

УДК 52.724:52.726

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПЕКТР ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ AMS-02

© 2021 г. В. Г. Янке^{1, *}, А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹, Е. А. Ерошенко¹,
В. А. Оленева¹, Л. А. Трефилова¹, П. Г. Кобелев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

По данным прямых измерений магнитного спектрометра AMS-02 экспериментально найден спектр вариаций космических лучей для диапазона жесткостей наиболее чувствительного к наземным нейтронным мониторам.

DOI: 10.31857/S0367676521090349

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные данные об изменениях потока космических лучей (КЛ) за период с середины 50-х годов по настоящее время с хорошей точностью могли быть получены только по непрерывным наземным измерениям на сети детекторов космических лучей. Необходимость анализа результатов такого длительного наземного мониторинга привела к созданию особых методов. Один из первых и самых успешных реализованных методов был создан в [1, 2], названный глобально спектрографическим методом (GSM).

Действительно, наблюдаемые относительные вариации скорости счета $v_i = \delta N^i / N^i$ детекторов космических лучей могут быть представлены как

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

Здесь в качестве аппаратной функции интегрального уравнения выступает функция связи $W^i(R_c^i, h_0^i, R)$ [3, 4] первичных и вторичных вариаций космических лучей, $\delta J / J(R)$ — искомый спектр вариаций.

Важной является ситуация, когда аналитическая форма искомого решения известна, или решение с высокой степенью достоверности может быть аппроксимировано моделью, либо решение построено на основе априорных сведений. В этом случае размерность задачи может быть существенно уменьшена и, как правило, соответствующая система уравнений для нахождения небольшого

числа неизвестных параметров оказывается хорошо обусловленной. Важным преимуществом этого подхода является то, что практически никогда нельзя получить абсурдного решения, если аналитическая модель выбрана в соответствие с исследуемым процессом.

Задача настоящей работы — по экспериментальным данным AMS-02 о спектре протонов в диапазоне жесткостей от нескольких ГВ до нескольких десятков ГВ установить аналитическую форму спектра вариаций с минимальным числом параметров для использования при анализе данных мониторинга мировой сети детекторов космических лучей. Это позволит отказаться от эмпирически задаваемых спектров вариаций.

ДАННЫЕ МАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА AMS-02

Уникальную возможность измерения спектральных характеристик при умеренных и высоких жесткостях дают высокоточные данные орбитального детектора космических лучей AMS-02 [5, 6]. Геометрический фактор магнитного спектрометра AMS-02 около $0.5 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$, что обеспечивает статистическую точность 1.5% для усреднения по каррингтоновскому обороту.

Цифровые данные детектора AMS-02, усредненные по каррингтоновским оборотам, описаны в [8] и доступны в базе данных [7] для широкого диапазона жесткостей. В настоящей работе мы ограничились жесткостями частиц в диапазоне

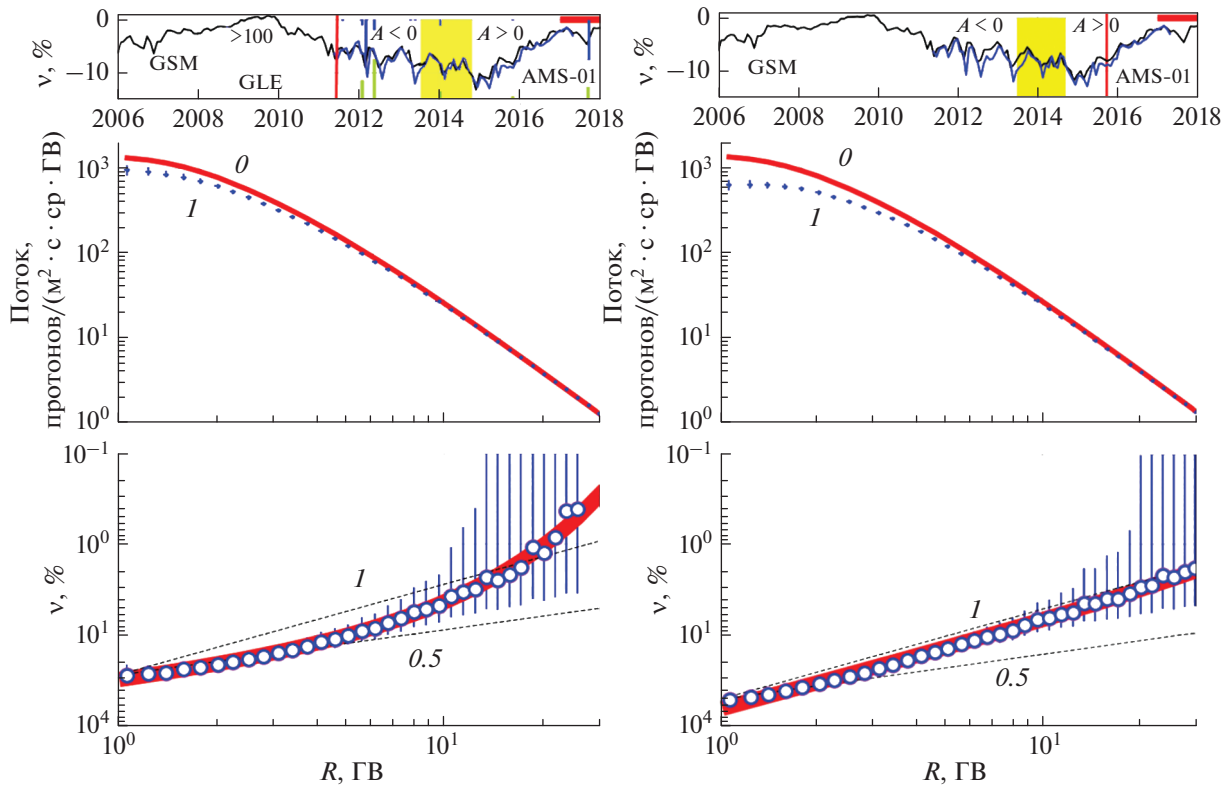


Рис. 1. Пример результата анализа для двух моментов времени для периода отрицательной (2011-05-15, слева) и положительной полярности (2015-09-24, справа) межпланетного магнитного поля. На средних панелях показаны спектры частиц: *0* – спектр частиц в базовый период, *1* – спектр частиц в текущий момент. На нижних панелях показаны спектры вариаций (3), найденные на основе представленных выше спектров частиц. Для спектров вариаций проводилась аппроксимация вида (4). Детальное описание в тексте.

1–20 ГВ. Весь временной период разделен на 79 временных интервалов с мая 2011.

НАЗЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ И МЕТОД GSM

В [9] был разработан вариант глобально спектрографического метода, специально приспособленного для изучения долговременных вариаций в приближении изотропных вариаций. Анализ проводится по среднемесячным данным нейтронных мониторов (около 45 детекторов), мюонных телескопов и данных стратосферного зондирования. В простейшем случае изотропных вариаций задача сводится к решению системы уравнений (1). В модели было принято, что спектр вариаций, задается в трехпараметрическом виде:

$$\frac{\delta J}{J_B(R)} = \frac{a_1}{(R_L + R)^\gamma}, \quad (2)$$

где $J_B(R)$ относится к периоду, который принят за базовый период. Вид спектра вариаций в форме (2) выбран эмпирически, но рассматривались и другие варианты спектра вариаций. Прямой экспериментальной проверки вида спектра вариаций в

диапазоне жесткостей от одного до нескольких десятков ГВ никогда не проводилось, поскольку максимальные жесткости частиц в прямых измерениях потоков в лучшем случае достигало 2 ГВ. Проведение прямых измерений в широком диапазоне жесткостей с помощью уникального магнитного спектрометра AMS-02 позволило решить эту задачу.

МЕТОД ОЦЕНКИ СПЕКТРА ВАРИАЦИЙ

Методику оценки спектров вариаций иллюстрирует рис. 1 для периода отрицательной полярности (слева) и положительной полярности (справа), а рассматриваемый момент времени отмечен вертикальной риской на верхней панели рисунка. Здесь же вертикальными отрезками отмечен вклад [10] солнечных космических лучей SPE и GLE, который незначителен.

На средней панели приведен спектр частиц (протонов) J для рассматриваемого момента времени и спектр частиц J_B в базовый период (январь-апрель 2017 г., горизонтальный отрезок на верхней панели). Изменения спектра частиц относительно спектра частиц в базовый период и

определяют спектр вариаций, который определяется как

$$v = (J - J_B)/J_B. \quad (3)$$

Результат приведен на нижней панели рис. 1.

Наиболее удачным для аппроксимации экспериментального спектра вариаций частиц в широком диапазоне жесткостей оказался степенной спектр, модулированный экспонентой в области верхних жесткостей, т.е.

$$v = a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H), \quad (4)$$

который легко линеаризуется. Результаты аппроксимации приведены на нижней панели рис. 1, где приведены также степенные спектры для $\gamma = 0.5$ и 1.0 .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметры аппроксимации рассматриваемой модели получены для каждого оборота с мая 2011. Важным результатом работы является трансформация вида спектра в разные периоды полярности межпланетного магнитного поля. В период отрицательной полярности магнитного поля Солнца до переполусовки параметр R_H близок к 10 ГВ. Это означает, что наблюдается степенной спектр вариаций галактических космических лучей с сильным экспоненциальным затуханием. При смене полярности и начала нового 24-го солнечного цикла параметр R_H близок к 100 ГВ и спектр вариаций переходит в чисто степенной.

В периоды положительной магнитной полярности частицы попадают в гелиосферу из полярных областей, дрейфуют к экватору и уходят из гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя. Детектор находится вблизи Солнца. При дрейфе от полюса к экватору частицы теряют энергию, соответствующую разности потенциалов гелиосферы Φ . Так как потенциал Φ слабо зависит от возмущенности магнитного поля – в минимуме SA максимум амплитуды изотропной вариации плоский. Интенсивность вариаций пропорциональна $\Delta\Phi/R$ [11], т.е. показатель $\gamma \approx 1$, что и наблюдается. При отрицательной полярности в приближении слабой модуляции (т.е. высоких энергий) частицы дрейфуют из внешней гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя и через полярные области покидают гелиосферу. Таким образом, модуляция частиц определяется только потерями энергии при распространении в экваториальной области, определяемыми длиной свободного пробега частиц. Таким образом, наблюдаемый на Земле спектр частиц хорошо коррелирует с уровнем возмущенности магнитного поля, поэтому в минимуме SA максимум острый. Для высоких энергий $\lambda \sim p^2$ [11] и показатель $\gamma \approx 2$. Что

также экспериментально наблюдается при жесткости ~ 10 ГВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для периода с мая 2011 г. по апрель 2017 г., благодаря своим уникальным возможностям, спутниковый эксперимент AMS-02 впервые позволил получить экспериментальный спектр вариаций космических лучей в диапазоне жесткостей ~ 1 –20 ГВ, к которым чувствительна наземная сеть нейтронных мониторов. Это, в свою очередь, позволило снять неопределенность в выборе спектра вариаций космических лучей при проведении GSM анализа, поскольку до настоящего момента спектр вариаций космических лучей определялся только эмпирически.

Установлена трансформация вида спектра: в период отрицательной полярности магнитного поля Солнца до переполусовки наблюдается степенной спектр вариаций галактических космических лучей с сильным экспоненциальным затуханием. При смене полярности и начала нового 24-го цикла спектр вариаций переходит в чисто степенной спектр.

Найденный вид спектра вариаций позволит увеличить точность восстанавливаемых параметров спектра вариаций космических лучей за пределами магнитосферы по данным сети наземных детекторов.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ “Сеть СКЛ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др. // Геомагн. и аэроном. 1966. Т. 6. № 6. С. 991.
2. Nagashima K. // RISRJ. 1971. V. 25. No. 3. P. 189.
3. Алексаньян Т.М., Белов А.В., Янке В.Г. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 9. С. 1689.
4. Fujimoto K., Murakami k., Kondo I., Nagashima K. // Proc. 14-th ICRC (Tokyo, Japan, 1976). P. 50.
5. Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al. (AMS Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. Art. No. 171103.
6. Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al. (AMS Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. Art. No. 051101.
7. <https://tools.ssdc.asi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp>.
8. DiFelice V., Pizzolotto C., D’Urso D. et al. // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). Art. No. 1073.
9. Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г. // Геомагн. и аэроном. 1998. Т. 38. № 4. С. 131; Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G. // Geomagn. Aeronomy. 1998. V. 38. No. 4. P. 506.
10. Ишков В.Н. // Геомагн. и аэроном. 2018. Т. 58. № 6. С. 785; Ishkov V.N. // Geomagn. Aeronomy. 2018. V. 58. No. 6. P. 753.
11. Долгинов А.З., Топтыгин И.Н. Распространение космических лучей в пространственно-неоднородной межпланетной рассеивающей среде. М.: Наука, 1979. 830 с.

Experimental spectrum of cosmic ray variations in the Earth's orbit according to AMS-02 data

**V. G. Yanke^{a,*}, A. V. Belov^a, R. T. Gushchina^a, E. A. Eroshenko^a,
V. A. Oleneva^a, L. A. Trefilova^a, P. G. Kobelev^a**

*^aPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 108840 Russia*

**e-mail: yanke@izmiran.ru*

Based on the data of direct measurements of the AMS-02 magnetic spectrometer, the spectrum of cosmic ray variations was experimentally found for the range of rigidity, in which ground-based neutron monitors are most sensitive.