

**ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ
И ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СПЕКТРА
ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

П.Г. Кобелев, В.Г. Янке

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия
kosmos061986@yandex.ru

**GLOBAL CHANGES OF GEOMAGNETIC CUTOFF RIGIDITIES
AND TWO-PARAMETRIC REPRESENTATION OF LONG-PERIOD VARIATION SPECTRA**

P.G. Kobelev, V.G. Yanke

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Moscow, Troitsk, Russia
kosmos061986@yandex.ru

Аннотация. Определены значения величин двухпараметрического спектра для всего периода наблюдений (1957–2017). Изменения спектра были исследованы с учетом временных изменений жесткостей обрезания.

Ключевые слова: космические лучи, спектр вариаций, жесткость геомагнитного обрезания.

Abstract. The values for two-parametric variations spectra are determined for the whole period of observations in 1957–2017 years. A long-period changes of spectra with taking account of cut-off rigidity changes were received.

Keywords: cosmic rays, variation spectra, geomagnetic cutoff rigidity.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании физических процессов в межпланетной среде и для определения структуры гелиосферы начиная с середины 1950-х гг. используется такой инструмент как Мировая сеть нейтронных мониторов, мюонных телескопов и детекторов стратосферного зондирования. Измерению подлежат относительные вторичные вариации скорости счета детекторов, которые в приближении нулевой гармоники связаны с отражающим межпланетные процессы спектром первичных вариаций космических лучей системой интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода:

$$v^i = \int_{R_c^i}^{\infty} W^i(R_c^i, h_0^i, R) \frac{\partial J}{J}(R) dR, \quad (1)$$

где в качестве ядра интегрального уравнения выступает функция связи W^i , а в качестве неизвестной функции — спектр вариаций dJ/J . В нашем случае важным обстоятельством является то, что искомое решение можно искать в виде аналитической функции спектра вариаций dJ/J с некоторым числом параметров.

**МЕТОД
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ**

Спектр вариаций космических лучей может быть представлен в двухпараметрическом виде

$$\frac{\partial J}{J}(R) = a_1 R^{-\gamma}, \quad (2)$$

где a_1 представляет собой вариации потока частиц с жесткостью 1 GV, а $\gamma > 0$ — параметр степенного спектра. Предпочтительнее использовать приведенный к 10 GV спектр вариаций вида

$$\frac{\partial J}{J}(R) = a_{10} \left(\frac{R}{10} \right)^{-\gamma}, \quad (3)$$

где $a_{10} = a_1 10^{-\gamma}$ представляет собой амплитуду частиц с жесткостью 10 GV, что близко к эффективной жесткости для нейтронных мониторов.

Систему уравнений (1) можно линеаризовать разложением в ряд Тейлора в окрестности нулевого приближения, получив уравнения вида

$$v^i \approx v^i|_0 + A_1^i|_0(a - a_0) + A_2^i|_0(\gamma - \gamma_0), \quad (4)$$

и решить методом последовательных приближений. Коэффициенты разложения A_1 и A_2 для приведенного к 10 GV спектра определяются как

$$A_1^i = C_{00}(\gamma), \quad A_2^i = a_{10} \int_{R_c^i}^{\infty} \ln\left(\frac{R}{10}\right) \Psi^i(\gamma, R) dR,$$

где

$$\Psi^i(\gamma, R) = W^i(R_c^i, h_0^i, R) \left(\frac{R}{10} \right)^{-\gamma}. \quad (5)$$

Для решения системы уравнений (4) требуется выполнить некоторое количество итерационных шагов из точки нулевого приближения.

Для определения приемных коэффициентов нулевой гармоники нейтронной, мюонной и заряженной компоненты в атмосфере привлекались функции связи из работ [Fujimoto et al., 1977; Александрия и др., 1982; Svirzhevsky, 2002]. Для учета долговременных изменений жесткостей геомагнитного обрезания для исследуемого периода привлекались результаты работы [Gvozdevsky et al., 2019]. Для каждого месяца формируется графический результат, пример которого приведен на рис. 1.

На рис. 1 на второй панели сверху приведена невязка между наблюдаемыми вариациями всех детекторов и моделью для момента времени, отмеченного в виде вертикальной линии на верхней панели на кривой чисел Вольфа. На панели невязок приведены также найденные параметры спектра вариаций a_{10} и γ для данного момента времени. На левой нижней панели показана зависимость нормированных на a_{10} вариаций от приемных коэффициентов C_0 . Первая точка в области малых C_0 относится к вертикальной компоненте мюонного телескопа Nagoya, последняя точка

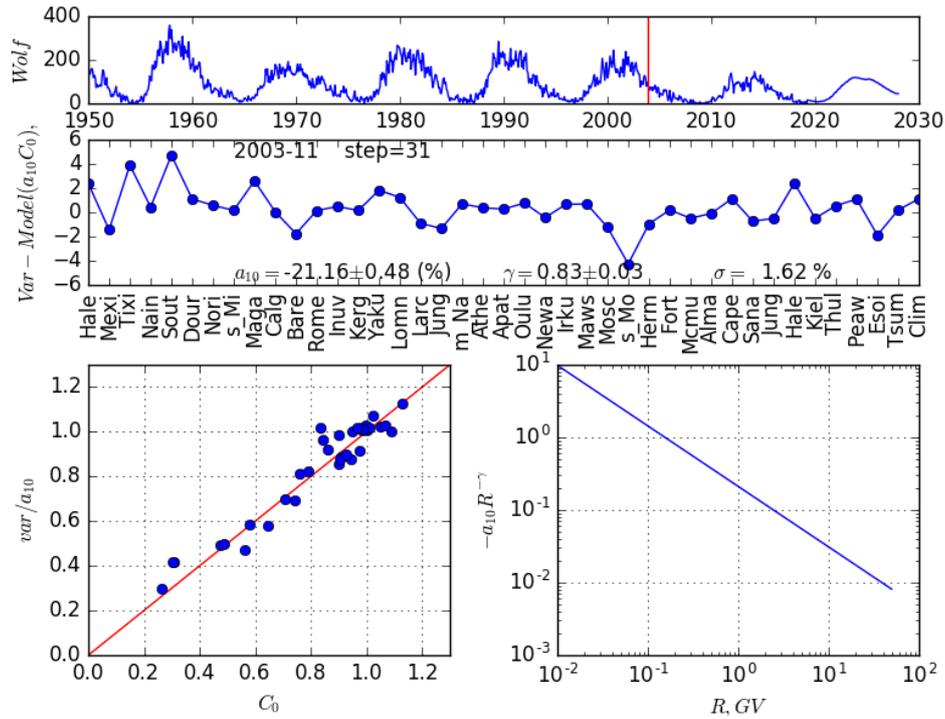


Рис. 1. Пример графического результата для ноября 2003 г.

в области больших C_0 — к детектору стратосферного зондирования, остальные точки — к нейтронным мониторам.

Конечно, хорошая корреляция (>0.9) наблюдается только для максимума солнечной активности, когда наблюдаются большие вариации относительно базового периода. Искомый жесткостной спектр dJ/J вариаций в двойном логарифмическом масштабе приведен на правой нижней панели.

На рис. 2 проведена иллюстрация сходимости метода в минимуме (1996) и максимуме (1992) солнечной активности. По линейному параметру a_{10} сходимость очень быстрая. Из начальной точки X_0 практически за одну итерацию определяется решение для a_{10} , а затем идет медленный поиск решения для γ с уточнением a_{10} . Число итераций может достичь нескольких десятков. В правой верхней части рисунка для 1987 (острый минимум с очень небольшим отличием значений от 2009) года приведен пример расходящегося решения; в этом случае задача сходится только с небольших (~ 0.4) стартовых значений γ .

В настоящей работе учтены несколько новых моментов: а) рассматриваемый ряд данных дополнен данными последнего десятилетия; б) анализ спектра вариаций проведен для базы 2009 г., что позволило повысить точность определения параметров спектра, в) для решения задачи была разработана база данных *ltvdb*, г) учтены изменения жесткостей геомагнитного обрезания [Gvosdevsky et al., 2016, 2017] для сети станций космических лучей за рассматриваемый период.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 3 для всего рассматриваемого периода показаны долговременные изменения параметров

спектра вариаций и некоторых характеристик системы линейных уравнений.

На первой и второй панели приведены временные зависимости амплитуды спектра вариаций a_{10} и показателя степенного спектра γ с ошибками их определения. Сравнение показывает хорошее согласие с результатами работы [Yanke et al., 2019]. На третьей панели приведена временная зависимость среднеквадратичной ошибки распределения невязок системы уравнений.

На четвертой панели приведены числа обусловленности системы уравнений, которые указывают на хорошую сходимость решения для всех периодов, кроме базового. На последней панели показаны числа итераций для каждого момента времени. Для ускорения процесса сходимости в качестве начального приближения использовалось предыдущее решение, что позволило уменьшить время решения вдвое.

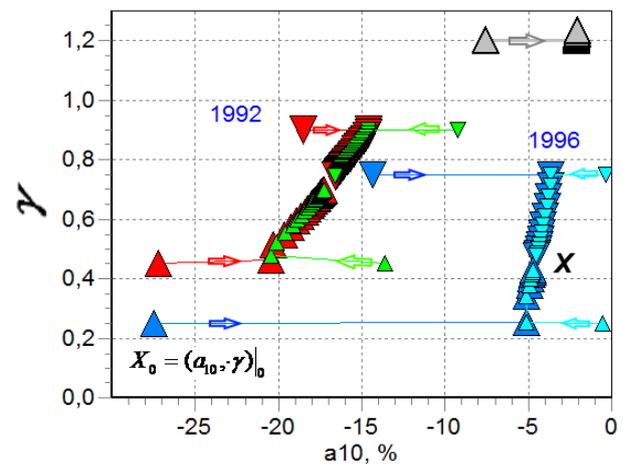


Рис. 2. Иллюстрация сходимости метода для двухпараметрического спектра вариаций

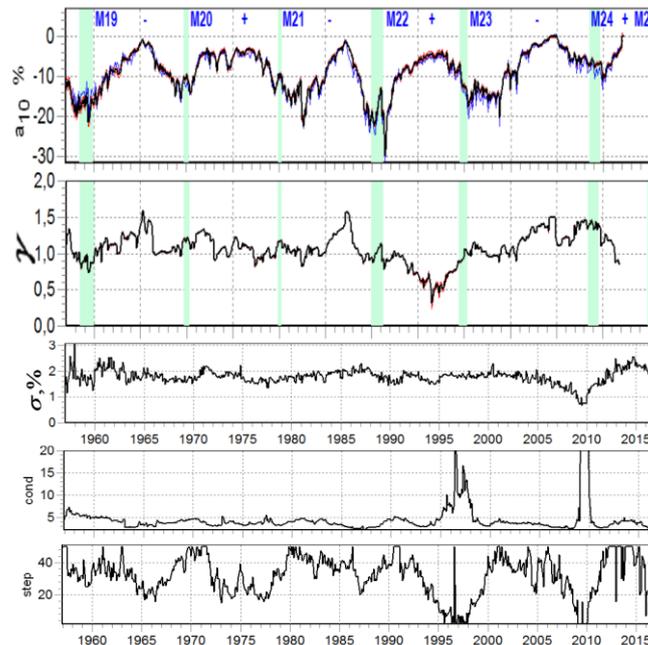


Рис. 3. Долговременные изменения параметров спектра вариаций и характеристики системы уравнений для всего рассматриваемого периода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика решения системы уравнений методом линеаризации показала высокую эффективность с возможностью количественной оценки значений параметров, их корреляций и ошибок. Хотя чисто степенной спектр вариаций является простым приближением, полученные результаты находятся в хорошем согласии с выводами других работ [Yanke et al., 2019]. Все полученные численные и графические результаты можно найти в архиве [<ftp://crsb.izmiran.ru/LTV/2019>]. Дальнейшую работу следует проводить в направлении увеличении числа параметров спектра для более точного его описания в нижней области жесткостей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-02-00508а. Работа базируется на экспериментальных данных УНУ «Российская национальная сеть станций космических лучей» и Мировой сети станций космических лучей [<http://www.nmdb.eu>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрян Т.М., Белов А.В., Янке В.Г. и др., Экспериментальные исследования геомагнитных эффектов в космических лучах и спектр эффекта возрастания перед магнитными бурями // Изв. РАН. Сер. физ. 1982. Т. 46, № 9. С. 1689–1691.
- Fujimoto K., Murakami K., Kondo I., Nagashima K. A approximate formula for response function of cosmic ray hard component at various depths of the atmospheres and underground // Proc 15th ICRC, Plovdiv, Bulgaria. 1977. V. 4. P. 321–325.
- Gvozdevsky B.B., Belov A.V., Gushchina R.T., et al. Planetary long term changes of the cosmic ray geomagnetic cut off rigidities // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1181. P. 012008. DOI: [10.1088/1742-6596/1181/1/012008](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012008).
- Svirzhevsky N.S., Thesis, FIAN. 2002.
- Yanke V.G., Belov A.V., Gushchina R.T., Zirakashvili V.N. The rigidity spectrum of the long-term cosmic ray variations during solar activity cycles 19–24 // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1181. P. 012007. DOI: [10.1088/1742-6596/1181/1/012007](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012007). URL: <ftp://crsb.izmiran.ru/LTV/2019>, 2019. URL: <http://www.nmdb.eu>.