

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ ЗА ВЕСЬ ПЕРИОД МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Б.Б. Гвоздевский<sup>1</sup>, А.В. Белов<sup>2</sup>, Р.Т. Гущина<sup>2</sup>, Е.А. Ерошенко<sup>2</sup>, П.Г. Кобелев<sup>2</sup>, В.Г. Янке<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт РАН (ПГИ)

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

**Аннотация.** В работе методом траекторных расчётов для модели IGRF для периода 1950-2020 года получены вертикальные жёсткости геомагнитного обрезания для Мировой сети нейтронных мониторов. Результаты расчётов свидетельствуют об общем понижении жесткостей геомагнитного обрезания в большинстве пунктов, что связано с общим понижением геомагнитного поля за рассматриваемый период.

### Введение

Магнитосферный эффект космических лучей в настоящее время достаточно хорошо изучен. Тем не менее, современные требования к эксперименту в области солнечно-земной физики требуют более тщательного его исследования. Это связано с тем, что более чем за полувековой наблюдательный период космических лучей геомагнитное поле уменьшилось в среднем на 4%. Отметим, что при этом вклад высоких гармоник геомагнитного поля за этот период, напротив, увеличился на 30%. Кроме того, магнитные аномалии имеют общую тенденцию к дрейфу на запад, но с разной скоростью. В течение 20-го столетия недипольное поле дрейфовало на запад со средней скоростью 0.15 °/год [Wei Zi-Gang et al., 2001].

Чтобы оценить для практических целей последствия такой большой перестройки магнитного поля с точки зрения магнитосферных эффектов космических лучей, необходимо получить жёсткости геомагнитного обрезания для сети станций для всего периода наблюдений, оценить долговременные изменения жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей ретроспективно и выполнить прогноз на ближайшую перспективу. Кроме того, нужно оценить ожидаемые вековые вариации нейтронной и мюонной компоненты космических лучей, обусловленные геомагнитными вариациями.

Под магнитосферным эффектом космических лучей понимается воздействие на внешний поток космического излучения изменений состояния магнитосферы. В изотропном приближении поток частиц  $N$  в пункте наблюдения можно представить следующим образом:

$$N = \int_0^{\infty} J(R)m(R, h_0)\delta(R)dR = \int_{R_c}^{\infty} J(R)m(R, h_0)dR, \quad (1)$$

где  $R$  – магнитная жёсткость частицы;  $J(R)$  – первичный спектр космических лучей;  $m(R, h_0)$  – аппаратная функция, т.е. интегральная кратность генерации частиц определенного типа в атмосфере Земли; дискретная функция  $\delta(R)$  (значения 1 или 0) обозначает, преодолела или нет заряженная частица магнитосферу. Если эффективный порог разрешённой области обозначить  $R_c$ , то наблюдаемые вариации можно записать, как показано в правой части выражения (1). Характеристика  $R_c$ , определяемая как жёсткость геомагнитного обрезания, полностью определяется магнитосферой Земли и позволяет определить изменение изотропного потока космических лучей. Варьируя последнее выражение по всем возможным параметрам, а именно,  $R_c$ ,  $m(R, h_0)$  и  $J(R)$ , для вариаций скорости счёта каждого детектора (индексы опущены) получим:

$$\frac{\delta N}{N} = \underbrace{-\delta R_c W(R_c, h_0)}_{\text{магнитосферные}} + \underbrace{\int_{R_c}^{\infty} W(R, h_0) \frac{\delta m}{m}(R, h_0)dR}_{\text{атмосферные}} + \underbrace{\int_{R_c}^{\infty} W(R, h_0) \frac{\delta J}{J}(R)dR}_{\text{первичные-вариации}}, \quad (2)$$

где слагаемые в изотропном приближении описывают три типа вариаций: магнитосферные, атмосферные и первичные вариации соответственно. В последнем выражении  $W(R, h_0)$  – функция связи рассматриваемой вторичной компоненты космических лучей. Таким образом, магнитосферный эффект космических лучей дает первое слагаемое уравнения (2) и амплитуда определяется простым произведением  $\delta R_c$  и  $W(R_c, h_0)$ .

Для решения обратной задачи восстановления спектра вариаций по данным наблюдений, из данных наблюдений следует исключить атмосферные и магнитосферные вариации, и привлечь актуальные жёсткости геомагнитного обрезания, т.е. первые два слагаемых перенести в левую часть уравнения.

Обширные, и наиболее полные и систематические исследования магнитосферных эффектов космических лучей, в том числе их долгопериодных изменений, проведены в большой серии работ Shea и Smart [1965, 1975, 2001]. Были вычислены глобальные распределения вертикальной жёсткости геомагнитного обрезания для

всех станций Мировой сети для девяти пятилетних эпох 1955 – 1995 годов. Детали и ссылки можно найти в [Gvozdevsky et al., 2016].

Shea и Smart [1975] уже обращали внимание на неравномерность изменений планетарного распределения жёсткостей геомагнитного обрезания за 20 лет с 1955 по 1975 г., особенно в северной и южной акватории Атлантического океана. В южной части Атлантического океана наблюдалось уменьшение жёсткости, в то время как в северной – сопоставимое увеличение вертикальной жёсткости обрезания.

За последние четыре эпохи такие расчёты для действующей сети детекторов не проводились. Кроме того, за последние 20 лет в строй введены около трети новых нейтронных мониторов и создана сеть многонаправленных мюонных телескопов. Для этих детекторов жёсткость геомагнитного обрезания и асимптотические конусы приёма требуется определить впервые.

## Метод расчёта

В настоящее время общепринятым и наиболее точным способом определения жёсткости геомагнитного обрезания является метод траекторных расчётов, основанный на решении уравнения движения заряженных частиц в геомагнитном поле [Cooke et al., 1991; Gvozdevsky et al., 2016].

Задача решается численно методом Рунге-Кутты 4 порядка точности с адаптивным шагом. Частицы стартуют с высоты 20 км. Интегрирование завершается в трёх случаях: 1) частица вышла за пределы магнитосферы; 2) по истечении заданного времени полёта (если частица всё ещё не вышла из магнитосферы, то она считается захваченной); 3) радиус-вектор частицы оказывается меньше, чем  $(R_E+20)$  км (частица вернулась в атмосферу). В первом случае траектория помечается как разрешённая, в двух остальных — как запрещённая. В результате формируется дискретная функция, принимающая значения "0" и "1" для всех значений жёсткостей с шагом 0.001 ГВ.

Привлекается модель главного магнитного поля IGRF, начиная с 1900 года по 2015 года с пятилетним интервалом. С учётом вековой вариации геомагнитного поля модель продолжена до 2020 года [Model IGRF-12, 2015]. В целях прогноза поле продолжено также до 2050 года линейной экстраполяцией всех коэффициентов разложения. Поле представлено 13-ю сферическими гармониками, но прогностическая модель ограничена 8-ю гармониками.

В последнее десятилетие для таких задач другими авторами используется программный комплекс PLANETOCOSMICS Geant4 v6 [Desorgher, 2006], на базе которого выполнены, например, работы [Zreda, 2012; Herbst et al., 2013; Boschini et al., 2014; Doetinchem, 2017]. К сожалению, PLANETOCOSMICS в настоящее время не поддерживается для современной версии Geant4 v10. Мы в данной работе использовали свою собственную программную реализацию расчёта траекторий.

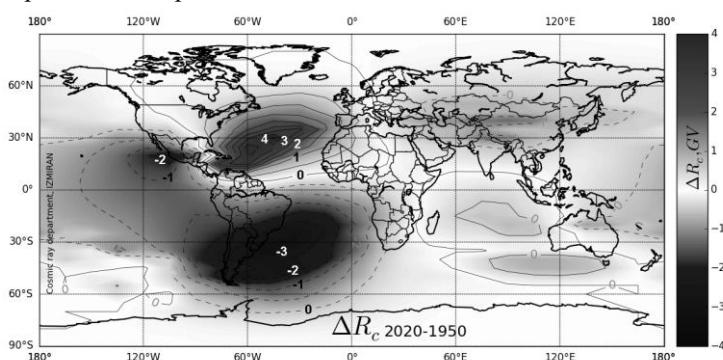
## Обсуждение результатов

**1. Планетарное распределение изменений жёсткостей обрезания.** С шагом 5 лет для сети станций нейтронных мониторов для эпох с 1900 по 2050 были выполнены расчёты планетарных распределений жёсткостей геомагнитного обрезания для сетки  $5^\circ$  по широте и  $15^\circ$  по долготе. Цифровые результаты для всех эпох можно найти в таблицах  $R_c$  на сервере [Mag\_Effect, 2016]. На Рис.1. показано изменение планетарного распределения жёсткостей геомагнитного обрезания за период 1950 – 2020 гг.

Области наиболее сильных изменений находятся в северной и южной Атлантике. Но в первом случае наблюдается огромный восточный шлейф по линии Европа – Индийский океан, во втором случае огромный западный шлейф Тихий океан – Азия.

**2. Жёсткости геомагнитного обрезания для мировой сети станций.** За весь период непрерывного мониторинга космических лучей для 4-х групп станций на Рис. 2 показаны изменения жёсткостей геомагнитного обрезания относительно эпохи 1950. Жёсткость геомагнитного обрезания одной группы станций (находящихся

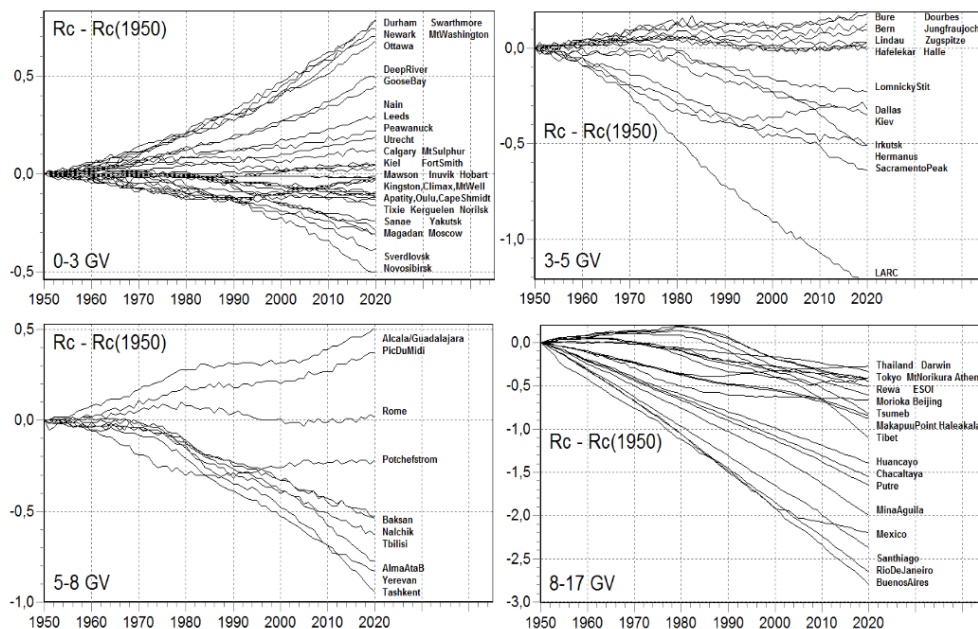
вблизи и на периферии аномалии в северной части Атлантики) увеличивается. Жёсткость геомагнитного обрезания другой группы станций (находящихся вблизи и на периферии аномалии в южной части Атлантики), напротив, уменьшается. Жёсткость геомагнитного обрезания достаточно существенно увеличивается, за счёт северо-атлантической аномалии, но в этом районе нет станций космических лучей, а на периферии аномалии



**Рисунок 1.** Изменения планетарного распределения вертикальной жёсткости геомагнитного обрезания относительно эпохи 1950 [Mag\_Effect, 2016].

увеличение жесткостей геомагнитного обрезания уже незначительно. Но в целом наблюдается глобальное понижение жесткостей геомагнитного обрезания.

Для Мировой сети станций космических лучей для периода 1950–2020 гг с годовым разрешением получены вертикальные жёсткости геомагнитного обрезания для функционирующих или проработавших длительный период 124-х нейтронных мониторов. Табличные результаты можно найти на ресурсе [Mag\_Effect, 2016].



**Рисунок 2.** Относительное изменение вертикальных жесткостей геомагнитного обрезания относительно эпохи 1950.

Каков прогноз изменений жесткостей геомагнитного обрезания на несколько десятилетий? В приближении линейной экстраполяции коэффициентов разложения геомагнитного поля всех гармоник поля, такой прогноз сделан для периода 2020–2050 гг. В принятом приближении аномальное развитие поведения жесткостей геомагнитного обрезания продолжается, и можно ожидать, что на этом временном интервале линейность является хорошим приближением. Планетарное распределение изменений жесткостей геомагнитного обрезания для будущих эпох можно найти на сайте [Mag\_Effect, 2016]. Такой прогноз может быть полезен при проектировании долговременных экспериментов.

Магнитосфера Земли подвержена долгопериодным изменениям, обусловленным деятельностью Солнца. Для оценки таких изменений можно привлечь, например, модель магнитного поля Цыганенко T89, зависящую от  $K_p$  индекса. Каков ожидаемый эффект влияния внешней магнитосферы? Даже при  $K_p=0$  магнитосфера слегка возмущена, следовательно, внешнее магнитное поле частично компенсирует внутреннее магнитное поле, и жёсткость геомагнитного обрезания незначительно уменьшается. С увеличением  $K_p$  индекса увеличивается и наблюдаемый эффект. Этот эффект может привести к уменьшению жесткостей обрезания в долгопериодном плане на несколько десятых GV. Детали можно найти в работе [Gvozdevsky et al., 2016]. Результаты для всех детекторов Мировой сети можно найти на ресурсе [Mag\_Effect, 2016].

### 3. Вековые вариации космических лучей, обусловленные изменениями жесткостей геомагнитного обрезания.

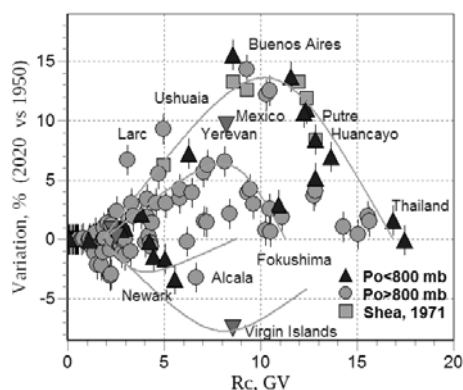
Планетарные изменения пороговых жесткостей геомагнитного обрезания должны привести к соответствующим вариациям интенсивности космических лучей магнитосферного происхождения. Первое слагаемое уравнения (2) описывает соответствующие вариации, которые определяются только изменениями жёсткости геомагнитного обрезания  $\delta R_c$  относительно базового периода и функцией связи  $W(R_c, h_0)$  в точке  $R_c$ . Как следует из уравнения (2), можно ожидать долговременных изменений значений вариации до 15% для изменений жёсткости -3 GV и функции связи 5%/GV в этой точке. Для некоторых станций Мировой сети ожидаемые долгопериодные вариации в 2020 году относительно 1950 года показаны на Рис. 3.

Ожидаемые вариации условно можно разделить на две группы. К первой группе (Рис. 3, верхняя и средняя группа точек) относятся станции, находящиеся в ближней и периферийных зонах южно-атлантической аномалии, для которой наблюдается уменьшение жёсткости геомагнитного обрезания и, соответственно, положительные долгопериодные вариации. Ко второй группе (Рис. 3, нижняя группа точек) относятся

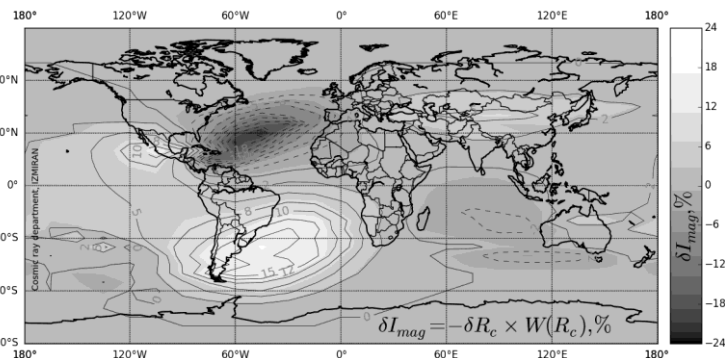
станции, которые находятся в периферийной зоне северо-атлантической аномалии, для которой наблюдается увеличение жесткостей геомагнитного обрезания и, соответственно, отрицательные вариации космических лучей. Это регионы Европы и Индийского океана.

На Рис. 3 приведены также результаты работы [Shea, 1971], полученные для шести южноамериканских станций. Последние показаны квадратами в последовательности: Ushuaia, Mexico City, Buenos Aires, Mina Aguilar, Chacaltaya, Huancayo. Ожидаемые вариации магнитосферного происхождения были получены из широтных кривых. Хороший пример такого же подхода дан в работе [Herbst et al., 2013], в которой ожидаемый эффект был оценен по широтной кривой в период минимума солнечной активности для двух пар станций Moscow - Kiel и Mexico City - British Virgin Island (гипотетическая точка, 18°N, 64°W).

Планетарное распределение ожидаемых долговременных вариаций магнитосферного происхождения в 2020 году относительно 1950 года показаны на Рис. 4 (наложение изолиний и градиентного представления ожидаемых вариаций).



**Рисунок 3.** Вековые вариации нейтронной компоненты станций космических лучей. Треугольники - горные станции.



**Рисунок 4.** Планетарное распределение ожидаемых вековых вариаций нейтронной компоненты космических лучей (в % для градиента и значений изолиний).

## Выводы

Причиной существенного изменения жесткостей геомагнитного обрезания является общее уменьшение магнитного поля Земли, на фоне которого нарастает его своеобразная "контрастность" с наличием областей с резким изменением поля вблизи полюсов и магнитных аномалий, а также изменения вектора перемещения полюсов и аномалий. Это приводит к долгопериодным изменениям эффективных жесткостей геомагнитного обрезания для мировой сети нейтронных мониторов. Для станций, находящихся под влиянием северо-атлантической аномалии, наблюдаются отрицательные магнитосферные эффекты и дрейф аномалии на запад со скоростью 0.14°/год. Для станций, находящихся же под влиянием южно-атлантической аномалии, наблюдаются положительные магнитосферные вариации, причем амплитуда таких вариаций достигает 10%, аномалия дрейфует на запад со скоростью 0.30°/год. Такой эффект необходимо учесть при оценке спектра долгопериодных вариаций.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 23 "Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика", гранта РФФИ № 17-02-00508. Работа базируется на экспериментальных данных УНУ №85 "Российская национальная сеть станций космических лучей". Мы также признательны всем сотрудникам Мировой сети станций космических лучей <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

## Список литературы

- Boschini M.J., T.S. Della, M. Gervasi, D. Grandi, P. G. Rancoita, P. Bobik, K. Kudela (2014). Cutoff rigidity online Calculator, model T96, T05, *e-pub*: <http://www.geomagsphere.org/index.php/vertical-rigidity-cutoff>.
- Cooke D.J., J.E. Humble, M.A. Shea, D.F. Smart, N. Lund, I. L Rasmussen, B. Byrnak, P. Goret, and N. Petrou (1991). On Cosmic-Ray Cutoff Terminology, *Il Nuovo Cimento C*, 14(3), 213–234.
- Desorgher L. (2006). The PLANETOCOSMICS code, <http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics>.
- Doetinchem P., B. Yamashiro (2017). Geomagnetic Cutoff Calculations for the Interpretation of Low-rigidity Cosmic-ray Antiparticle Measurements, Proc. 35<sup>th</sup> ICRC, Busan, <https://pos.sissa.it/301/151/pdf>.

- Gvozdevsky B.B., A.A. Abunin, P.G. Kobelev, R.T. Gushchina, A.V. Belov, E.A. Eroshenko, V.G. Yanke (2016). Magnetospheric Effects of Cosmic Rays. I. Long-Term Changes in the Geomagnetic Cutoff Rigidities for the Stations of the Global Network of Neutron Monitors, *Geomagnetism and Aeronomy*, 56, 4, 381–392. doi:10.1134/S0016793216040046.
- Herbst K., A. Kopp, B. Heber (2013). Influence of the terrestrial magnetic field geometry on the cutoff rigidity of cosmic ray particles, *Annales Geophysicae*, 31, 1637–1643.
- Mag\_Effect (2016). *e-pub*: [ftp://crsb.izmiran.ru/Magnetospheric\\_Effect/Link\\_MagEffect.pdf](ftp://crsb.izmiran.ru/Magnetospheric_Effect/Link_MagEffect.pdf).
- Model IGRF-12 (2015). *e-pub*: <http://www.ngdc.noaa.gov/LAGA/vmod/igrf.html>.
- Shea M.A. and D.F. Smart (1971). Vertical cutoff rigidities for cosmic ray stations since 1955, *Proc. 12<sup>th</sup> ICRC*, Hobart, 3, 859–864.
- Shea M.A., D.F. Smart and K.G. McCracken (1965). A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field, *J. Geophys. Res.*, 70, 4117–4130. doi: 10.1029/JZ070i017p04117.
- Shea M.A. and D.F. Smart (1975). A five by fifteen degree world grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for 1965 and 1975, *Proc. 14<sup>th</sup> ICRC*, Munchen, 4, 1298–1303.
- Shea M.A. and D.F. Smart (2001). Vertical cutoff rigidities for cosmic ray stations since 1955, *Proc. 27<sup>th</sup> ICRC*, Hamburg, 4063–4066.
- Wei Zi-Gang, Xu Wen-Yao (2001). Drifts and intensity variations of the geomagnetic field, *Chinese Journal of Geophysics*, 44, 4, 496-505, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cjg2.167/epdf>.
- Zreda M. (2012). COSMOS project, University of Arizona. Cutoff rigidity online Calculator, model IGRF. *e-pub*: <http://cosmos.hwr.arizona.edu/Util/rigidity.php>.