

УДК 52.724:52.726

СРАВНЕНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ СЕТИ НАЗЕМНЫХ ДЕТЕКТОРОВ, PAMELA И AMS-02

© 2021 г. А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹, Н. С. Шлык¹, В. Г. Янке¹, *

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.

Представлены результаты сравнения долговременных изменений потока космических лучей, полученных по данным сети наземных детекторов, с прямыми измерениями потоков на магнитных спектрометрах PAMELA, AMS-02 и в стратосферных зондированиях.

DOI: 10.31857/S0367676521090040

ВВЕДЕНИЕ

Галактические космические лучи (КЛ) вплоть до жесткостей >100 ГВ постоянно модулируются солнечным ветром. Эта модуляция давно наблюдается наземными детекторами (мюонными телескопами и нейтронными мониторами). Чтобы получить изменения первичных галактических КЛ, решается обратная задача восстановления характеристик вариаций КЛ за пределами магнитосферы. Такую задачу решает глобально спектрографический метод (GSM) [1–3].

В последние десятилетия проводятся и прямые измерения потоков частиц больших жесткостей (десятки ГВ) на космических аппаратах около Земли.

Цель настоящей работы является сравнение результатов наземных измерений, обработанных методом GSM, с прямыми измерениями потока космических лучей на космических аппаратах. Такая возможность появилась с запуском магнитных спектрометров PAMELA и AMS-02, измеряющих потоки частиц в широком диапазоне жесткостей.

Работ, в которых проводились сравнения прямых и косвенных измерений выполнено много [4–10], но конечной их целью являлась реконструкция в рамках приближения силового поля потенциала модуляции.

НАЗЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ И МЕТОД GSM

Земля представляет собой гигантский естественный магнитный спектрометр, разделяющий первичные заряженные частицы по жесткости до 59 ГВ, так что регистрация космических лучей на различных широтах и различных глубинах в атмосфере дает существенно отличающиеся результаты.

Непосредственно измерению подлежат скорости счета N детекторов. Измеренные вариации в приближении нулевой гармоники связаны с отражающим межпланетные процессы спектром первичных вариаций $\delta J/J(R)$ системой интегральных уравнений Фредгольма I рода:

$$v^i = \delta N/N|_{R_C^i} = \int_{R_C^i}^{\infty} W(R_C^i, h_0^i, R) \delta J/J dR, \quad (1)$$

где в качестве ядра уравнения выступает функция связи $W^i(R_C^i, h_0^i, R)$ первичных и вторичных вариаций, регистрируемых детектором $i(1, \dots, m)$, расположенного в пункте с жесткостью геомагнитного обрезания R_C^i на глубине в атмосфере h_0^i , а в качестве неизвестной функции $\delta J/J(R)$ — спектр вариаций. Важным обстоятельством является то, что искомое решение можно найти в виде аналитической функции спектра вариаций и $\delta J/J$ с некоторым числом параметров, что увеличивает

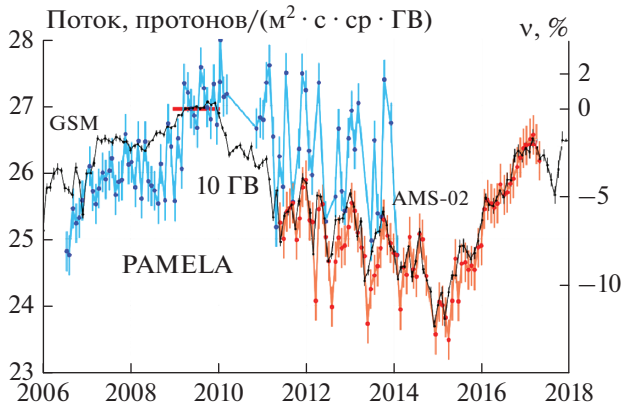


Рис. 1. Сравнение данных спектрометров PAMELA и AMS-02 с данными GSM. Горизонтальный отрезок – базовый период 2009 г. Данные PAMELA приведены без коррекции на эффективность $\epsilon = 1.049$ с 2010 г.

устойчивость найденного решения. Для спектра вариаций часто используется параметрическое представление в виде [11]:

$$\delta J/J = a_1(R_0 + R)^{-\gamma} \quad \text{при} \quad R \leq R_u, \quad (2)$$

где R_u – верхняя граничная жесткость области модуляции. В результате выполненных расчетов за период мониторинга космических лучей получены амплитуда и параметры спектра вариаций плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ, близкой к эффективной жесткости частиц, регистрируемых нейтронными мониторами.

ДААННЫЕ МАГНИТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ PAMELA И AMS-02

Прямые измерения галактических космических лучей в интересующем нас диапазоне жесткостей около 10 ГВ, проводились с помощью магнитных спектрометров на космических аппаратах PAMELA [12–15] и AMS-02 [16, 17].

Геометрический фактор магнитного спектрометра PAMELA $21.5 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$ [15], спектрометра AMS-02 $\sim 0.5 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$ [18]. Соответственно статистические ошибки данных спектрометра PAMELA составляют $\sim 4\%$ (после 2010 г. $\sim 8\%$), спектрометра AMS-02 – 1.5% для жесткости ~ 10 ГВ для всего периода мониторинга. Цифровые данные детекторов доступны в базе данных [19] и описаны в работе [20].

МЕТОД АНАЛИЗА

Для сравнения потоков PAMELA и AMS-02 необходимо сформировать данные PAMELA и AMS-02 для жесткости 10 ГВ, для которой имеются ряд данных наземных измерений, обработанных

методом GSM. Экспериментально поток протонов определялся в некотором интервале жесткостей, и оценка средней жесткости частиц проводилась в соответствии с работой [21].

Поскольку результатом GSM-анализа является спектр вариаций v космических лучей при ~ 10 ГВ, то необходимо провести прямую калибровку и привязку данных такого многонаправленного наземного детектора к реальным спектрам частиц. Процедура калибровки следующая. Вариации относительно базового периода (поток J_B) в этот период, по определению, равны

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

откуда для калибровки мы получаем:

$$J = J_B(v + 1). \quad (4)$$

Калибровка проводилась относительно базового периода 2009 года по данным магнитного спектрометра PAMELA, для которого $J_B = 26.94$ протон/ $(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{ГВ})$ для жесткости 10 ГВ.

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ PAMELA И AMS-02 С ДАННЫМИ GSM

За весь период работы проведено сравнение данных магнитных спектрометров PAMELA и AMS-02, пересчитанные к 10 ГВ, с калиброванными данными GSM в единицах потока (левая шкала) и их вариаций (правая шкала) (см. рис. 1). Вариации вычислены относительно базового периода 2009 г. по данным PAMELA. Следует отметить очень хорошее согласие данных AMS-02 и GSM за весь представленный период. Согласие данных PAMELA и GSM удовлетворительное. Исключение составляет период с 13 января 2010 по январь 2014 г., когда наблюдаются очень большие вариации для данных PAMELA и общий сдвиг относительно данных GSM и AMS-02. Чтобы согласовать данные PAMELA с данными AMS-02 и GSM за этот период, мы ввели эффективность детектора PAMELA $\epsilon = 1.049$ для ~ 10 ГВ, т.е. на 4.9% поток завышен, что уже учтено на рис. 2. Эта проблема обсуждалась и авторами проекта PAMELA [22], AMS-02 было обнаружено, что высокоэнергетическая часть результирующего спектра имеет систематическую временную зависимость, выходящая за рамки статистической неопределенности, и потоки отклонялись от нескольких до 8 процентов в зависимости от энергии.

Важно отметить, что вариации данных магнитометров PAMELA и AMS-02 вычислялись относительно базового периода 2009 г. по базовому значению PAMELA (горизонтальный отрезок на рис. 1). Поэтому согласие вариаций PAMELA, AMS-02 и GSM свидетельствует о правильной калибровке GSM и об отсутствии дрейфа данных

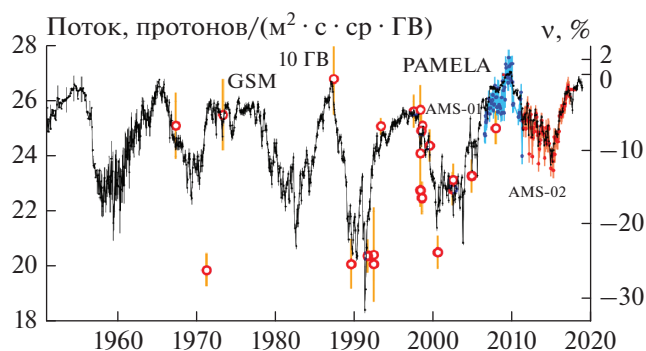


Рис. 2. Временные изменения потока протонов галактических космических лучей на 1 а. е. по данным наземной сети детекторов и сравнение с прямыми измерениями. Приведены также потоки AMS-01 и данные баллонного стратосферного зондирования согласно с каталогом [24], в частности, данные запусков MASS (1989, 1991), IMAX (1992), серии BESS (1997, 1998, 1999, 2000, 2002) и BESS Polar (2004, 2007-08).

магнитных спектрометров PAMELA и AMS-02. Но вариации на среднемесячном масштабе (особенно в максимуме) по данным AMS-02 в полтора раза превышают вариации, полученные в результате GSM анализа. Причину предстоит еще выяснить.

На рис. 2 приведены временные изменения потока протонов на 1AU по данным наземной сети нейтронных мониторов. Проведено также сравнение с прямыми измерениями с помощью магнитных спектрометров PAMELA и AMS-02 и некоторыми данными баллонного стратосферного зондирования из каталога [23], в частности, данные запусков MASS (1989, 1991), IMAX (1992), серии BESS (1997, 1998, 1999, 2000, 2002) и BESS Polar (2004, 2007-08).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря своим уникальным возможностям магнитный спектрометр PAMELA позволил провести калибровку спектра вариаций космических лучей, найденного в результате GSM анализа. Прямые измерения потока частиц в экспериментах PAMELA и AMS-02, также как данные серии баллонных зондирований, позволили провести сравнение с долговременными изменениями потока космических лучей по данным сети наземных детекторов, которое показало хорошее согласие и отсутствие признаков аппаратного дрейфа.

Исключение составляют потоки PAMELA с 2010 г., для которых необходимо было ввести эффективность $\epsilon = 1.049$ для ~ 10 ГВ. Эта проблема обсуждалась также авторами проекта PAMELA [22].

Проведена оценка потока КЛ со среднемесячным разрешением за пределами магнитосферы за весь период мониторинга космических лучей, по-

лученная методом GSM. Космическая радиация является существенным препятствием для пилотируемых полетов, и точные измерения космического излучения необходимы для планирования соответствующих мер защиты.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ "Сеть СКЛ".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др. // Геомагн. и аэронаом. 1966. Т. 6. № 6. С. 991.
2. Nagashima K. // RISRJ. 1971. V. 25. No. 3. P. 189.
3. Belov A.V., Dorman L.I. and Yanke V.G. // Proc. 18-th ICRC. V. 10. (Bangalore, 1983). P. 144.
4. Alanko K., Usoskin I.G., Mursula K., Kovaltsov G.A. // Adv. Space Res. 2003. V. 32. No. 4. P. 615.
5. Usoskin I.G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G.A., Mursula K. // JGR Space Phys. 2005. V. 110. Art. No. A12108.
6. Usoskin I.G., Gil A., Kovaltsov G.A. et al. // JGR Space Phys. 2017. V. 122. Art. No. 3875.
7. Usoskin I.G., Bazilevskaya G.A., Kovaltsov G.A. // JGR Space Phys. 2011. V. 116. Art. No. A02104.
8. Koldobskiy S.A., Kovaltsov G.A., Usoskin I.G. // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. Art. No. 4479.
9. Koldobskiy S.A., Bindi V., Corti C. et al. // Proc. ICRC 2019. (Madison, 2019). Art. No. 1094.
10. Koldobskiy S.A., Bindi V., Corti C. et al. // J. Geophys. Res. 2019. V. 124. Art. No. 2367.
11. Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г. // Геомагн. и аэронаом. 1998. Т. 2. № 4. С. 131; Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G. // Geomagn. Aeronom. 1998. V. 38. No. 4. P. 131.
12. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Astropart. J. Lett. 2011. V. 742. P. 102.
13. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Astropart. J. Lett. 2013. V. 765. No. 2. Art. No. 91.
14. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Phys. Rep. 2014. V. 544. No. 4. Art. No. 323.
15. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Riv. Nuovo Cimento 2017. V. 40. P. 473.
16. Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. Art. No. 171103.
17. Aguilar M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. Art. No. 051101.
18. Ting S. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2013. V. 243–244. Art. No. 12.
19. <https://tools.ssdsc.asi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp>.
20. <https://pos.sissa.it/301/1073/pdf>.
21. Lafferty G.D., Wyatt T.R. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 355. P. 541.
22. Martucci M. et al. // Astropart. J. Lett. 2018. V. 854. Art. No. L2.
23. <https://stratocat.com.ar/globos/indexe.html>.

Comparison of long-term variations of the cosmic ray flux from the network of ground-based detectors, PAMELA and AMS-02 data

A. V. Belov^a, R. T. Gushchina^a, N. S. Shlyk^a, V. G. Yanke^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*

We present preliminary results of a comparison of long-term variations of the cosmic ray flux using data from the network of ground-based detectors with direct flux measurements on the PAMELA and AMS-02 magnetic spectrometers and a series of balloon stratospheric soundings.