, что изменения эффективных жесткостей $\Delta R_{эфф}$ должны иметь высокую степень корреляции с входными параметрами используемой модели магнитосферного поля. В случае модели Ts01 это *Dst*-индекс, плотность N и скорость V СВ, а также B_z- и B_y-компоненты ММП. Однако следует учесть, что зависимость значений $\Delta R_{эфф}$ от этих входных параметров в полуэмпирической модели Ts01 является не прямой, а опосредованной, через вычисление траекторий частиц в модельном магнитном поле, которое задается суперпозицией различных токовых систем. При этом сами эти токовые системы, их относительный вклад в магнитное поле модели и, соответственно, в вариации жесткостей $\Delta R_{эфф}$ делает эту зависимость гораздо более сложной. Вообще говоря, описание магнитосферного магнитного поля в терминах учета вкладов различных токовых источников является достаточно распространенным подходом. Другие магнитосферные модели, такие как параболоидная [Alexeev et al., 2001] или ориентированная на различные индивидуальные события модель [Ganushkina et al., 2018], также описывают наблюдаемые вариации поля с использованием комбинаций различных индивидуальных источников [Kalegaev et al., 2005]. Соотношения, учитывающие относительную важность вкладов токов хвоста и, например, кольцевого тока при разных условиях возмущенности в геомагнитосфере, в моделях Цыганенко также различаются и зависят от конкретной модели [Kalegaev, 2011; Dubyagin et al., 2014; Castillo et al., 2017]. При исследовании конкретных бурь при помощи моделей Цыганенко получено, что корреляция значений $\Delta R_{эфф}$ с входными параметрами модели может быть как высокой, так и низкой [Adriani et al., 2016; Птицына и др., 2019; Ptitsyna et al., 2023]. В частности, анализ, проведенный в данной работе, показал, что для бури в мае 2024 г. для зависимости $\Delta R_{эфф}$—*Dst* наблюдается очень высокий коэффициент корреляции $k = 0.96–0.98$. Кроме того, для зависимости между $\Delta R_{эфф}$ и K_p, который не является входным параметром модели, получено $|k| = 0.77–0.82$, т. е. наблюдается более высокая степень корреляции, чем со всеми остальными входными параметрами, кроме *Dst* и B (для которого $|k| = 0.75–0.81$). Высокая степень корреляции (~0.7) получена также для параметров B_z, E_y и P. Напротив, k между значениями $\Delta R_{эфф}$ и параметрами СВ V, N, а также параметром плазмы β существенно меньше: $|k| \le 0.5$ на всех станциях. B_y-компонента ММП вообще не оказывает никакого влияния ($k < 0.1$).

Считается, что основную роль в развитии магнитосферных возмущений играют пересоединение магнитного поля СВ и поля геомагнитосферы, а также динамическое давление СВ P, ответственное за сжатие магнитосферы [Dungey, 1961; Russell, 1976; Akasofu, 1984]. Оба эти фактора ослабляют геомагнитный экран, уменьшают жесткость геомагнитного обрезания и облегчают проникновение плазмы СВ в магнитосферу и атмосферу Земли. И действительно, при исследовании корреляционных связей между жесткостями обрезания и параметрами СВ и магнитосферы для различных интенсивных бурь получались высокие коэффициенты корреляции как с B_z, так и с динамическими параметрами СВ (см., например, [Птицына и др., 2019; Данилова и др., 2023]). Для бури в мае 2024 г. мы получили, что контроль изменений геомагнитных порогов осуществляется давлением солнечного ветра P (k~0.7) и B_z-компонентой ММП (k~0.6–0.7), изменение значений которой и обеспечило процесс пересоединения магнитных силовых линий.

Тот факт, что изменение геомагнитных порогов ΔR, рассчитанных обоими методами, наиболее сильно коррелирует с *Dst*-индексом, свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле динамики жесткостей геомагнитного обрезания КЛ на всех этапах бури. Значительная чувствительность к изменениям *Dst*-индекса является самой типичной чертой взаимодействия изменений геомагнитных порогов ΔR с геомагнитосферой, которая отмечена ранее в работах [Птицына и др., 2019; Данилова и др., 2023, 2025]. Связь значений ΔR с другими параметрами (магнитными или динамическими) сильно зависит от особенностей конкретного геомагнитного возмущения [Птицына и др., 2025].

Проведенный нами анализ показал, что реакция и $\Delta R_{эфф}$, и $\Delta R_{сгс}$ на контролирующие электромагнитные параметры, а также на *Dst* и K_p почти не меняется с широтой станции наблюдения для данной бури. В целом корреляция между $\Delta R_{эфф}$ и $\Delta R_{сгс}$ достаточно высокая (0.8–0.87) (см. последнюю строку табл. 4). Это свидетельствует о том, что оба используемых метода достаточно удовлетворительно описывают изменения жесткости геомагнитного обрезания в зависимости от изменения геомагнитных и межпланетных параметров.

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI [http://omniweb.gsfc.nasa.gov], а также базы данных NMDB [https://nmdb.eu/].

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты для $\Delta R_{сгс}$ получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [http://ckp-rf.ru/ckp/3056/] и научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (Сеть СКЛ) [https://ckp-rf.ru/usu/433536].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Взаимосвязь параметров магнитосферы с геомагнитными

порогами космических лучей в зависимости от широты. *Космические исследования*. 2023, т. 61, № 1, с. 21–30. http://doi.org/10.31857/S0023420623010028.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е. Геомагнитное обрезание космических лучей во время магнитной бури 23–24 марта 2023 г.: связь с параметрами солнечного ветра и геомагнитной активностью с учетом широтных эффектов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 42–49. http://doi.org/10.12737/szf-113202505 / Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E. Geomagnetic cutoff of cosmic rays during the March 23–24, 2023 magnetic storm: Relationship with solar wind parameters and geomagnetic activity taking into account latitudinal effects. *Sol.-Terr. Phys*. 2025, vol. 11, iss. 3, pp. 37–43. http://doi.org/10.12737/stp-113202505.

Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 2, с. 30–52. http://doi.org/10.12737/szf-72202104 / Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V. Space weather: Risk factors for global navigation satellite systems. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, iss. 2, pp. 28–47. http://doi.org/10.12737/stp-72202104.

Пилипенко В.А., Черников А.А., Соловьев А.А. и др. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023, т. 23, ES2008. http://doi.org/10.2205/2023ES000824.

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. и др. Влияние параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на вариации жесткости обрезания космических лучей во время сильных магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019, т. 59, № 5, с. 569–577. http://doi.org/10.1134/S0016793219050098.

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. Отклик жесткости геомагнитного обрезания космических лучей на изменения динамических и магнитных параметров солнечного ветра и геомагнитной активности во время бури 23–24 марта 2023 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2025, т. 65, № 4, с. 437–447. http://doi.org/10.31857/S0016794025040031.

Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.N., et al. PAMELA's measurements of geomagnetic cutoff variations during the 14 December 2006 storm. *Space Weather*. 2016, vol. 14, iss. 3, pp. 210–220. http://doi.org/10.1002/2016SW001364.

Akasofu S.-I. The magnetospheric currents: An introduction. *Magnetospheric Currents*. Washington: American Geophysical Union, 1984, pp. 29–48. (Geophys. Monograph Ser. vol. 28). http://doi.org/10.1029/GM028p0029.

Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., et al. Dynamic model of the magnetosphere: Case study for January 9–12, 1997. *J. Geophys. Res*. 2001, vol. 106, pp. 25683–25694. http://doi.org/10.1029/2001JA900057.

Bartels J., Heck N.H., Johnston H.F. The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1939, vol. 44, no. 4, pp. 411–454. http://doi.org/10.1029/ TE044i004p00411.

Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003. *J. Geophys. Res*. 2005, vol. 110, A09S20. http://doi.org/10.1029/2005JA011067.

Boteler D., Shier R., Watanabe T., Horita R. Effects of geomagnetically induced currents in the BC Hydro 500 kV system. *IEEE Trans. Power Deliv*. 1989, no. 4, pp. 818–823. http://doi.org/10.1109/61.19275.

Boteler D.H., Chakraborty S., Shi X., et al. An examination of geomagnetic induction in submarine cables. *Space Weather*. 2024, vol. 22, e2023SW003687. http://doi.org/10.1029/2023sw003687.

Castillo Y., Pais M.A., Fernandes J., et al. Geomagnetic activity at Northern Hemisphere's mid-latitude ground stations: How much can be explained using Ts05 model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2017, vol. 165–166, pp. 38–53. http://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.002.

Chakraborty S., Boteler D.H., Shi X., et al. Modeling geomagnetic induction in submarine cables. *Front. Phys*. 2022, vol. 10, 1022475. http://doi.org/10.3389/fphy.2022.1022475.

Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyshkina M., Liemohn M. Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2014, vol. 119, pp. 7243–7263. https://doi.org/10.1002/2014JA020122.

Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.* 1961, vol. 6, pp. 47–48. http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47.

Flückiger E.O., Smart D.F., Shea M.A. Determination the strength of the ring and the magnetopause currents during the initial phase of geomagnetic storm using cosmic ray data. *J. Geophys. Res.* 1990, vol. 95, no. A2, pp. 1113–1118. http://doi.org/10.1029/ JA095iA02p01113.

Ganushkina N.Y., Liemohn M.W., Dubyagin S. Current systems in the Earth's magnetosphere. *Rev. Geophys*. 2018, vol. 56, pp. 309–332. http://doi.org/10.1002/2017RG000590.

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT). *Planetary Space Sci.* 1987, vol. 35, pp. 1101–1109. http://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90015-8.

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, no. 3, pp. 529–562. https://doi.org/10.1023/A:1005160129098.

Gosling J.T. The solar flare myth. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 1993, vol. 98, no. A11, pp. 18937–18949. http://doi.org/10.1029/93JA01896.

Hapgood M. Satellite navigation — amazing technology but insidious risk: Why everyone needs to understand space weather. *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 545–548. http://doi.org/10.1002/2017sw001638.

Hayakawa H. Ebihara Y., Mishev A., et al. The solar and geomagnetic storms in 2024 May: A flash data report. *Astrophys. J*. 2025, vol. 979, 49, 26 p. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad9335.

Ingham M., Divett T., Rodger C., Sigley M. Impacts of GIC on the New Zealand gas pipeline network. *Space Weather*. 2022, vol. 20, e2022SW003298. http://doi.org/10.1029/2022sw003298.

Kalegaev V.V. Dynamic geomagnetic field models. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 7, pp. 855–865. http://doi.org/10.1134/S0016793211070073.

Kalegaev V.V., Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., et al. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms. *Ann. Geophys*. 2005, vol. 26, no. 2, pp. 523–533. https://doi.org/10.5194/angeo-23-523-2005.

Kanekal S., Baker D., Blake J., et al. High-latitude energetic particle boundaries and the polar cap: A statistical study. *J. Geophys. Res.: Space.* 1998, vol. 103, pp. 9367–9372. https://doi.org/10.1029/97JA03669.

Khanal K., Adhikari B., Chapagain N.P., Bhattarai B. HILDCAA — related GIC and possible corrosion hazard in underground pipelines: a comparison based on wavelet transform. *Space Weather*. 2019, vol. 17, pp. 238–251. http://doi.org/10.1029/2018sw001879.

Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2022, vol. 235, 105887. http://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105887.

Kress B.T., Hudson M.K., Perry K.L., Slocum P.L. Dynamic modeling of geomagnetic cutoff for the 23–24 November 2001 solar energetic particle event. *Geophys. Res. Lett*.

2004, vol. 31, L04808. http://doi.org/10.1029/2003GL018599.

Kress B.T., Mertens C.J., Wiltberger M. Solar energetic particle cutoff variations during the 29–31 October 2003 geomagnetic storm. *Space Weather*. 2010, vol. 8, S05001. http://doi.org/10.1029/2009SW000488.

Kress B.T., Hudson M.K., Selesnick R.S., et al. Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications. *J. Geophys. Res.: Space.* 2015, vol. 120, no. 7, pp. 5694–5702. http://doi.org/10.1002/2014JA020899.

Lawrence E., Beggan C.D., Richardson G.S., et al. The geomagnetic and geoelectric response to the May 2024 geomagnetic storm in the United Kingdom. *Front. Astron. Space Sci.* 2025, vol. 12, 1550923. http://doi.org/10.3389/fspas.2025.1550923.

Liu L., Ge X., Zong W., et al. Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway. *Space Weather*. 2016, vol. 14, pp. 754–763. http://doi.org/10.1002/2016sw001411.

Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res*. 1997, vol. 102, no. A7, pp. 14209–14213. http://doi.org/10.1029/96JA04020.

Love J.J., Hayakawa H., Cliver E.W. Intensity and impact of the New York railroad superstorm of May 1921. *Space Weather*. 2019, vol. 17, pp. 1281–1292. http://doi.org/10.1029/2019sw002250.

Oliveira D.M., Zesta E., Vidal-Luengo S. First direct observations of interplanetary shock impact angle effects on actual geomagnetically induced currents: the case of the Finnish natural gas pipeline system. *arXiv Prepr. arXiv*:2405.04647 11. 2024. http://doi.org/10.3389/fspas.2024.1392697.

Parker W.E., Linares R. Satellite drag analysis during the May 2024 geomagnetic storm. *Earth and Planetary Astrophysics*; *Space Physics*. 2024, arXiv:2406.08617. http://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08617.

Patterson C., Wild J., Boteler D. Modeling the impact of geomagnetically induced currents on electrified railway signaling systems in the United Kingdom. *Space Weather*. 2023, vol. 21, 3. http://doi.org/10.1029/2022sw003385.

Ptitsyna N.G., Danilova O.A., Tyasto M.I., Sdobnov V.E. Cosmic ray cutoff rigidity governing by solar wind and magnetosphere parameters during the 2017 Sep 6–9 solar-terrestrial event. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2023, vol. 246, 106067. http://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106067.

Pulkkinen A., Viljanen A., Pajunpää K., Pirjola R. Recordings and occurrence of geomagnetically induced currents in the Finnish natural gas pipeline network. *J. Appl. Geophys*. 2001, vol. 48, pp. 219–231. http://doi.org/10.1016/s0926-9851(01)00108-2.

Richardson I.G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. *Living Rev. Sol. Phys*. 2018, vol. 15, no. 1, pp. 1–95. http://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z.

Rodger C.J., Mac Manus D.H., Dalzell M., et al. Long-term geomagnetically induced current observations from New Zealand: Peak current estimates for extreme geomagnetic storms. *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 1447–1460. http://doi.org/10.1002/2017sw001691.

Roy B., Paul A. Impact of space weather events on satellite-based navigation. *Space Weather*. 2013, vol. 11, pp. 680–686. http://doi.org/10.1002/2013sw001001.

Russell C.T. Reconnexion in physics of solar planetary environments. *Proc. Intern. Symp. on Solar-Terr. Phys*. June 7–18 1976. 1976, vol. 2, pp. 526–540. http://doi.org/10.1029/SP008p0526.

Schennetten K., Matthiä D., Meier M.M., et al. The impact of the Gannon storm of May 2024 on the radiation fields at aviation altitudes and in low Earth orbits. *Front. Astronomy Space Sci*. 2024, vol. 11, 1498910. http://doi.org/10.3389/fspas.2024.1498910.

Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field. *J. Geophys. Res*. 1965, vol. 70, iss. 7, pp. 4117–4130. https://doi.org/10.1029/JZ070i017p04117.

Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? *J. Geophys. Res*. 2003, vol. 108, no. A5, 1209. http://doi.org/10.1029/2002JA009808.

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Occurrence rate of extreme magnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2013, vol. 118, pp. 4760–4765. http://doi.org/10.1002/jgra.50467.

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.htmls (дата обращения 20 мая 2025 г.).

URL: http://omniweb.gsfc.nasa.gov (дата обращения 20 мая 2025 г.).

URL: https://nmdb.eu/s (дата обращения 20 мая 2025 г.).

URL: http://ckp-rf.ru/ckp/3056/ (дата обращения 12 мая 2026 г.).

URL: https://ckp-rf.ru/usu/433536 (дата обращения 12 мая 2026 г.).

Как цитировать эту статью:

Данилова О.А., Сдобнов В.Е. Связь геомагнитных порогов галактических космических лучей с параметрами гелиосферы во время бури 10–12 мая 2024 г. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 3, с. 82–91. https://doi.org/10.12737/szf-123202608.