

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Б.Б. Гвоздевский¹, А.В. Белов², Р.Т. Гущина², Е.А. Ерошенко², П.Г. Кобелев², В.Г. Янке²

1- Полярный геофизический Институт РАН (ПГИ).

2- Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН).

В работе методом траекторных расчетов для модели IGRF для периода 1950-2020 года получены вертикальные жесткости геомагнитного обрезания для Мировой сети нейтронных мониторов. Результаты расчетов свидетельствуют об общем понижении жесткостей геомагнитного обрезания в большинстве пунктах, связанного с общим понижением геомагнитного поля за рассматриваемый период. Выполнен также прогноз планетарного распределения жесткостей геомагнитного обрезания до периода 2050 годов.

1. 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. В первую очередь это связано с тем, что за более чем полувековой наблюдательный период космических лучей геомагнитное поле уменьшилось в среднем на 4%. Отметим, что при этом вклад высоких гармоник геомагнитного поля за рассматриваемый период, напротив, увеличился на 29%. Кроме того, магнитные аномалии имеют общую тенденцию к дрейфу на запад (рис.1). В течение 20-го столетия недипольное поле дрейфовало на запад со средней скоростью $0.15^\circ/\text{год}$ [1].

Чтобы для практических целей оценить последствия такой большой перестройки магнитного поля с точки зрения магнитосферных эффектов космических лучей, необходимо:

- 1) получить планетарные распределения и жесткости геомагнитного обрезания для сети станций для всего периода наблюдений;
- 2) оценить долговременные изменения жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей ретроспективно и выполнить прогноз на ближайшую перспективу;
- 3) оценить ожидаемые вековые вариации нейтронной и мюонной компоненты космических лучей, обусловленные геомагнитными вариациями.

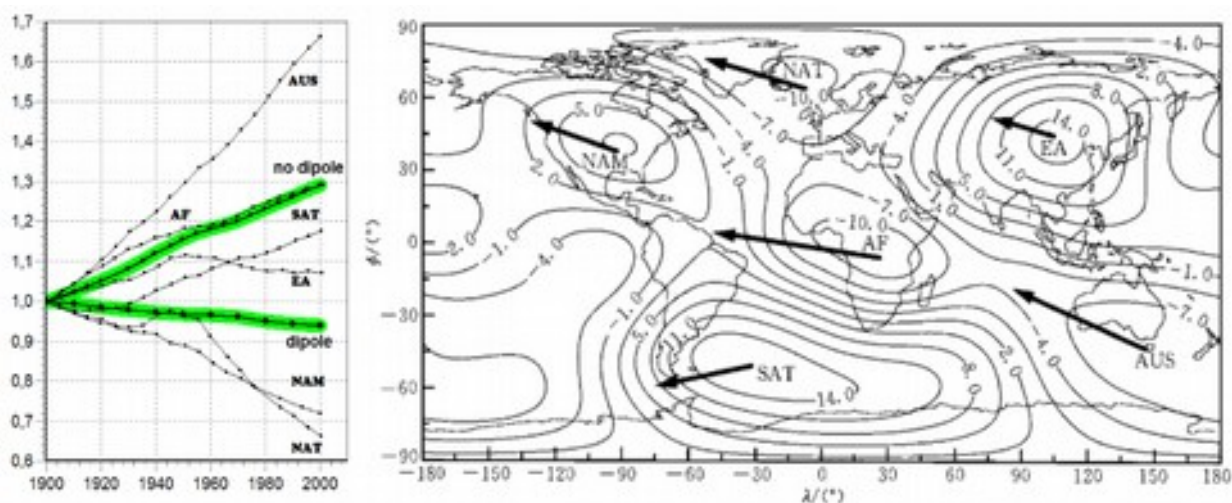


Рис. 1. Относительные изменения коэффициентов дипольных и не дипольных членов разложения магнитного поля Земли (слева) и перемещение неоднородностей за период 1900-2000 годы (справа). Скорость перемещения (в $^\circ/\text{year}$) шести магнитных аномалий [1]:

AF - near Africa (0.26), NAM - in North America (0.12), SAT - near South Atlantic (0.04),
AUS - near Australia (0.23), EA - in Europe and Asia (0.09), NAT - near North Atlantic (0.13).

Под магнитосферным эффектом космических лучей понимается воздействие на внешний поток космического излучения изменений состояния магнитосферы. В изотропном приближении интенсивность космических лучей N в пункте наблюдения можно представить через первичный спектр космических лучей $J(R)$ в виде как

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

где в качестве аппаратной функции выступает интегральная кратность генерации частиц определенного типа в атмосфере Земли $m(R, h_0)$. Преодолеет ли или нет заряженная частица магнитосферу – в уравнение (1) отражает дискретная функция $\delta(R)$. Если эффективный порог разрешенной области обозначить как R_c , то наблюдаемые вариации можно записать, как показано в правой части выражения (1). Характеристика R_c , определяемая как жесткость 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 счета каждого детектора (индексы опущены) получим:

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

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.

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

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. Были вычислены глобальные распределения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания для всех станций Мировой сети для девяти пятилетних эпох 1955 – 1995 годов. Детали и ссылки можно найти в [2]. Там же можно найти ссылки на обзоры магнитосферных эффектов на ранних и современных этапах.

Shea и Smart [3] обратили внимание на 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 жесткости, в то время как в северной – сопоставимое увеличение вертикальной жесткости обрезания.

За последние четыре эпохи такие расчеты 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 жесткость геомагнитного обрезания и асимптотические конусы приема требуется определить впервые.

2. МЕТОД РАСЧЕТА

В настоящее время общепринятым и наиболее точным способом определения жесткости геомагнитного обрезания является метод траекторных расчетов, основанный на решении уравнения движения заряженных частиц в геомагнитном поле. Обобщение методики расчета жесткостей геомагнитного обрезания можно найти в работах [2, 4].

Задача решается численно методом Рунге-Кутты 4 порядка точности с адаптивным шагом. Частицы стартуют с высоты 20 км. Интегрирование завершается в трех случаях: а) либо частица пересекала поверхность магнитопаузы (вышла за пределы магнитосферы), б) либо по истечении заданного времени (частица считается захваченной) или же с) ее радиус-вектор оказывался меньше, чем $(R_E + 20)$ км (частица вернулась в атмосферу).

В первом случае траектория помечается как разрешенная, в противном — запрещенная. В результате формируется дискретная функция, принимающая значения "0" и "1" для всех значений жесткостей с шагом 0.001 ГВ.

Привлекается модель главного магнитного поля IGRF, начиная с 1900 года по 2015 года с пятилетним интервалом. С учетом вековой вариации геомагнитного поля модель продолжена до 2020 года [5]. 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 используется программный комплекс PLANETOCOSMICS Geant4 v6 [6], на базе которого выполнены, например, работы [7-10]. К сожалению, PLANETOCOSMICS в настоящее время практически не поддерживается для современной версии Geant4 v10.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ПЛАНЕТАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ

Прежде чем приступить к расчету жесткостей геомагнитного обрезания для сети

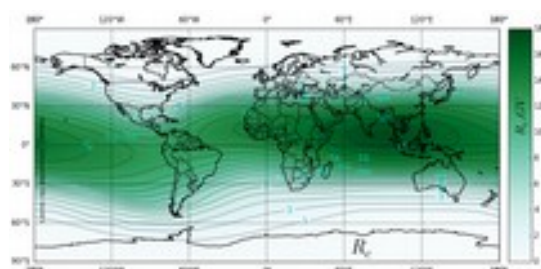


Рис. 2. Планетарное распределение вертикальной жесткости геомагнитного обрезания для эпохи 2020 (в GV для градиента или значений изолиний).

станций нейтронных мониторов, нами для эпох 1900.0 по 2050.0 (см. п.5) с шагом 5 лет для поля IGRF были выполнены расчеты планетарных распределений жесткостей геомагнитного обрезания для сетки 5° по широте и 15° по долготе. Цифровые результаты для всех эпох можно найти на сервере [11], по данным которых выполнены графические представления планетарных жесткостей геомагнитного обрезания. Пример такого представления для эпохи 2020 показан на рис.2 (в градиентном представлении и в виде изолиний жесткостей геомагнитного

обрезания).

Для получения динамики изменений жесткостей геомагнитного обрезания

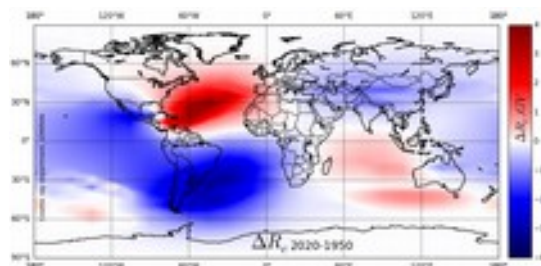


Рис. 3. Изменения планетарного распределения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания относительно эпохи 1950. [Mag_Effect, 2016].

определялись изменения планетарного распределения жесткостей геомагнитного обрезания относительно базовой эпохи (например, 1950.0). Один из результатов приведен на рис.3. Области наиболее сильных изменений находятся в северной и южной Атлантике. Но в первом случае наблюдается огромный восточный шлейф Европа — Австралия, во втором случае огромный западный шлейф — Тихой океан — Азия.

Выполнены и другие анимационные представления [11]. Такие распределения позволяют визуализировать динамику

изменений жесткостей геомагнитного обрезания из прошлого в будущее.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ ДЛЯ МИРОВОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ

Общее представление об изменениях жесткостей геомагнитного обрезания станций космических лучей Мировой сети дает рис.4, результаты которого были получены для поля IGRF.

На рис.4 приведены изменения жесткостей геомагнитного обрезания станций сети относительно эпохи 1950 за весь период непрерывного мониторинга космических лучей для 4-х групп станций. Жесткость геомагнитного обрезания одной группы станций увеличивается для станций, находящихся вблизи и на периферии аномалии в северной части Атлантики. Жесткость геомагнитного обрезания другой группы станций, напротив, уменьшается для станций, находящихся вблизи и на периферии аномалии в южной части Атлантики (см. рис.3). Жесткость геомагнитного обрезания достаточно существенно увеличивается, за счет северо-атлантической аномалии, но в этом районе нет станций космических лучей, а на периферии аномалии увеличение жесткостей геомагнитного обрезания уже незначительно. Но в целом наблюдается глобальное понижение жесткостей геомагнитного обрезания.

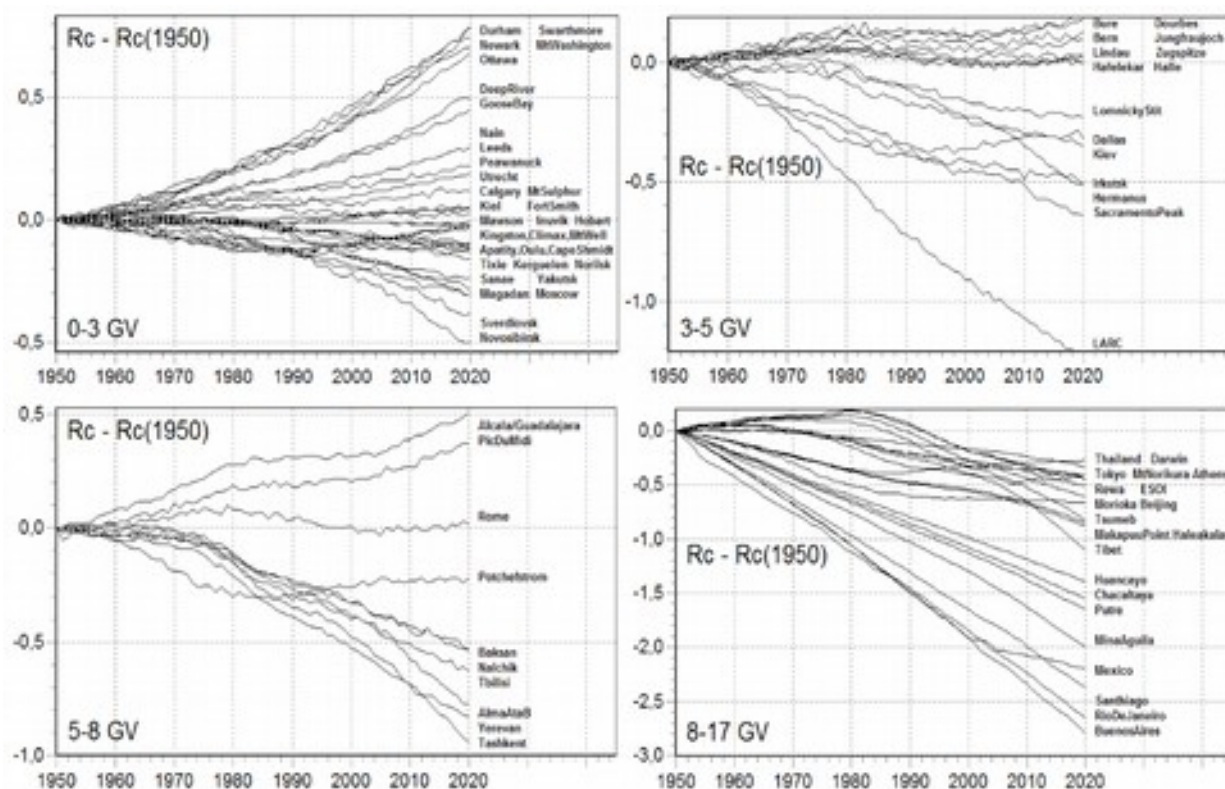


Рис. 4. Относительное изменение вертикальных жесткостей геомагнитного обрезания для 4-х групп станций космических лучей относительно эпохи 1950 (в приближении IGRF и плоского спектра вариаций).

Для Мировой сети станций космических лучей для периода 1950-2020 года с годовым разрешением получены вертикальные жесткости геомагнитного обрезания для функционирующих или проработавших длительный период нейтронных мониторов. Общее число станций – 124. Жесткости геомагнитного обрезания получены базирясь на модели International Geomagnetic Reference Field для 1950-2015 и прогностической модели для 2020 года. Результаты для всех детекторов можно найти на ресурсе [11].

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВКЛАД ВНЕШНЕГО ПОЛЯ В ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОГОВОЙ ЖЕСТКОСТИ

Магнитосфера Земли подвержена долгопериодным изменениям, обусловленным деятельностью Солнца. Для оценки таких изменений можно привлечь, например, модель магнитного поля Цыганенко Ts89. Входным параметром этой модели, характеризующим состояние внешнего магнитного поля, является Kp индекс. Поскольку Kp индекс логарифмический индекс, то для получения среднегодовых значений Kp индекса определялись Ap индексы с соответствующим пересчетом для получения среднегодового значения Kp индекса. Каков ожидаемый эффект? Даже при $Kp=0$ магнитосфера слабо возмущена, следовательно, внешнее магнитное поле компенсирует внутреннее магнитное поле, и жесткость геомагнитного обрезания незначительно уменьшается. С увеличением Kp , увеличивается и наблюдаемый эффект.

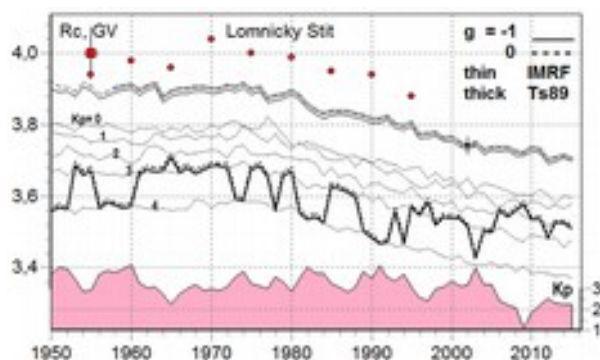


Рис. 5. Изменение жесткости геомагнитного обрезания для станции Lomnický Stit для двух моделей магнитосферы (IMRF и Ts89) и учетом пенумбры в приближении плоского ($\gamma=0$) и степенного ($\gamma=1$) спектра вариаций космических лучей.

гармоникам для эпохи 1955 (квадрат). Оценка точности 0.1 GV. Кружками также показан результат, полученный методом траекторных расчетов, но для поля IGRF [13] для всех станций мировой сети. Шаг интегрирования уравнения движения 0.01 GV, учет пенумбры проводился в приближении плоского спектра вариаций космических лучей. Эти расчеты дают примерно на 0.1 GV меньшую жесткость, что мы связываем с более точным шагом интегрирования уравнения движения.

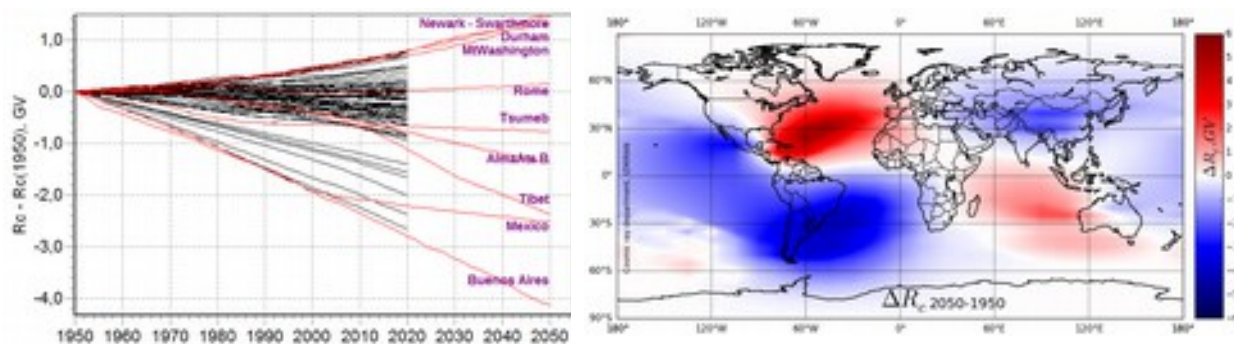


Рис. 6. Прогноз изменений вертикальной жесткости геомагнитного обрезания относительно эпохи 1950 для некоторых станций и прогноз изменений планетарного распределения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания. Прогноз относительно эпохи 1950 - [Animation 2050-1950](#), а относительно эпохи 1900 - [Animation 2050-1900](#).

Жесткости геомагнитного обрезания для модели Цыганенко Ts89 приведены в средней части рисунка. Для значений Kp индекса (от 0 до 4) точками показан возможный диапазон изменений жесткостей геомагнитного обрезания, в пределах которого изменяются реальные значения в зависимости от величины Kp индекса. В нижней части рис.5 приведены среднегодовые значения Kp индекса.

Расчет показывает, что учет влияния внешней магнитосферы на долгопериодные изменения жесткостей обрезания приводит к уменьшению жесткости геомагнитного обрезания на несколько десятых долей GV и достигает 0.3 GV для высокоширотных детекторов, например, для станций. Kerguelen, Deep River, Durham, Apatity. Наблюдаемые 11-летние изменения жесткости обрезания в противофазе с изменением Kp индекса незначительны и не превышают 0.1 GV, т.е. сравнимы с точностью вычисления самой жесткости. Результаты для всех детекторов Мировой сети можно найти на ресурсе [11].

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ

В приближении линейной экстраполяции коэффициентов разложения магнитного

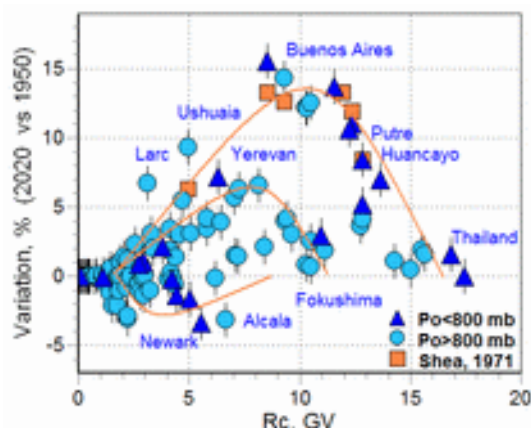


Рис. 7. Ожидаемые вековые вариации нейтронной компоненты для Мировой сети станций космических лучей. Треугольником выделены горные станции.

поля всех гармоник для эпох 2020.0 - 2050.0 на рис.6 для некоторых станций приведен прогноз вертикальной жесткости геомагнитного обрезания относительно эпохи 1950. В принятом приближении продолжается аномальное развитие поведения жесткостей геомагнитного обрезания, хотя невозможно с достоверностью утверждать, что такая линейность будет соответствовать действительности. На рис.7 приведено планетарное распределение жесткостей геомагнитного обрезания для будущих эпох. Такой прогноз может быть полезен при проектировании долговременных экспериментов.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

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 жесткости геомагнитного обрезания δR_c относительно базового периода и функцией связи $W(R_c, h_0)$ в точке R_c . Для станций Мировой сети ожидаемые вариации для 2020 года относительно 1950 года показаны на рис.7.

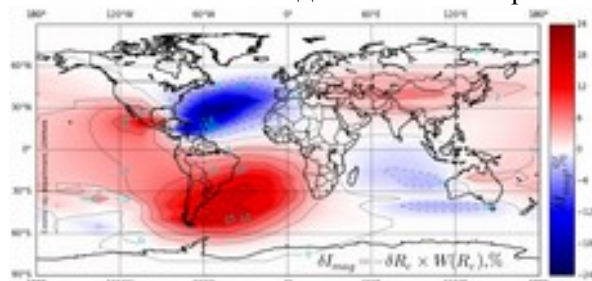


Рис. 8. Планетарное распределение ожидаемых вековых вариаций нейтронной компоненты космических лучей (в % для градиента и значений изолиний).

Ожидаемые вариации условно можно разделить на две группы. К первой группе (рис.7, верхняя и средняя группа точек) относятся станции, находящиеся в ближней и периферийных зонах южно-атлантической аномалии, для которых наблюдаются уменьшение жесткостей геомагнитного обрезания и, соответственно, положительные вариации. Ко второй группе (рис.7, 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.7 приведены также результаты работы [14], 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 [8], 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 вариаций магнитосферного происхождения для 2020 года относительно 1950 года показаны на рис.8 (в градиентном представлении – слева и в виде изолиний ожидаемых вариаций – справа).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, сама же аномалия дрейфует на запад со скоростью 0.14 °/year. 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 °/year. Такой эффект необходимо учесть при оценке спектра долгопериодных вариаций. Все результаты расчетов доступны в цифровом или графическом виде на ресурсе [11].

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 23 "Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика", гранта РФФИ № 17-02-00508а. 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

1. Wei Zi-Gang, Xu Wen-Yao // Chinese Journal of Geophysics. 2001. V.44. №4. P.496. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cjg2.167/epdf>.
2. Gvozdevsky B.B., Abunin A.A., Kobelev P.G., Gushchina R.T., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V.56. №4. P.381. doi:10.1134/S0016793216040046.
3. Shea M.A., Smart D.F. // Proc. 14th ICRC. Munchen. 1975. V.4. P. 1298.
4. Cooke, D. J., Humble, J. E., Shea, M. A., Smart, D. F., and Lund // Nuovo Cimento C Geophys. Space Phys. C. 1991. V.14. №3. P.213.
- 5 Model IGRF-12. ePub. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html> 2015
6. Desorgher, L.: The Planetocosmics code. (last access: 26 September 2013). 2006. <http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics>
7. Zreda Marek. COSMOS project University of Arizona. Cutoff rigidity online Calculator, model IGRF. E-pub. 2012. <http://cosmos.hwr.arizona.edu/Util/rigidity.php>
8. Herbst K., Kopp A., Heber B. // Annales Geophysicae. 2013. V.31. P.1637. |
9. Boschini M.J., Della T.S., Gervasi M., Grandi D., Rancoita P. G., Bobik P., Kudela K. // Cutoff rigidity online Calculator, model T96. T05. E-pub. 2014. <http://www.geomagsphere.org/index.php/vertical-rigidity-cutoff>
10. Doetinchem P., B. Yamashiro // Proc. 35th ICRC, 2017, Korea, PoS 151.

11. Mag_Effect ftp://crsb.izmiran.ru/Magnetospheric_Effect/Link_MagEffect.pdf. ePub, 2016.
12. *Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G.* // J. Geophys. Res. 1965. V.70. P. 4117. doi: 10.1029/JZ070i017p04117.
13. *Shea M.A., Smart D.F.* // Proc. 27th ICRC. 2001. P. 4063.
- 14 *Shea M.A.* // Proc. 12th ICRC. Hobart. 1971. V.3. P. 859.