

УДК 52.724.52.726

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПЕКТР ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЖЕСТКОСТЕЙ ПО ДАННЫМ AMS-02

© 2021 г. В. Г. Янке<sup>1</sup>, \*, А. В. Белов<sup>1</sup>, Н. С. Шлык<sup>1</sup>, П. Г. Кобелев<sup>1</sup>, Л. А. Трефилова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

\*yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Вся достоверная информация о долговременных характеристиках межпланетной среды, таких как спектр вариаций, анизотропия и градиенты космических лучей была получена по данным наземной сети детекторов с момента ее создания. Но для решения обратной задачи требовалось знание формы спектра вариаций, который до настоящего времени задавался только эмпирически. В настоящей работе изучен и экспериментально определен спектр вариаций протонов и ядер гелия на основе прецизионных измерений потоков частиц до жесткостей 60 ГВ за пределами атмосферы на магнитном спектрометре AMS-02, а также установлена трансформация вида этого спектра при переполносовке магнитного поля Солнца. Найденный вид спектра вариаций космических лучей позволит увеличить точность восстанавливаемых параметров спектра вариаций и составит прочную основу для дальнейших исследований модуляционных эффектов в гелиосфере и связанных с ними приложений.

DOI: 10.31857/S002342062106011X

### ВВЕДЕНИЕ

Астрофизика исследует спектры частиц [1] как источник информации об объектах, где произошло их рождение и распространение в зависимости, например, от состава космического излучения. Возможные временные изменения в гелиосфере рассматриваются как искажающий фактор. Солнечно-земная физика [2], напротив, рассматривает спектры частиц на границе гелиосферы как граничные условия и исследует обусловленные деятельностью Солнца временные изменения в гелиосфере. В этом случае удобно рассматривать спектр вариаций, т.е. изменения потока частиц, которые будут определяться модулирующей способностью частиц различной жесткости. Спектр вариаций не зависит от спектра частиц, хотя последний лежит в его основе, поскольку рассматриваются изменения спектра частиц  $J(R)$  относительно базового момента времени  $J_B(R)$ , т.е.

$$\delta J/J = (J - J_B)/J_B. \quad (1)$$

Восстановление спектра вариаций (формы спектра или параметров его аппроксимации) является главной целью при решении обратной задачи по данным сети наземных детекторов космических лучей.

Действительно, обратная задача может быть представлена интегральным уравнением Фред-

гольма 1-го рода, когда наблюдаемые вариации  $v_i = \delta N^i/N^i$  позволяют судить о причинах изменений спектра вариаций  $\delta J/J_B$ , их породивших

$$v^i = \int_{R_c^i}^{\infty} W^i(R) \delta J/J_B dR. \quad (2)$$

Здесь в качестве аппаратной функции интегрального уравнения выступает функция связи  $W^i(R)$  [3, 4] первичных и вторичных вариаций космических лучей для  $i$ -го детектора, а  $R_c^i$  жесткость геомагнитного обрезания. Важной является ситуация, когда аналитическая форма искомого решения  $\delta J/J_B$  известна. В этом случае размерность задачи может быть существенно уменьшена и, как правило, соответствующая система уравнений для нахождения небольшого числа неизвестных параметров оказывается хорошо обусловленной. Существенным преимуществом этого подхода является то, что практически никогда нельзя получить абсурдного решения, если аналитическая модель выбрана в соответствии с исследуемым процессом.

Вид спектра вариаций  $\delta J/J_B$  до настоящего момента определялся только эмпирически. Прямой экспериментальной проверки вида спектра

вариаций, тем более, до жесткостей в несколько десятков ГВ никогда не проводилось, поскольку максимальные жесткости частиц в прямых измерениях в лучшем случае достигали 2 ГВ и, кроме того, отсутствовали продолжительные измерения.

Сегодня решить эту задачу позволяют магнитные спектрометры PAMELA [5], AMS-02 [1] и баллонные стратосферные измерения [6], правда, в последнем случае из-за дискретности пусков возникают сложности с выбором базового периода. Но наиболее точное решение – это прямые измерения в широком диапазоне жесткостей с помощью уникального магнитного спектрометра AMS-02. Для независимой экспериментальной проверки необходимы прецизионные измерения потоков частиц до жесткостей 60 ГВ за пределами атмосферы в диапазоне чувствительности нейтронных мониторов и мюонных телескопов. Такие измерения на протяжении цикла солнечной активности впервые были выполнены на прецизионном магнитном спектрометре AMS-02, по данным которого были получены экспериментальные спектры вариаций космических лучей.

Задача настоящей работы – по экспериментальным данным AMS-02 о спектре протонов и ядер гелия в диапазоне жесткостей от 1 до 60 ГВ и их временных изменениях 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 [7]. Геометрический фактор магнитного спектрометра AMS-02 около  $0.5 \text{ m}^2 \text{ sr}$ , что обеспечивает статистическую точность 1.5%. Данные описаны в работе [8] и доступны в базе данных [9] для 79 каррингтоновских оборотов для широкого диапазона жесткостей 1–60 ГВ. Сравнение временной зависимости потока протонов с результатами анализа наземных измерений для жесткости 10 ГВ можно найти в работе [10].

### МЕТОД GSM И СПЕКТР ВАРИАЦИЙ

Экспериментальные данные об изменениях потока космических лучей за период с середины 50-х гг. 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 при этом наиболее успешно реализованный глобально спектрографический метод (GSM) был создан в работах [11, 12].

В работе [13] был разработан вариант такого метода, специально приспособленный для изучения долговременных вариаций в приближении изотропных вариаций. Анализ проводится по среднемесячным данным ~50 нейтронных мониторов, мюонных телескопов и по данным стратосферного зондирования. В простейшем случае изотропных вариаций задача сводится к решению системы уравнений (1), требующей знания спектра вариаций космических лучей.

В модели используется трехпараметрический вид спектра вариаций:

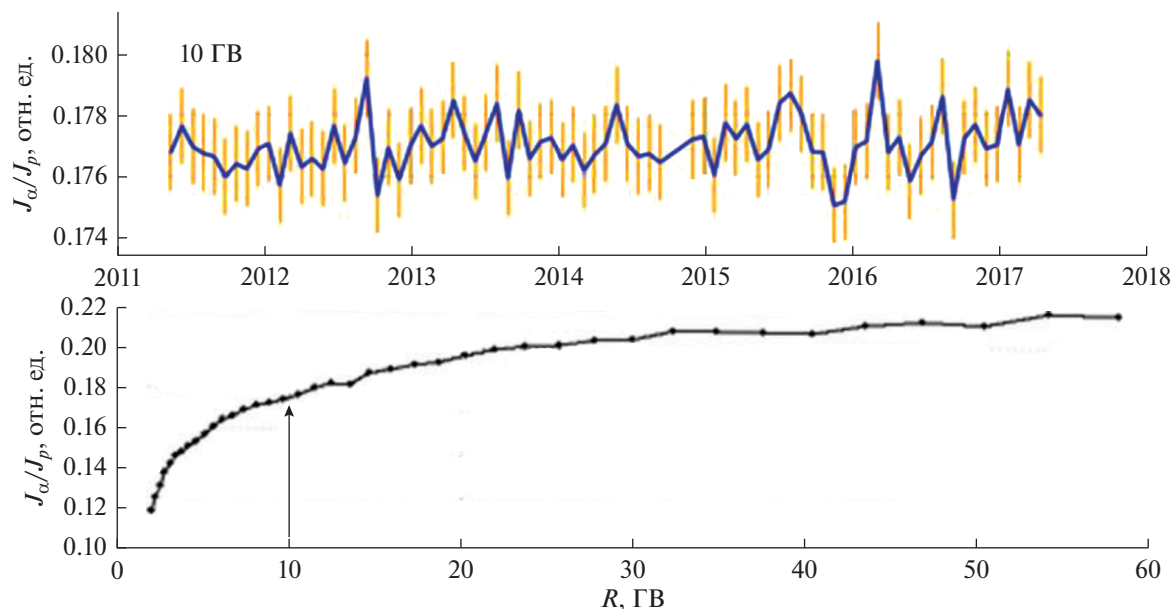
$$\delta J/J_B = a_1(R_L + R)^{-\gamma}, \quad (3)$$

где  $J_B$  относится к базовому периоду. Вид спектра вариаций в форме (3) выбран эмпирически, при этом рассматривались и другие варианты.

Астрофизики рассматривают несколько форм представления спектров частиц. Так в работе [1] для жесткостей, когда существенна солнечная модуляция, спектры частиц различного типа, измеряемых на AMS-02, аппроксимируются степенной функцией с переменным спектральным индексом. Очень удобно однопараметрическое представление спектра, где в качестве параметра используется потенциал модуляции [14, 15]. Эта функция описывает форму спектра частиц с помощью одного (зависящего от времени) параметра потенциала модуляции. Часто, особенно для солнечных космических лучей, привлекается степенной спектр частиц с сильным экспоненциальным затуханием в области верхних энергий [16–18]. Как ниже установлено, именно такой вид спектра (4) наиболее хорошо описывает спектр вариаций в нужном диапазоне жесткостей.

### ОЦЕНКИ СПЕКТРА ВАРИАЦИЙ

В данной работе мы рассматривали спектр вариаций для протонов и ядер гелия. Для жесткости 10 ГВ по данным AMS-02 отношение нуклонов ядер гелия к протонам галактических космических лучей  $\alpha/p = 0.177 \pm 0.001$  за весь рассматриваемый период с мая 2011 по апрель 2017 г. (рис. 1), что соответствует вкладу ядер гелия ~4.5%. По данным AMS-02 получено также некоторое увеличение доли ядер гелия с ростом энергий, например, для временного интервала 11.I–7.II.2014 такая зависимость показана на рис. 1 (нижняя панель). Аналогичная зависимость для отношения  $p/\text{He}$  была ранее получена в эксперименте PAMELA [19]. Вклад ядер гелия важно всегда учитывать, поскольку при анализе GSM используются реальные функции связи, полученные эксперимен-



**Рис. 1.** Временные изменения отношения  $\alpha/p$  для жесткости 10 ГВ/нуклон (верхняя панель) и зависимость отношения  $\alpha/p$  от жесткости частиц для оборота 11.I–7.II.2014 (нижняя панель).

тально в широтных измерениях или расчетным путем с учетом вклада ядер гелия.

Временные зависимости вариаций потока альфа-частиц и протонов показаны на рис. 2, которые, как и следовало ожидать, практически не отличаются. Для сравнения приведены также временные изменения вариаций электронов и протонов. За базовый период взяты пять Каррингтоновских оборотов начала 2017 г. Для протонов и ядер гелия жесткость равна 10.55 ГВ/нуклон, для релятивистских электронов и позитронов временной ход приведен для 10.65 ГэВ. Данные из базы данных [9].

Для ядер гелия и протонов тестировались несколько видов спектров [16–18], но наиболее удачным для аппроксимации экспериментального спектра вариаций в широком диапазоне жесткостей оказался степенной спектр, модулированный экспонентой в области верхних жесткостей, т.е.

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

Результат аппроксимации и параметры аппроксимации  $a_1$ ,  $\gamma$ , и  $R_H$  для двух моментов времени приведены на рис. 3.

Методику оценки спектров вариаций протонов и ядер гелия иллюстрирует рис. 3 для периода отрицательной полярности (слева) и положительной полярности (справа). На верхних панелях сравниваются вариации, найденные GSM и измеренные AMS–02 до и после переполюсовки в 2014 г., а вертикальными отрезками отмечены моменты времени для которых спектры вариаций приведены на нижних панелях. Для каждого слу-

чая показаны параметры аппроксимации спектра вариаций и среднеквадратичная ошибка модели  $\sigma(\%)$ . Вклад [20] солнечных космических лучей SPE и GLE незначителен, но вклад, тем не менее, исключен при формировании потока для требуемых каррингтоновских оборотов авторами данных [7].

Для каждого каррингтоновского оборота определяются изменения спектра частиц  $J$  относительно спектра частиц в базовый период  $J_B$  (январь–апрель 2017 г., горизонтальный отрезок на верхней панели) и вычисляется спектр вариаций, как  $v = (J - J_B)/J_B$ . На средней панели рис. 3 приведен спектр вариаций для протонов, а на нижней панели спектр вариаций для нуклонов гелия (точки и их ошибки определения).

Как отмечалось, наиболее удачным для аппроксимации экспериментального спектра вариаций частиц в широком диапазоне жесткостей оказался степенной спектр, модулированный экспонентой в области верхних жесткостей (4), который линеаризуется логарифмированием.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

К настоящему моменту было проведено несколько исследований по установлению функциональной зависимости спектра модуляции и его трансформации в различные периоды СА и полярности магнитного поля. В первую очередь следует отметить цикл работ [21–23]. Анализ опирался на данные нейтронных мониторов, наблюдения заряженной компоненты в верхней атмосфере и дан-

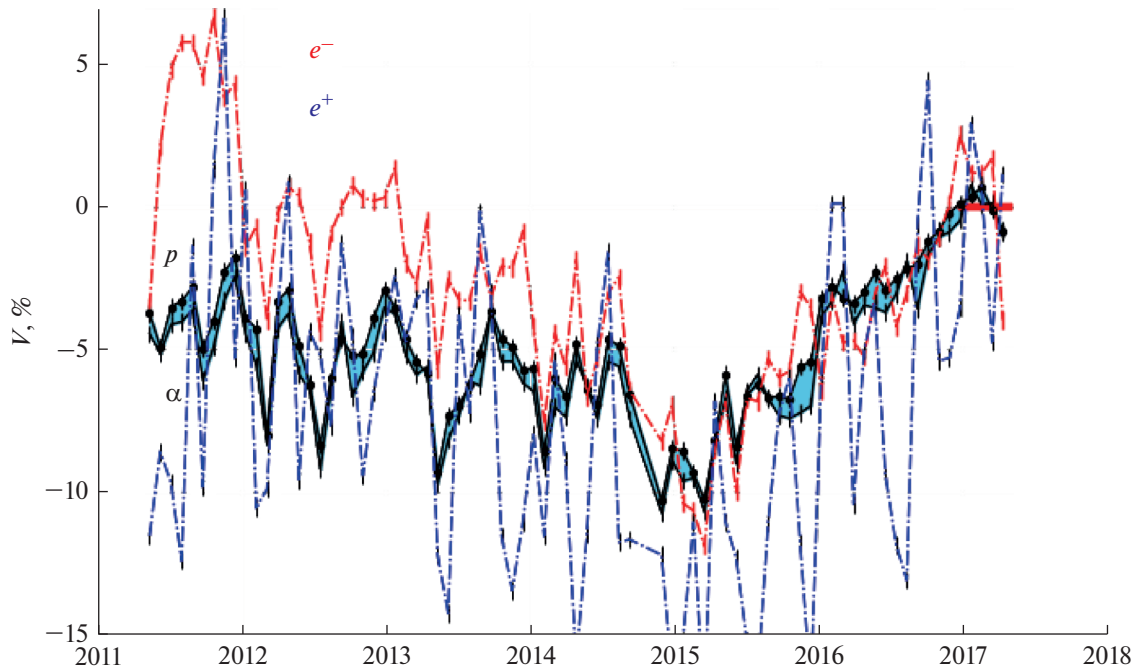


Рис. 2

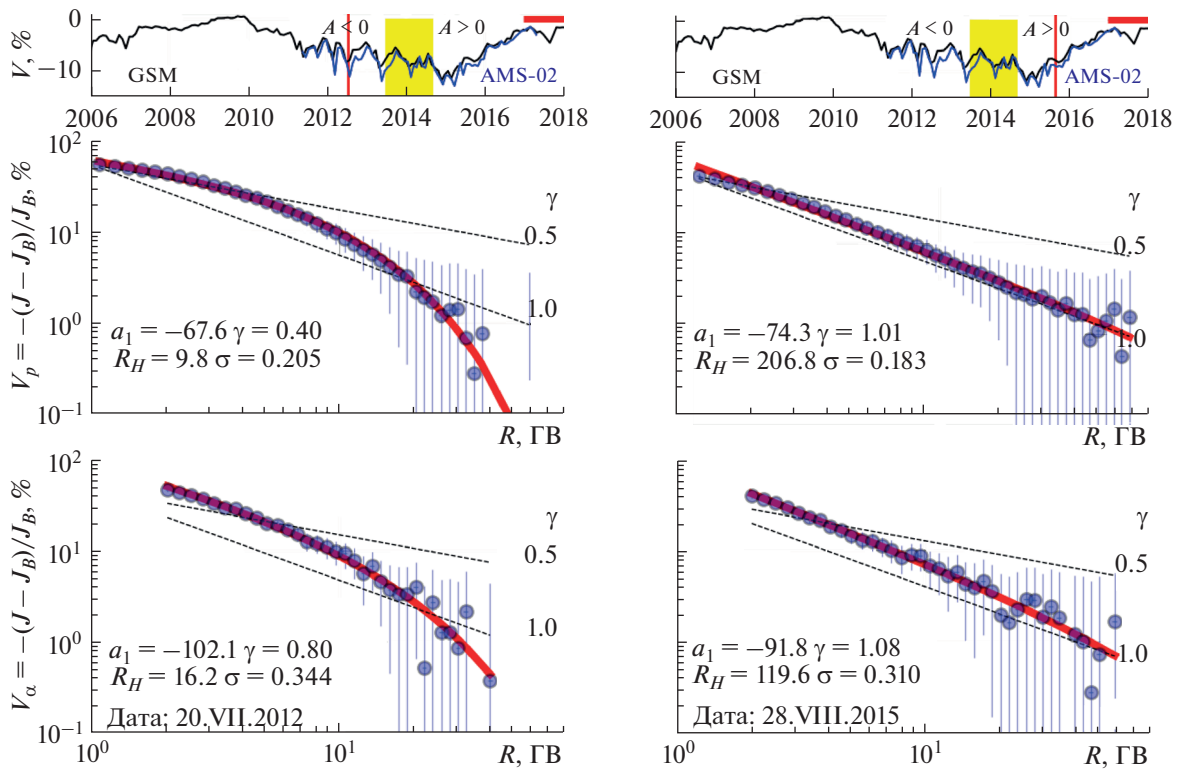


Рис. 3

ные космических аппаратов. В работе [22] в диапазоне 0.6–100 ГВ обсуждается зависимость спектра вариаций от полярности межпланетного поля, но она достаточно слабо выражена. Действительно, для периода 1987–1990 год и  $A < 0$  по-

казатель степенного спектра равен 1.02, а для периода 1977–1981 г. и  $A > 0$  показатель степенного спектра равен 1.22.

В работе [24] обсуждается зависимость спектра вариаций космических лучей от эпохи СА. По

данным сети нейтронных мониторов авторами был установлен степенной вид спектра вариаций с показателем в диапазоне от 0.6 до 1.2 для минимума и максимума солнечной активности, что дает, как нам сегодня представляется, слишком мягкий спектр вариаций. Авторы работы изменения спектра вариаций связывают с турбулентностью межпланетной среды, а не с дрейфовыми эффектами. Они полагают, что ~70–80% амплитуды 11-летних вариаций интенсивности галактических космических лучей обусловлена изменениями турбулентности межпланетного магнитного поля.

Параметры аппроксимации рассматриваемой модели получены для каждого оборота с мая 2011 для протонов и ядер гелия. Установленная форма спектра вариаций (4) принципиально отличается от (3), использованной нами ранее при реализации метода GSM. Причем спектр вариаций (3) подавляет вариации в области нижних жесткостей, а спектр вариаций (4), напротив, — в области верхних жесткостей, чем управляет параметр  $R_H$ . Качество фитирования этими функциями контролировалось среднеквадратичной ошибкой модели, которая приводится для каждого интервала. Отсюда нужно сделать вывод, что с учетом найденного вида спектра вариаций (4) следует пересмотреть результаты GSM для изотропных вариаций.

Важным результатом работы является трансформация вида спектра вариаций в разные периоды полярности межпланетного магнитного поля, причем такая трансформация одинакова для протонов и ядер гелия. В период отрицательной полярности магнитного поля Солнца до переполюсовки 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 начале нового 24-го солнечного цикла параметр  $R_H$  близок к 100 ГВ и спектр вариаций переходит в чисто степенной, что также отмечалось в [21]. На рис. 3 приведены по два случая до и после переполюсовки магнитного поля Солнца. За весь период работы AMS-02 анимацию можно найти на ресурсе [25].

В периоды положительной магнитной полярности, положительно заряженные частицы попадают в гелиосферу из полярных областей, дрейфуют к экватору и уходят из гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя. При дрейфе от полюса к экватору частицы теряют энергию, соответствующую разности потенциалов гелиосферы  $\Phi$ . Так как потенциал гелиосферы  $\Phi$  слабо зависит от возмущенности магнитного поля, в минимуме солнечной активности максимум амплитуды изотропной вариации плоский. Интенсивность вариаций пропорциональна  $\Delta\Phi/R$  [23], 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. То есть наблюдаемый на Земле спектр частиц хорошо коррелирует с уровнем возмущенности магнитного поля, поэтому в минимуме солнечной активности максимум острый. Для высоких энергий пробег  $\lambda \sim p^2$  [26] и показатель  $\gamma \approx 2$ , что также экспериментально наблюдается при жесткости ~10 ГВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За весь рассматриваемый период мониторинга, благодаря своим уникальным возможностям, магнитный спектрометр AMS-02 впервые позволил получить экспериментальный спектр вариаций космических лучей в диапазоне жесткостей ~1–60 ГВ к которым чувствительна наземная сеть нейтронных мониторов и мюонных телескопов. Это, в свою очередь, позволило снять неопределенность в выборе спектра вариаций космических лучей при решении обратной задачи для восстановления его параметров за пределами магнитосферы, поскольку до настоящего момента спектр вариаций космических лучей определялся только эмпирически.

Важно учесть состав космических лучей. По данным AMS-02 за весь период измерений для жесткости 10 ГВ отношение  $\alpha/p$  постоянно и равно  $17.7 \pm 0.1\%$ . Вклад ядер гелия незначительно (~10%) увеличивается с жесткостью для диапазона жесткостей 5–20 ГВ.

Установлена трансформация формы спектра для протонов и ядер гелия. В период отрицательной полярности магнитного поля Солнца и до переполюсовки наблюдается степенной спектр вариаций галактических космических лучей с сильным экспоненциальным затуханием в области верхних жесткостей. При смене полярности, после переполюсовки магнитного поля Солнца, спектр вариаций переходит в чисто степенной спектр.

Найденный вид спектра вариаций космических лучей позволит увеличить точность восстанавливаемых параметров спектра вариаций за пределами магнитосферы по данным сети наземных детекторов и составит прочную основу для дальнейших исследований модуляционных эффектов в гелиосфере, а также связанных с ними приложений.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ “Сеть СКЛ”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aguilar M. et al.* The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years // *Physics Reports*. 2021. V. 894. P. 1–116. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.09.003> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157320303434?via%3Dihub>
2. *Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G.* Contributions from Changes in Various Solar Indices in Cycles 20–23 and 24 to the Modulation of Cosmic Rays // *Bulletin RAS: Physics*. 2017. V. 81. № 2. P. 146–150. <https://doi.org/10.3103/S1062873817020101>
3. *Александрян Т.М., Белов А.В., Янке В.Г. и др.* Экспериментальные исследования геомагнитных эффектов в космических лучах и спектр эффекта возмущения перед магнитными бурями // *Изв. РАН*. 1982. Т. 46. № 9. С. 1689–1691.
4. *Fujimoto K., Murakami K., Kondo I., Nagashima K.* Approximate Formula for Response Function for Cosmic Ray Hard Component at Various Depths of the Atmospheric and Underground // *Proc. of 15th ICRC, Budapest, Hungarian*. 1977. V. 4. P. 321. <http://adsabs.harvard.edu/full/1977ICRC....4..321F>
5. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* (PAMELA Collaboration) Ten years of PAMELA in space // *Riv. Nuovo Cimento*. 2017. V. 40. P. 473. <https://doi.org/10.1393/ncr/i2017-10140-x>
6. Balloons, 2021, Stratospheric balloons. Chronological lists of launches worldwide since 1947. <https://stratocat.com.ar/globos/indexe.html>
7. *Aguilar M. et al.* Observation of Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 051101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.051101>
8. *DiFelice V., Pizzolotto C., D'Urso D. et al.* Looking for cosmic ray data? The ASI Cosmic Ray Database // 35th ICRC. PoS 1073. Korea. 2017. <https://pos.sissa.it/301/1073/pdf>
9. CRDB, 2021. <https://tools.ssd.casi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp> (last accessed July 12, 2021)
10. *Белов А.В., Гущина Р.Т., Шлык Н.С., Янке В.Г.* Сравнение долговременных изменений потока космических лучей по данным сети наземных детекторов PAMELA и AMS-02 // *Изв. РАН*. 2021. Т. 85. № 7. С. 100–104. <https://doi.org/10.1134/S0367676519000000>
11. *Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др.* Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов // *Геомагн. и аэроном.* 1966. Т. 6. № 6. С. 991–996.
12. *Nagashima K.* Three Dimension Anisotropy in Interplanetary Space. Part I. Formulation of Cosmic Ray Daily Variation produced by Axis-Symmetric Anisotropy // *Rep. of Ionosphere and Space Res.* 1971. V. 25. № 3. P. 189.
13. *Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г.* Долговременные вариации космических лучей: Спектр жесткости // *Геомагн. и аэроном.* 1998. Т. 38. № 4. С. 131.
14. *Gleeson L.J., Axford W.I.* Solar modulation of galactic cosmic rays // *ApJ*. 1968. V. 154. P. 1011.
15. *Vainio R., Desorgher L., Heynderickx D. et al.* Dynamics of the Earth's particle radiation environment // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 147. P. 187–231. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9496-7>
16. *Ellison D.C., Ramaty R.* Shock acceleration of electrons and ions in solar flares // *Astrophys. J.* 1985. V. 298. P. 400–408. <https://doi.org/10.1086/163623>
17. *Bruno A., Bazilevskaya G.A., Boezio M. et al.* Solar energetic particle events observed by the Pamela mission // *Astrophys. J.* 2018. V. 862. № 97. arXiv:1807.10183v1. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacc26>
18. *Koldobskiy S., Raukunen O., Vainio R. et al.* New reconstruction of event-integrated spectra (spectral fluences) for major solar energetic particle events // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 647. arXiv:2101.10234v1.
19. *Adriani O. et al.* PAMELA Measurements of Cosmic-ray Proton and Helium Spectra // *Science*. 2011. V. 332. P. 69–72. <https://doi.org/10.1126/science.1199172>
20. *Ишков В.Н.* Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // *Геомагн. и аэроном.* 2018. Т. 58. № 6. С. 785–800. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060056>
21. *Lockwood J.A., Webber W.R.* The 11-year solar modulation of cosmic rays as deduced from NM and direct measurements at low energies // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 5977. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/JZ072i023p05977>
22. *Lockwood J.A., Webber W.R.* Comparison of the rigidity dependence of the 11-year cosmic ray variation at the earth in two solar cycles of opposite magnetic polarity // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № A10. P. 21573–21580. <https://doi.org/10.1029/96JA01821>
23. *Lockwood J.A., Webber W.R.* The long-term variation of the cosmic radiation // *Canadian J. Physics*. 2011. V. 46. № 10. <https://doi.org/10.1139/p68-379>
24. *Alania M.V., Iskra K., Siluszyk M.* New index of longterm variations of galactic cosmic ray intensity // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. № 2. P. 267–274.
25. Variation Spectrum (last accessed July 12, 2021). [http://cosrays.izmiran.ru/dbs/LTV/VariationSpectrum/Animation\\_Spectrum\\_p1/Animation\\_Spectra\\_2017\\_Fast.gif](http://cosrays.izmiran.ru/dbs/LTV/VariationSpectrum/Animation_Spectrum_p1/Animation_Spectra_2017_Fast.gif)
26. *Топтыгин И.Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983.
27. *Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т. и др.* Экспериментальный спектр вариаций космических лучей на орбите земли по данным AMS-02 // *Известия РАН*. 2021. Т. 85. № 9. С. 1350–1353. <https://doi.org/10.31857/S0367676521090349>