
ЖЕСТКОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ

GEOMAGNETIC CUTOFF RIGIDITY IN NEUTRON MONITOR LOCATIONS

П.А. Кручинин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, kruchinin_01@inbox.ru

С.А. Сирук

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, sstepana001@mail.ru

А.Г. Майоров

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, agmayorov@mephi.ru

В.В. Малахов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, vvmalakhov@mephi.ru

С.Ю. Александрин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, SYaleksandrin@mephi.ru

P.A. Kruchinin

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, kruchinin_01@inbox.ru

S.A. Siruk

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, sstepana001@mail.ru

A.G. Mayorov

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, agmayorov@mephi.ru

V.V. Malakhov

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, vvmalakhov@mephi.ru

S.Yu. Aleksandrin

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, SYaleksandrin@mephi.ru

Аннотация. Нейтронные мониторы (НМ), расположенные в разных точках планеты, позволяют проводить исследования временных, энергетических и угловых характеристик потоков галактических и солнечных частиц. Поскольку НМ находятся внутри магнитосферы Земли, их отклик зависит от места на поверхности планеты, которое можно характеризовать жесткостью геомагнитного обрезания (ЖГО). Рассчитанные значения ЖГО зависят от модели магнитного поля, даты и даже от численных методов. В работе приводятся вычисленные значения ЖГО в местах расположения некоторых нейтронных мониторов и проводится сравнение полученных значений с результатами расчетов других авторов, включая сопоставление временной динамики за последнее десятилетие. Показано, что значения ЖГО, полученные для 2020 г. в модели IGRF-14, отличаются от таковых в IGRF-13, однако уже для 2015 г. эта разница оказывается пренебрежимо мала. Продемонстрирована тенденция к уменьшению ЖГО со временем, особенно сильно проявляющаяся на средних широтах. Сравнение полученных нами значений ЖГО с результатами других авторов показало, что в большинстве случаев разница не превышает 0.2 ГВ. Подобные отклонения существенны лишь в приполярной области, где основную роль в экранировании частиц играет не магнитное поле Земли, а ее атмосфера. Показано, что точность используемого алгоритма сопоставима с точностью других алгоритмов и достаточна для расчетов отклика нейтронных мониторов.

Ключевые слова: геомагнитное поле, жесткость геомагнитного обрезания, космические лучи, нейтронные мониторы.

Abstract. Neutron monitors (NMs), located at different points on the planet, allow us to study the time, energy, and angular characteristics of galactic and solar particle fluxes. Since NMs are located inside Earth's magnetosphere, their response depends on their location on the planet's surface that can be characterized by the geomagnetic cutoff rigidity. Its calculation depends on the magnetic field model, the date, and even on numerical methods. The paper presents calculated geomagnetic cutoff rigidities at the locations of some neutron monitors, and compares the cutoff values with the calculation results obtained by other authors, including a comparison of the time dynamics over the past decade. We show that the geomagnetic cutoff rigidities obtained for 2020 by the IGRF-14 model differ from those derived by IGRF-13; however, for 2015 the difference between the models is negligible. We demonstrate a tendency for the geomagnetic cutoff rigidity to decrease over time, especially at midlatitudes. Comparison of the obtained geomagnetic cutoff rigidities with those obtained by other authors has shown that in most cases the difference does not exceed 0.2 GV. Such discrepancies are significant only in the circumpolar region, where particles are mostly shielded by Earth's atmosphere rather than by the geomagnetic field. We show that the accuracy of the algorithm in use is comparable to that of other existing instruments and is sufficient for calculating neutron monitor responses.

Keywords: geomagnetic field, geomagnetic cutoff rigidity, cosmic rays, neutron monitors.

ВВЕДЕНИЕ

Жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО) $R_c(\varphi, \lambda, h, \Theta, \Psi)$ — это минимальное значение магнитной жесткости (импульс частицы, деленный на ее заряд), которой должна обладать частица, чтобы достичь заданной точки в околоземном пространстве (задаваемой широтой φ , долготой λ и высотой h), двигаясь с определенного направления (характеризуемого зенитным углом Θ и азимутальным углом Ψ) [Cooke et al., 1991]. На практике наиболее часто используется так называемая эффективная вертикальная жесткость обрезания R_{eff} , которая рассчитывается для приходящих с вертикального направления частиц с учетом области полутени геомагнитного обрезания.

Знание ЖГО важно для многих прикладных и фундаментальных задач геофизики и физики космических лучей (КЛ), таких как оценка радиационной обстановки [Tezari et al., 2020], изучение динамики магнитного поля Земли и вариаций потока КЛ на больших временных масштабах [Gvozdevsky et al., 2018], исследование геомагнитных бурь [Tyasto et al., 2013] и моделирование отклика детекторов космического излучения [Mishev et al., 2020]. Точность восстановления ЖГО особенно важна при работе с нейтронными мониторами (НМ), расположенными в области $R_{\text{eff}} \sim 1$ ГВ, где геомагнитное обрезание КЛ конкурирует с атмосферным обрезанием [Poluianov, Batalla, 2022].

Помимо того, что ЖГО меняется со временем, значения для одного и того же периода, приведенные в разных работах [Smart, Shea, 2019; Abunina et al., 2020; Mishev et al., 2020; Gerontidou et al., 2021; Poluianov, Batalla, 2022], также различаются. Работа посвящена расчету значений эффективной вертикальной ЖГО в местах расположения нескольких НМ в 2015–2025 гг., изучению их временной динамики и сравнению с результатами других исследований.

1. МЕТОДИКА

Основным методом расчета ЖГО является решение уравнений движения заряженных частиц в различных моделях магнитного поля. В данной работе используется инструментарий GetTrajectory (GT) [<https://github.com/agmayorov/GTsimulation>]. Инструментарий включает в себя алгоритм трассировки, основанный на методе частиц в ячейках (particle-in-cell), реализованном в схеме Бунемана—Бориса [Boris, 1970, 1971]. Метод позволяет решать уравнения движения заряженных частиц в магнитном поле с сохранением кинетической энергии при длительном движении в сложных магнитных полях и, в частности, в магнитном поле Земли. Благодаря этому данный метод оказывается точнее и устойчивее, чем метод Рунге—Кутты, и быстрее, чем другие схемы с сохранением энергии [Mao, Wirz, 2011; Qin et al., 2013]. Расчеты проводились для протонов в точках пространства, соответствующих географическим координатам нейтронных мониторов (рис. 1). По-

скольку частицы, входящие в атмосферу под углами, отличными от 90° , должны пройти через большее количество вещества, определяющий вклад в темп счета нейтронных мониторов дают вертикально падающие частицы. В связи с этим обратная трассировка частиц (восстановление траектории в обратном по времени направлении) осуществлялась для вертикального направления прилета на высоте 20 км.

Для расчета ЖГО в выбранной точке пространства для выбранного направления прихода заряженной частицы ее обратная трассировка в магнитном поле проводилась до тех пор, пока не выполнялось одно из следующих условий:

- 1) частица достигла поверхности Земли (траектория альбедо);
- 2) частица достигла расстояния, равного 30 радиусам Земли (галактическая траектория);
- 3) время жизни частицы от начала трассировки достигло 20 с, но при этом ни одно из предыдущих условий не выполнено.

К первому и третьему типам относятся частицы с запрещенными траекториями, ко второму типу — частицы с жесткостью, соответствующей разрешенной траектории [Cooke et al., 1991].

В процессе работы использовалось магнитное поле, задаваемое эмпирическими моделями геомагнитного поля IGRF-13 [Alken et al., 2021] и IGRF-14 [<https://www.ncei.noaa.gov/products/international-geomagnetic-reference-field>].

В магнитном поле Земли нет четкой границы между разрешенной и запрещенной жесткостью геомагнитного обрезания заряженных частиц. Область, называемая полутенью, или пенумбра, представляет собой диапазон с хаотичным набором разрешенных и запрещенных жесткостей [Cooke et al., 1991], поэтому для расчетов в зоне предполагаемой полутени проводилась обратная трассировка частиц с шагом по жесткости 0.01 ГВ для средних широт и 0.001 ГВ для полярных областей. В качестве итогового значения ЖГО использовалось значение R_{eff} , которое задается формулой [Tyasto et al., 2013]:

$$R_{\text{eff}} = R_u - n_{\text{allowed}} \cdot \Delta R,$$

где R_u — верхняя граница полутени; n_{allowed} — число разрешенных полос между верхней и нижней границей полутени; ΔR — шаг по жесткости, с которым восстанавливается картина полутени геомагнитного обрезания.

2. ЗНАЧЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ

Эффективная ЖГО R_{eff} является одним из основных параметров для моделирования отклика нейтронных мониторов. Результаты, представленные в табл. 1–3, соответствуют 2025, 2020 и 2015 гг. Рассчитанные значения R_{eff} предназначены для использования в качестве справочных данных.

2.1. 2025 г.

Для вычисления значений жесткости геомагнитного обрезания использовалась модель магнитного

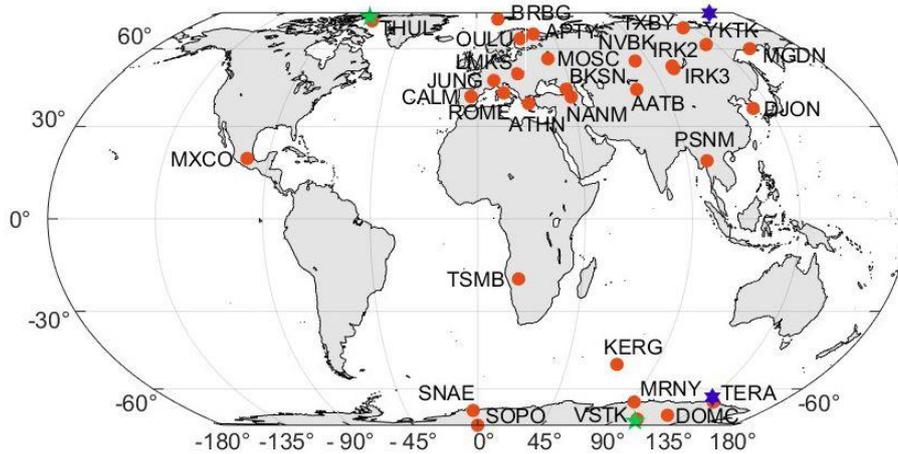


Рис. 1. Географическое положение рассматриваемых нейтронных мониторов; пятиконечными и шестиконечными звездами обозначены геомагнитные и магнитные полюса Земли в 2020 г. соответственно

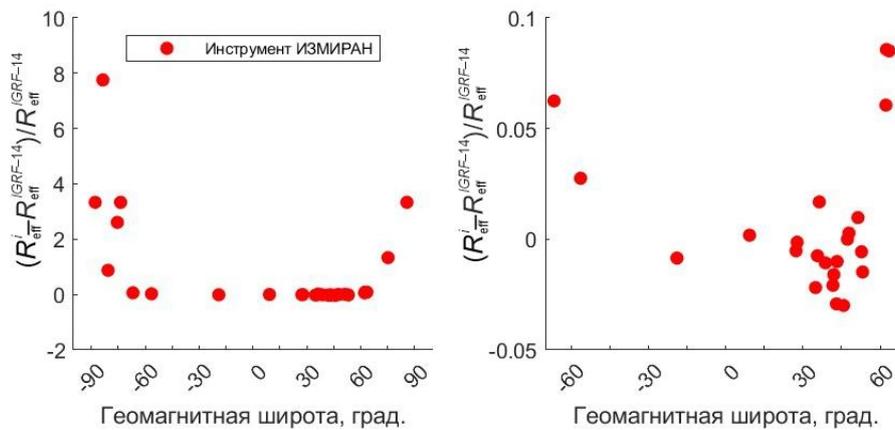


Рис. 2. Сравнение полученных нами значений ЖГО со значениями, рассчитанными с помощью калькулятора ИЗМИРАН, для 2025 г. во всем диапазоне геомагнитных широт (а) и без приполярных областей (б)

поля IGRF-14. Данные представлены в табл. 1. Полученные результаты сравниваются со значениями R_{eff} , вычисленными с помощью онлайн-калькулятора ИЗМИРАН “Cutoff 2050” [<https://tools.izmiran.ru/cutoff/>].

График отклонения вычисленных нами значений R_{eff} от значений, полученных с помощью калькулятора ИЗМИРАН, в зависимости от геомагнитной широты (рис. 2) показывает наибольшую разницу в полярных областях и минимальную в области средних и низких широт. Высоким широтам соответствует высокий градиент магнитного поля, и ЖГО принимает достаточно низкие значения (меньше 0.1 ГВ). Отклонение в восемь раз в этой области может быть связано с различием в алгоритмах трассировки частиц.

2.2. 2020 г.

В работах [Gerontidou et al., 2021; Smart, Shea, 2019] результаты представлены в виде планетарной сетки значений R_{eff} . Сеть восстанавливалась с определенным шагом по широте и долготе, поэтому значения R_{eff} для координат нейтронных мониторов получались интерполяцией полиномом третьей степени. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и 3.

Анализ рис. 3 показывает, что наибольшее отклонение возникает при сравнении наших результатов

с вычислениями в калькуляторе ИЗМИРАН для полярных областей, однако по абсолютному значению разница не превышает 0.1 ГВ. Наибольшее соответствие достигается с результатами работы [Gerontidou et al., 2021] — относительное отклонение не превышает 0.1. На рис. 3 проведено также сравнение со значениями, рассчитанными при помощи разработанного алгоритма, но в модели IGRF-13. Следует отметить, что обновленная версия главного поля IGRF-14 дает небольшой вклад в изменение значений ЖГО. Особенно это заметно для средних широт (40°–50°).

2.3. 2015 г.

В табл. 3, аналогичной табл. 1 и 2, представлены значения ЖГО, приведенные в работах [Smart, Shea, 2019; Mishev et al., 2020; Abunina et al., 2020].

На рис. 4 видно, что наибольшие различия (8–9 раз) наблюдаются при сравнении результатов наших расчетов с результатами калькулятора ИЗМИРАН и [Mishev et al., 2020] для полярных областей. Однако в области средних и низких широт наблюдается хорошее соответствие (0–0.1) значений ЖГО из всех рассматриваемых источников. Сравнение результатов, полученных с использованием IGRF-13 и IGRF-14, в таблице и на графике не приведено, поскольку для 2015 значения R_{eff} совпадают.

Таблица 1

Жесткости геомагнитного обрезания в 2025 г., рассчитанные для координат и высоты над уровнем моря станций

| Код станции | Название станции | Широта, град. | Долгота, град. | Высота, м | Геомагнитная широта, град. | R_{eff} , ГВ | |
|-------------|-------------------------------------|---------------|----------------|-----------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | | | | | GT, IGRF-14 | Инструмент ИЗМИРАН, IGRF |
| AATB | Alma-Ata B | 43.14 | 76.6 | 3340 | 34.88 | 5.95 | 5.82 |
| APTY | Apatity | 67.57 | 33.4 | 181 | 63.49 | 0.47 | 0.51 |
| ATHN | Athens | 37.97 | 23.78 | 260 | 36.34 | 8.31 | 8.45 |
| BKSN | Baksan | 43.28 | 42.69 | 1700 | 38.71 | 5.61 | 5.55 |
| BRBG | Barentsburg | 78.06 | 14.22 | 70 | 75.28 | 0.06 | 0.14 |
| CALM | Castilla-La Mancha | 40.56 | -3.16 | 708 | 43.24 | 6.95 | 6.88 |
| DJON | Daejon | 36.24 | 127.22 | 200 | 27.31 | 11.45 | 11.39 |
| DOMC | Dome C | -75.10 | 123.33 | 3233 | -83.56 | 0.01 | 0.12 |
| IRK2 | Irkutsk2 | 52.37 | 100.55 | 2000 | 43.02 | 3.08 | 2.99 |
| IRK3 | Irkutsk3 | 51.29 | 100.55 | 3000 | 41.65 | 3.36 | 3.29 |
| JUNG | Jungfrauoch IGY | 46.55 | 7.98 | 3570 | 47.27 | 4.52 | 4.52 |
| KERG | Kerguelen | -49.35 | 70.25 | 33 | -56.45 | 1.09 | 1.12 |
| LMKS | Lomnický štít | 49.20 | 20.22 | 2634 | 47.86 | 3.65 | 3.66 |
| MGDN | Magadan | 60.04 | 151.05 | 220 | 52.75 | 1.76 | 1.75 |
| MOSC | Moscow | 55.47 | 37.32 | 200 | 51.37 | 2.05 | 2.07 |
| MRNY | Mirny | -66.55 | 93.02 | 30 | -75.45 | 0.04 | 0.14 |
| MXCO | Mexico | 19.33 | -99.18 | 2274 | 27.73 | 7.40 | 7.39 |
| NANM | Nor-Amberd Neutron Monitor | 40.37 | 44.25 | 2000 | 35.63 | 6.69 | 6.64 |
| NVBK | Novosibirsk | 54.48 | 83 | 163 | 45.77 | 2.34 | 2.27 |
| OULU | Oulu Neutron Monitor | 65.05 | 25.47 | 15 | 62.24 | 0.66 | 0.70 |
| PSNM | Princess Sirindhorn Neutron Monitor | 18.59 | 98.49 | 2565 | 9.23 | 16.70 | 16.73 |
| ROME | Rome | 41.86 | 12.47 | 0 | 41.97 | 6.25 | 6.15 |
| SNAE | Sanae 6NM64 | -71.67 | -2.85 | 856 | -66.78 | 0.64 | 0.68 |
| SOPO | South Pole | -90.0 | 0 | 2820 | -80.65 | 0.08 | 0.15 |
| TERA | Terre Adelie | -66.55 | 140 | 32 | -73.68 | 0.03 | 0.13 |
| THUL | Thule | 76.5 | -68.7 | 26 | 85.78 | 0.03 | 0.13 |
| TSMB | Tsumeb | -19.2 | 17.58 | 1240 | -18.98 | 9.38 | 9.30 |
| TXBY | Tixie Bay | 71.36 | 128.54 | 0 | 62.43 | 0.35 | 0.38 |
| VSTK | Vostok | -78.47 | 106.87 | 3488 | -87.82 | 0.03 | 0.13 |
| YKTK | Yakutsk | 62.01 | 129.43 | 105 | 53.16 | 1.35 | 1.33 |

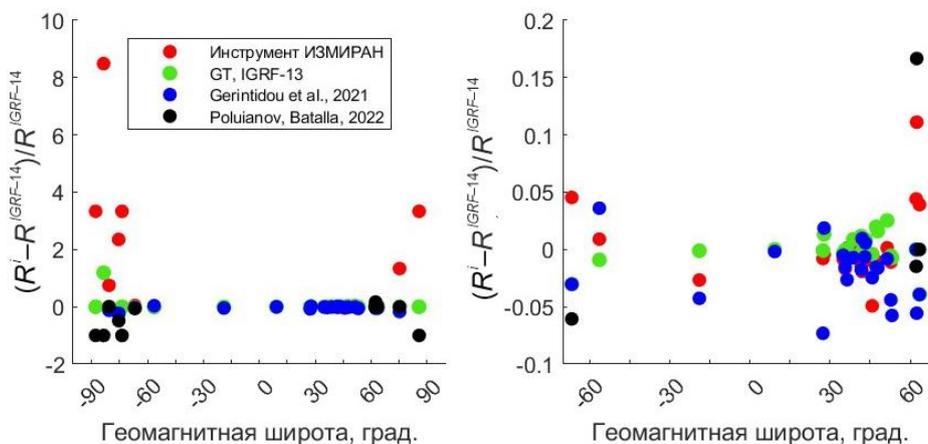


Рис. 3. Сравнение значений ЖГО для 2020 г. во всем диапазоне геомагнитных широт (а) и без приполярных областей (б)

Таблица 2

Жесткость геомагнитного обреза в 2020 г.

| Код станции | R_{eff} , ГВ | | | | |
|-------------|-----------------------|-------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | GT, IGRF-13 | GT, IGRF-14 | Инструмент ИЗМИРАН, IGRF | Gerontidou et al., 2021 | Poluianov, Batalla, 2022 |
| AATB | 5.96 | 5.98 | 5.93 | 5.95 | – |
| APTY | 0.49 | 0.51 | 0.53 | 0.49 | 0.51 |
| ATHN | 8.36 | 8.36 | 8.37 | 8.14 | – |
| BKSN | 5.65 | 5.60 | 5.60 | 5.56 | – |
| BRBG | 0.06 | 0.06 | 0.14 | 0.05 | 0.06 |
| CALM | 6.97 | 6.91 | 6.84 | 6.95 | – |
| DJON | 11.48 | 11.49 | 11.40 | 10.65 | – |
| DOMC | 0.03 | 0.01 | 0.13 | 0.00 | 0.00 |
| IRK2 | 3.09 | 3.07 | 3.05 | 3.05 | – |
| IRK3 | 3.46 | 3.42 | 3.37 | 3.36 | – |
| JUNG | 4.62 | 4.53 | 4.48 | 4.46 | – |
| KERG | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 1.15 | – |
| LMKS | 3.78 | 3.72 | 3.68 | 3.66 | – |
| MGDN | 1.81 | 1.82 | 1.80 | 1.74 | – |
| MOSC | 2.15 | 2.10 | 2.10 | 2.08 | – |
| MRNY | 0.03 | 0.04 | 0.13 | 0.03 | 0.02 |
| MXCO | 7.60 | 7.50 | 7.47 | 7.64 | – |
| NANM | 6.83 | 6.83 | 6.72 | 6.73 | – |
| NVBK | 2.43 | 2.44 | 2.32 | 2.38 | – |
| OULU | 0.68 | 0.68 | 0.71 | 0.68 | 0.67 |
| PSNM | 16.72 | 16.72 | 16.73 | 16.69 | – |
| ROME | 6.25 | 6.26 | 6.14 | 6.32 | – |
| SNAE | 0.64 | 0.66 | 0.69 | 0.64 | 0.62 |
| SOPO | 0.08 | 0.08 | 0.14 | 0.07 | 0.08 |
| TERA | 0.03 | 0.03 | 0.13 | 0.00 | 0.00 |
| THUL | 0.03 | 0.03 | 0.13 | 0.00 | 0.00 |
| TSMB | 9.37 | 9.38 | 9.13 | 8.98 | – |
| TXBY | 0.36 | 0.36 | 0.40 | 0.34 | 0.42 |
| VSTK | 0.03 | 0.03 | 0.13 | 0.00 | 0.00 |
| YKTK | 1.38 | 1.39 | 1.38 | 1.31 | – |

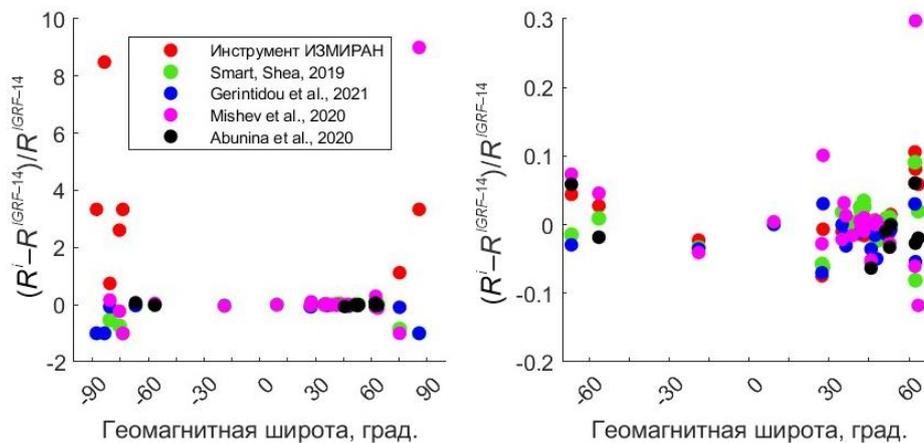


Рис. 4. Сравнение значений ЖГО для 2015 г. во всем диапазоне геомагнитных широт (а) и без приполярных областей (б)

2.4. Временная динамика жесткости обреза

Годовые и вековые вариации магнитосферы Земли приводят к изменениям величины ЖГО. На рис. 5 показана абсолютная разница между значениями R_{eff} в 2025 и 2015 гг. Анализ полученных результатов подтверждает общую тенденцию к уменьшению ЖГО, отмеченную в работах [Gvozdevsky et al., 2018; Gerontidou et al., 2021]. Максимальное как снижение (на 0.19 ГВ), так и повышение (на 0.07 ГВ) ЖГО

соответствует средним широтам (40°–50°) Северного полушария. Характер изменения ЖГО может быть связан с уменьшением дипольной и увеличением недипольной компонент магнитного поля Земли [Gvozdevsky et al., 2018; Smart, Shea, 2019].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приводятся результаты расчета жесткости геомагнитного обреза для сети нейтронных мониторов, полученные для 2015, 2020 и 2025 гг.

Таблица 3

Жесткость геомагнитного обрезания в 2015 г.

| Код станции | R_{eff} , ГВ | | | | | |
|-------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| | GT, IGRF-14 | Инструмент ИЗМИРАН, IGRF | Gerontidou et al., 2021 | Smart, Shea, 2019 | Mishev et al., 2020 | Abunina et al., 2020 |
| AATB | 6.08 | 6.02 | 6.08 | 6.19 | 5.95 | – |
| APTY | 0.51 | 0.54 | 0.50 | 0.52 | 0.45 | 0.50 |
| ATHN | 8.42 | 8.42 | 8.16 | 8.28 | 8.53 | – |
| BKSN | 5.69 | 5.63 | 5.60 | 5.71 | 5.60 | – |
| BRBG | 0.07 | 0.14 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | – |
| CALM | 6.88 | 6.77 | 6.88 | 7.06 | 6.95 | – |
| DJON | 11.54 | 10.68 | 10.73 | 10.88 | 11.22 | – |
| DOMC | 0.01 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | – | – |
| IRK2 | 3.16 | 3.12 | 3.14 | 3.27 | 3.13 | – |
| IRK3 | 3.49 | 3.44 | 3.45 | 3.58 | 3.51 | – |
| JUNG | 4.49 | 4.52 | 4.42 | 4.51 | 4.49 | – |
| KERG | 1.09 | 1.12 | 1.14 | 1.10 | 1.14 | 1.07 |
| LMKS | 3.82 | 3.73 | 3.63 | 3.73 | 3.84 | – |
| MGDN | 1.83 | 1.81 | 1.78 | 1.85 | 1.78 | 1.77 |
| MOSC | 2.14 | 2.14 | 2.11 | 2.16 | 2.13 | 2.12 |
| MRNY | 0.04 | 0.14 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | – |
| MXCO | 7.52 | 7.47 | 7.75 | 7.06 | 8.28 | – |
| NANM | 6.88 | 6.84 | 6.77 | 6.89 | 7.10 | – |
| NVBK | 2.53 | 2.39 | 2.44 | 2.53 | 2.40 | 2.37 |
| OULU | 0.66 | 0.73 | 0.68 | 0.72 | 0.62 | 0.70 |
| PSNM | 16.73 | 16.74 | 16.74 | 16.74 | 16.8 | – |
| ROME | 6.27 | 6.23 | 6.30 | 6.39 | 6.27 | – |
| SNAE | 0.68 | 0.71 | 0.66 | 0.67 | 0.73 | 0.72 |
| SOPO | 0.09 | 0.15 | 0.08 | 0.04 | 0.10 | – |
| TERA | 0.03 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | – |
| THUL | 0.03 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | – |
| TSMB | 9.33 | 9.12 | 9.00 | 9.02 | 8.95 | – |
| TXBY | 0.37 | 0.40 | 0.35 | 0.34 | 0.48 | 0.36 |
| VSTK | 0.03 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | – | – |
| YKTK | 1.37 | 1.39 | 1.36 | 1.37 | 1.37 | 1.37 |

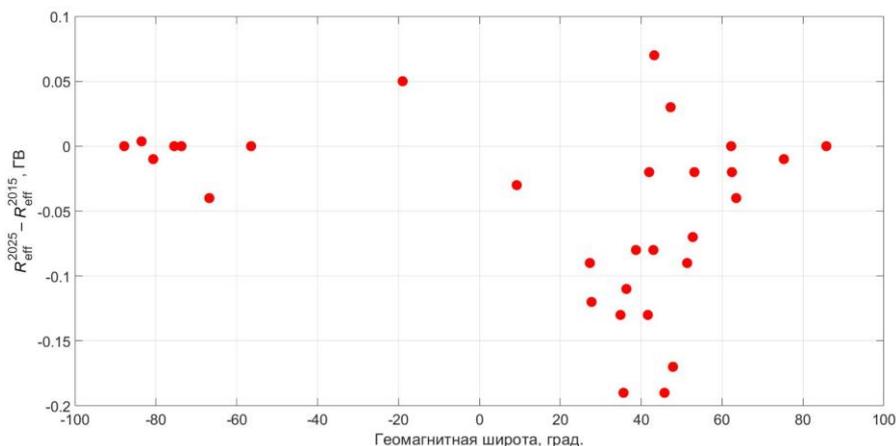


Рис. 5. Изменение эффективной жесткости геомагнитного обрезания для нейтронных мониторов в 2025 г. по сравнению с 2015 г.

с привлечением модели IGRF-14. Вычисление проводилось с помощью инструментария GT, в котором использован алгоритм трассировки частиц по схеме частиц в ячейках, реализованной методом Бунемана—Бориса. Представлено сравнение результатов с данными, полученными с помощью калькулятора ИЗМИРАН, а также приведенными в работах разных

авторов. Наблюдается хорошее совпадение (относительное отклонение не более 10 %) разных расчетов на низких и средних широтах, причем абсолютная разница для большинства нейтронных мониторов не превышает 0.2 ГВ. Подобные отклонения, возникающие из-за различных методов трассировки, существенны в приполярной области, где важную роль

играет атмосферное экранирование. Таким образом, точность используемого алгоритма достаточна для корректной работы с наземными детекторами КЛ.

В результате сравнения жесткостей геомагнитного обрезания в 2015 и 2025 гг. показано, что значения R_{eff} увеличиваются для некоторых станций нейтронных мониторов средних широт Северного полушария (например, 0.07 ГВ для CALM в Испании). Это может объясняться тем, что местоположение научных станций соответствует периферии Северо-Атлантической аномалии, в области которой наблюдается увеличение ЖГО. Однако для большей части станций КЛ, на которых установлены нейтронные мониторы, наблюдается понижение ЖГО с максимальным уменьшением на 0.19 ГВ в Северном полушарии на геомагнитных широтах 40° – 50° .

Поскольку во многих трудах до сих пор используются старые значения ЖГО, рассчитанные для эпохи 1965 г., для получения более достоверных результатов при изучении наблюдаемых в КЛ эффектов мы рекомендуем использовать приведенные в настоящей работе данные о ЖГО для периода 2015–2025 гг.

Геомагнитные координаты получены с использованием сервиса British Geological Survey — Geomagnetism [https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/coord_calc.html].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-72-10170-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abunina M.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., et al. Ring of station method in research of cosmic ray variations: 1. General description. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020, vol. 60, no. 1, pp. 38–45. DOI: [10.1134/S0016793220010028](https://doi.org/10.1134/S0016793220010028).
- Alken P., Thébaud E., Beggan C.D., et al. International geomagnetic reference field: The thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*. 2021, vol. 73, pp. 1–25. DOI: [10.1186/s40623-020-01288-x](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x).
- Boris J.P. The acceleration calculation from a scalar potential. *Technical report MATT-152*. Princeton: Princeton University, 1970, 30 p.
- Boris J.P. Relativistic plasma simulation — optimization of a hybrid code. *Proc. 4th Conf. on Numerical Simulation of Plasmas*. Washington, 1971, p. 3.
- Cooke D.J., Humble J.E., Shea M.A., et al. On cosmic-ray cut-off terminology. *Nuovo Cimento C*. 1991, vol. 14, pp. 213–234. DOI: [10.1007/BF02509357](https://doi.org/10.1007/BF02509357).
- Gerontidou M., Katzourakis N., Mavromichalaki H., et al. World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade. *Adv. Space Res.* 2021, vol. 67, no. 7, pp. 2231–2240. DOI: [10.1016/j.asr.2021.01.011](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.011).
- Gvozdevsky B., Belov A., Gushchina R., et al. Long-term changes in vertical geomagnetic cutoff rigidities of cosmic rays. *Physics of Atomic Nuclei*. 2018, vol. 81, pp. 1382–1389. DOI: [10.1134/S1063778818090132](https://doi.org/10.1134/S1063778818090132).
- Mao H., Wirz R.E. Comparison of charged particle tracking methods for non-uniform magnetic fields. *42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference in conjunction with the 18th International Conference on MHD Energy Conversion (ICMHD)*. Honolulu, Hawaii, 2011, 9 p. DOI: [10.2514/6.2011-3739](https://doi.org/10.2514/6.2011-3739).
- Mishev A.L., Koldobskiy S.A., Kovaltsov G.A., et al. Updated neutron-monitor yield function: Bridging between in situ and ground-based cosmic ray measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, no. 2, e27433. DOI: [10.1029/2019JA027433](https://doi.org/10.1029/2019JA027433).
- Poluianov S., Batalla O. Cosmic-ray atmospheric cutoff energies of polar neutron monitors. *Adv. Space Res.* 2022, vol. 70, no. 9, pp. 2610–2617. DOI: [10.1016/j.asr.2022.03.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.037).
- Qin R., Zhang S., Xiao J., et al. Why is Boris algorithm so good? *Physics of Plasmas*. 2013, vol. 20, no. 8, 084503. DOI: [10.1063/1.4818428](https://doi.org/10.1063/1.4818428).
- Smart D.F., Shea M.A. Vertical geomagnetic cut off rigidities for epoch 2015. *PoS 36th ICRC*. Madison, WI, USA, 2019, 1154.
- Tezari A., Paschalis P., Mavromichalaki H., et al. Assessing radiation exposure inside the Earth's atmosphere. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020, vol. 190, iss. 4, pp. 427–436. DOI: [10.1093/rpd/ncaa112](https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa112).
- Tyasto M.I., Danilova O.A., Pitsyna N.G., Sdobnov V.E. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 51, no. 7, pp. 1230–1237. DOI: [10.1016/j.asr.2012.10.025](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.025).
URL: <https://github.com/agmayorov/GTsimulation> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/international-geomagnetic-reference-field> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: <https://tools.izmiran.ru/cutoff/> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/coord_calc.html (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Кручинин П.А., Сирук С.А., Майоров А.Г., Малахов В.В., Александрин С.Ю. Жесткость геомагнитного обрезания в местах расположения нейтронных мониторов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 2, с. 132–138. DOI: [10.12737/szf-112202512](https://doi.org/10.12737/szf-112202512).