

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.80-83

## ОСОБЕННОСТИ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НАКЛОННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

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

<sup>1</sup>ФГБНУ “Полярный геофизический институт”, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Методом траекторных расчётов получены жёсткости геомагнитного обрезания космических лучей наклонных направлений для 23 мюонных телескопов Мировой сети для периода 1950-2015 гг. и прогнозом до 2050 года с годовым разрешением. Расчёты выполнены по модели геомагнитного поля IGRF-12. Результаты расчётов свидетельствуют о проявлении двух Мировых аномалий: в зоне одной, (Южно-Атлантической) жёсткость геомагнитного обрезания уменьшается, в зоне другой (Северо-Атлантической) – увеличивается, но глобально жёсткость геомагнитного обрезания понижается. Для некоторых наклонных направлений (северо-западное направление для детекторов северного полушария и юго-восточное для детекторов южного полушария) наблюдается нерегулярный во времени ход жесткостей геомагнитного обрезания. Такая нерегулярность обусловлена большой изменчивостью области пенумбры для наклонных направлений.

### Введение

Магнитосферный эффект космических лучей, т.е. изменение потока космических лучей в ответ на изменение состояния магнитосферы, открыт при проведении широтных измерений J. Clay в 1927 г., и в настоящее время неплохо изучен. За шестидесятилетний период непрерывных наблюдений космических лучей геомагнитное поле уменьшилось на ~4%, причем в разных регионах Земли уменьшение идёт с различной скоростью. И, в то время как момент диполя уменьшился на 6.5% с 1900 г., вклад высоких гармоник поля за этот же период увеличился на ~30% [Xu et al., 2000]. Центр диполя сместился на 200 км в направлении Тихого океана.

Чтобы оценить последствия такой большой перестройки магнитного поля с точки зрения магнитосферных эффектов космических лучей, необходимо получить планетарное распределение жесткостей геомагнитного обрезания для всего периода наблюдений.

Два ключевых понятия, таких как жёсткость геомагнитного обрезания (для описания изотропных вариаций) и асимптотический конус приёма частиц (для описания анизотропных вариаций), позволяют описать все магнитосферные эффекты космических лучей. При описании долговременных вариаций достаточно ограничиться изотропным приближением.

Общепринятым для определения жесткостей обрезания в настоящее время является метод численного интегрирования уравнений движения заряженных частиц. Таким методом жёсткости обрезания могут быть рассчитаны с любой сколь угодно высокой степенью точности. Причем при аппроксимации геомагнитного поля могут быть учтены как внутренние, так и внешние источники геомагнитного поля.

Обширные и наиболее полные и систематические исследования магнитосферных эффектов космических лучей, в том числе их долгопериодные изменения, проведены М. Shea и D. Smart. Были вычислены глобальные распределения вертикальной жёсткости геомагнитного обрезания с шагом  $5^\circ \times 15^\circ$  по широте и долготе для эпох с 1955 по 2000 гг. [например, Smart and Shea, 2007]. Вертикальные жёсткости геомагнитного обрезания получены для всех станций мировой сети для девяти пятилетних эпох 1955–1995 гг. [Shea and Smart, 2001].

В работах [Shea and Smart, 1975] и [Storini et al., 1999] показана неравномерность изменений планетарного распределения жесткостей 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.

В работе [Гвоздевский и др., 2016] для вертикальных направлений прихода частиц методом траекторных расчётов было получено планетарное распределение жесткостей геомагнитного обрезания для сетки  $5^\circ$  по широте и  $15^\circ$  по долготе за период 1950-2020 гг.

Для анализа данных мюонных телескопов кроме вертикального направления представляют интерес также наклонные направления прихода. К настоящему моменту Мировая сеть мюонных детекторов насчитывает более 20 приборов: супертелескопов, средних телескопов (~10 м<sup>2</sup>) и телескопов небольшого размера (несколько м<sup>2</sup>), а также несколько годоскопов. Почти все детекторы регистрируют частицы не только из вертикального направления, но и из большого числа наклонных направлений.

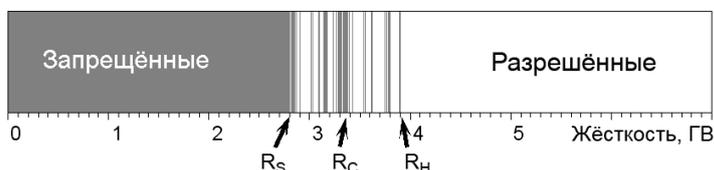
В данной работе расчёты временных изменений жесткостей геомагнитного обрезания были проведены для всех мюонных детекторов Мировой сети.

### Метод расчёта

Расчёты жесткостей геомагнитного обрезания проводились на основе численного решения уравнений движения заряженных частиц в геомагнитном поле по методике, описанной в работе [Shea *et al.*, 1965]. Уравнение движения интегрировалось методом Рунге-Кутты 4 порядка с адаптивным шагом. Исходными данными служат географические координаты станции и компоненты начального вектора скорости. Стартуют частицы с высоты 20 км с обратным знаком заряда. Интегрирование завершается в трех случаях:

- 1) частица вышла за пределы магнитосферы – разрешенная траектория;
- 2) частица вернулась в атмосферу (на высоту <20 км) – траектория запрещена;
- 3) частица движется внутри магнитосферы больше некоторого заданного времени (частица считается захваченной магнитосферой) – траектория запрещена.

В результате расчёта для всех жесткостей  $R$  в окрестности пенумбры с выбранным нами шагом  $dR=0.001$  ГВ формируется дискретная функция  $g(R)$  со значениями: 1 (разрешенная жесткость) или 0 (запрещенная). По функции  $g(R)$  определяются жесткости  $R_S$ , ниже которой все жесткости запрещены, и  $R_H$ , выше которой все жесткости разрешены. Между  $R_S$  и  $R_H$  разрешенные и запрещенные жесткости чередуются – это область пенумбры.



**Рисунок 1.** Иллюстрация распределения запрещённых и разрешённых жёсткостей и области пенумбры.

Эффективная жесткость геомагнитного обрезания  $R_c$  для данной географической точки определяется по формуле:

$$R_c = R_H - \int_{R_S}^{R_H} g(R) dR \quad (1)$$

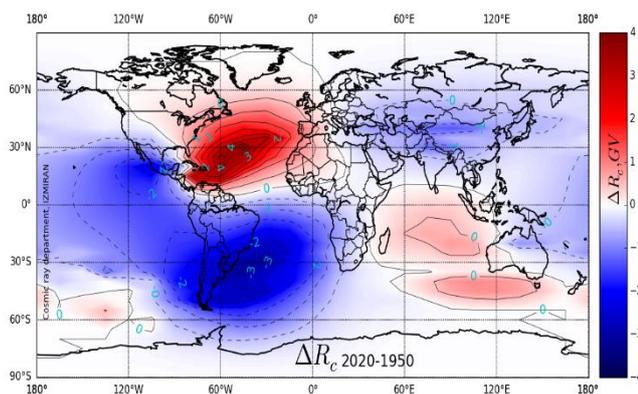
В данной работе рассчитаны жесткости геомагнитного обрезания с годовым разрешением с 1950 года вплоть до 2020 года. С этой целью привлекалась модель главного магнитного поля IGRF [Модель IGRF-12, 2015]. Эта модель действительна вплоть до 2020 года. С целью прогноза мы продлили эту модель до 2050 года путём линейной экстраполяции её коэффициентов.

### Обсуждение результатов

Ранее в работе [Гвоздевский и др., 2016] методом, описанным выше были рассчитаны величины  $R_c$  для вертикальных направлений прихода частиц для всей Земли по сетке  $5^\circ$  по широте и  $15^\circ$  по долготе за период 1950-2020 гг. Было показано, что наряду с глобальным уменьшением  $R_c$  существуют две аномальные зоны: Южно-Атлантическая, с ускоренным уменьшением  $R_c$ , и Северо-Атлантическая, с увеличивающимся  $R_c$ . Результат показан на Рис. 2. За период наблюдения космических лучей средне-планетарная жесткость геомагнитного обрезания для вертикального прихода частиц уменьшилась на 0.2 GV или 3.4%, что приводит к увеличению измеряемого потока частиц на ~1% за 50 лет. В эпицентре аномалий за тот же период поток изменился до 12%.

Расчёты наклонных траекторий в нынешней работе показывают динамику, согласующуюся с Рис. 2: временные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для наклонных направлений прихода частиц определяются влиянием аномалии, в зоне действия которой находится детектор.

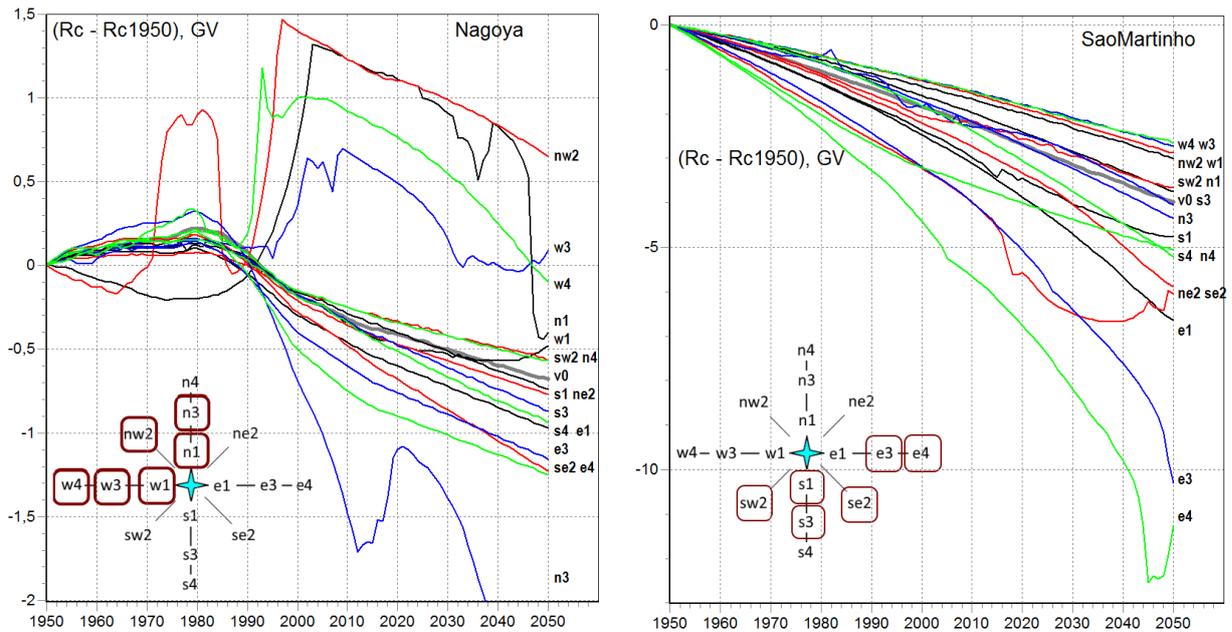
Однако, для наклонных направлений прихода частиц проявилась одна особенность: нерегулярное поведение временных зависимостей для некоторых направлений прихода. Два примера приведены на Рис. 3.



**Рисунок 2.** Изменения планетарного распределения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания за период 1950-2020 гг. Рисунок из работы [Гвоздевский и др., 2016].

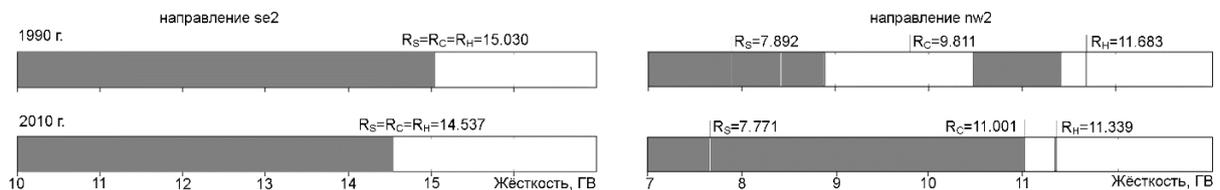
Мюонные телескопы, которые демонстрируют такую нерегулярность, можно разделить на две группы. Детекторы первой группы расположены в северном полушарии и имеют нерегулярный временной ход только для наклонных направлений север–запад. Детекторы второй группы расположены в южном полушарии и имеют нерегулярный ход только для наклонных направлений юг–восток.

Детальное исследование траекторий частиц и изменения этих траекторий из-за изменения геомагнитного поля показало, что для некоторых наклонных траекторий задача интегрирования весьма неустойчива. При небольших изменениях магнитного поля траектория частицы меняется довольно сильно. И ранее разрешённая жёсткость теперь становится запрещённой или наоборот. В результате даже при небольшом изменении поля конфигурация пенумбры меняется существенно, что приводит к существенному изменению эффективной жёсткости геомагнитного обрезания.



**Рисунок 3.** Относительные изменения жесткостей геомагнитного обрезания  $R_c$  мюонных телескопов Nagoya (Япония, северное полушарие) и São Martinho (Бразилия, южное полушарие) за период 1950-2050 гг. для разных направлений прихода частиц. На "розе направлений прихода" выделены направления с нерегулярным временным ходом.

Это можно показать на примере станции Nagoya, которая из всех рассмотренных станций демонстрирует наиболее нерегулярное поведение жёсткости обрезания на некоторых направлениях (Рис. 3, левая панель). На Рис. 4 показаны результаты расчёта пенумбры для этой станции для двух годов и двух направлений прихода. На направлении se2 пенумбра практически отсутствует, а эффективная жёсткость обрезания понижается. (Как видно на Рис. 3, она стабильно понижается, начиная с 1980 г.). Совсем иное поведение на направлении nw2. Пенумбра там широкая и за период 1990-2010 изменилась драматически. Так что жёсткость обрезания  $R_c$  даже увеличилась, вопреки тому, что станция находится в зоне уменьшающейся жёсткости (Рис. 2).



**Рисунок 4.** Область пенумбры для двух эпох и двух направлений прихода частиц на станцию Nagoya. *Левые панели* – направление se2, *правые панели* – направление nw2. *Верхние панели* – 1990 г., *нижние* – 2010 г.

Результаты наших расчётов показывают, что для детекторов северного полушария нерегулярный характер изменения жесткостей геомагнитного обрезания испытывают частицы, приходящие с северо-западного направления, а для детекторов южного полушария, напротив, частицы, приходящие с юго-восточных направлений.

## Результат численных расчётов

Для практического использования результатов численных расчётов создан архив данных жесткостей геомагнитного обрезания для всех детекторов Мировой сети, который можно найти на Интернет ресурсе <ftp://crsb.izmiran.ru/MagEffect>; для поиска нужных данных создан файл-путеводитель **guide.pdf**. Архив содержит также некоторые графические результаты и анимации.

- 1) Численные и графические результаты для всех нейтронных мониторов Мировой сети за период с 1950 по 2020 годы и прогноз до 2050 года в разделе "Rc for all NeutronMonitors (Table and Graph)" (см. [guide.pdf](#)).
- 2) Численные и графические результаты для всех телескопов Мировой сети за период с 1950 по 2020 годы и прогноз до 2050 года в разделе "Rc for all Telescopes (Table and Graph)".
- 3) Анимации траекторий движения, в частности, для направлений Nagoya.se2 и Nagoya.nw2 для 2010 года находятся в разделе "Traces for some Trajectories (Graph)".
- 4) Пенумбра и анимации, в частности, для направлений Nagoya.se2 и Nagoya.nw2 для 1990 и 2010 годов - в разделе "Penumbra for some Example (Graph)".
- 5) Таблицы планетарного распределения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания разрешением  $5^\circ \times 15^\circ$  по широте и долготе для эпох с 1900 по 2050 с шагом в 5 лет в разделе "Tables of planetary distributions Rc".
- 6) Калькулятор жесткости геомагнитного обрезания <http://crsv.izmiran.ru/cutoff> Калькулятор вычисляет жесткость геомагнитного обрезания для заданной даты и заданной географической точки. Программа может считать траектории по одной из заданной модели магнитосферы: диполь, IGRF, модели Цыганенко IGRF+T89, IGRF+T96, IGRF+T02. Результат программы – нижнее  $R_s$ , верхнее  $R_n$  и эффективное  $R_{eff}$  значение жесткости геомагнитного обрезания и пенумбра.

## Выводы

1. Причиной существенного изменения жесткостей геомагнитного обрезания является общее уменьшение магнитного поля Земли, на фоне которого нарастает его своеобразная "контрастность" с появлением двух аномальных зон: Северо-Атлантической аномалии и её восточного шлейфа и Южно-Атлантической аномалии с западным шлейфом.
2. Временные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для вертикального прихода частиц на станциях Мировой сети полностью согласуются с поведением, диктуемым этими двумя аномальными зонами.
3. Временные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для наклонно приходящих частиц для мюонных телескопов Мировой сети также полностью согласуются с поведением, диктуемым двумя аномальными зонами. Но действует и другой фактор: изменение магнитного поля приводит к значительному изменению пенумбры из-за неустойчивости наклонных траекторий частиц.
4. Сильная изменчивость пенумбры приводит к нерегулярному ходу временной зависимости жесткостей геомагнитного обрезания для некоторых направлений, которые определяются расположением детектора относительно геомагнитного экватора. Так, для детекторов северного полушария нерегулярность временного хода жесткостей геомагнитного обрезания наблюдается для наклонных направлений север–запад. Для детекторов южного полушария – для направлений юг–восток.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 3 "Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии", гранта 17-02-00508а. Работа базируется на экспериментальных данных УНУ "Российская национальная сеть станций космических лучей". Мы также признательны всем сотрудникам Мировой сети станций космических лучей.

## Литература

- Гвоздевский Б.Б., Абуниин А.А., Кобелев П.Г., Гущина Р.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. Магнитосферные эффекты космических лучей. I. Долговременные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для станций мировой сети нейтронных мониторов. Геомагнетизм и Аэрономия, Т.56, №4, С.411-422, 2016.
- Модель IGRF-12: <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>, 2015.
- Shea, M.A., D.F. Smart and K.G McCracken. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field. J. Geophys. Res, V.70, P.4117-4130, 1965.
- Shea M.A., D.F. Smart. A five by fifteen degree world grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for 1965 and 1975. Proc. 14th Int. Cosmic Ray Conf., Munchen, V.4, P.1298-1303, 1975.
- Shea M.A., Smart D.F. Vertical cutoff rigidities for cosmic ray stations since 1955. Proc. 27th ICRC, P.4063-4066, 2001.
- Smart D.F., Shea M.A. World Grid of Calculated Cosmic Ray Vertical Cutoff Rigidities for Epoch 2000. Proc. 30th ICRC, Mexico, V.1, P.737-740, 2007.
- Storini M., Shea M.A., Smart D.F., Cordero E.G. Cutoff variability for Antarctic Laboratory for Cosmic Rays (LARC:1955-1995). 26th ICRC, Salt Lake City, SH3.6.30, V.7, P.402-405, 1999.
- Xu Wen-yao, Wei Zigang, Ma Shizhuang. Dramatic variations in the Earth's main magnetic field during the 20th century. Chin. Sci. Bull., V.45, №21, P.2013-2016, 2000.