

ОСОБЕННОСТИ СПОРАДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ ПЛОТНОСТИ И АНИЗОТРОПИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 24-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

PECULIARITIES OF SPORADIC VARIATIONS IN DENSITY AND ANISOTROPY OF GALACTIC COSMIC RAYS IN SOLAR CYCLE 24

В.Г. Григорьев 

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, grig@ikfia.ysn.ru

С.К. Герасимова 

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru

П.Ю. Гололобов 

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru

С.А. Стародубцев 

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

А.С. Зверев 

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, ZverevAS@ikfia.ysn.ru

V.G. Grigoryev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, grig@ikfia.ysn.ru

S.K. Gerasimova

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru

P.Yu. Gololobov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, gpeter@ikfia.ysn.ru

S.A. Starodubtsev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru

A.S. Zverev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, ZverevAS@ikfia.ysn.ru

Аннотация. На основе обработки данных мировой сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов методом глобальной съемки исследуются вариации плотности и анизотропии галактических космических лучей в периоды форбуш-понижений, наблюдавшихся в 24-м цикле солнечной активности. Одновременное использование двух разнотипных детекторов позволяет рассматривать временную динамику углового распределения космических лучей в двух разных энергетических интервалах. Кроме того, по данным измерений Якутского спектрографа космических лучей им. А.И. Кузьмина проведена оценка показателя энергетического спектра в периоды больших возмущений межпланетной среды в этом цикле. Анализ полученных результатов подтверждает наши ранние утверждения, что 24-й цикл солнечной активности характеризуется повышенным уровнем турбулентности межпланетного магнитного поля.

Ключевые слова: космические лучи, солнечная активность, форбуш-понижения, энергетический спектр.

Abstract. In this work, we have processed data from the global network of neutron monitors and muon telescopes by the global survey method to study variations in the density and anisotropy of galactic cosmic rays during Forbush decreases observed in solar cycle 24. The simultaneous use of two different type detectors made it possible to examine the temporal dynamics of the angular distribution of cosmic rays in two different energy intervals. Besides, we have used measurements of the Yakutsk cosmic ray spectrograph after A.I. Kuzmin to assess the energy spectrum index during large disturbances of the interplanetary medium in this cycle. Analysis of the results obtained confirms our early statements that solar activity cycle 24 features an increased level of turbulence in the interplanetary magnetic field.

Keywords: cosmic rays, solar activity, Forbush decreases, energy spectra.

ВВЕДЕНИЕ

Прошедший 24-й цикл солнечной активности (СА) отличался низким числом солнечных пятен и слабыми проявлениями межпланетных и геомагнитных возмущений по сравнению с предыдущими 19–23 циклами [Базилевская и др., 2021]. Проведенная

нами ранее в работе [Григорьев и др., 2014] оценка энергетического спектра форбуш-понижений (ФП) показала, что на фазе роста 24-го цикла СА наблюдался более мягкий энергетический спектр, чем в течение предыдущего. Это указывало на то, что в отличие от 23-го цикла, в начале 24-го межпланетное магнитное поле (ММП) было более турбулентным

и, следовательно, в образовании ФП в этот период должна преобладать роль диффузионного механизма [Крымский и др., 1981].

В данной работе на основе обработки данных мировой сети нейтронных мониторов (НМ) и мюонных телескопов (МТ) методом глобальной съемки [Altukhov et al., 1970; Nagashima, 1971; Belov et al., 1974; Dvornikov et al., 1983] исследуются вариации плотности и анизотропии галактических космических лучей (КЛ) в периоды ФП, наблюдавшихся в 24-м цикле. Разработанный в ИКФИА СО РАН метод глобальной съемки [Altukhov et al., 1970] позволяет использовать Землю с имеющейся мировой сетью НМ как единый прибор, ориентированный в каждый измеряемый момент во многих направлениях. Нами была проведена модификация этого метода [Gololobov et al., 2021], позволяющая получать информацию о распределении КЛ по данным сети МТ. В работе используются результаты расчетов первого углового момента функции распределения КЛ, полученные на основе обработки данных мировой сети НМ (NMDB) [<https://www.nmdb.eu>] и глобальной сети МТ (GMDN) [<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/Archives/GMDN.php>] за 2012–2017 гг. методом глобальной съемки. Учет траекторий КЛ в геомагнитном поле и их взаимодействия с атмосферой Земли дает возможность теоретической оценки связи первичных вариаций интенсивности КЛ за пределами магнитосферы с интенсивностью, непосредственно регистрируемой наземным детектором. В методе глобальной съемки такая оценка осуществляется путем введения так называемых приемных векторов [Крымский и др., 1981], выражаемых компонентами x_n^m , y_n^m . В этом случае интенсивность КЛ I^j , регистрируемая j -м наземным детектором, будет определяться следующим выражением:

$$I^j = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a_n^m x_n^{m,j} + b_n^m y_n^{m,j}) K_n^j, \quad (1)$$

где a_n^m , b_n^m — компоненты сферических гармоник углового распределения КЛ, K_n^j — нормирующий множитель, необходимый для учета разницы энергетической чувствительности каждого детектора. Поиск a_n^m , b_n^m осуществляется путем решения системы уравнений (1) с привлечением достаточного количества независимых и разнонаправленных наземных детекторов КЛ.

Такой подход с привлечением разнотипных детекторов КЛ позволяет нам одновременно отслеживать временную динамику параметров плотности и анизотропии КЛ в разных энергетических областях. Например, средние энергии КЛ, регистрируемых сетью НМ, составляют порядка 15 ГэВ, в то время как сеть МТ регистрирует КЛ с энергиями порядка 50 ГэВ. В результате применения метода мы получаем параметры анизотропии КЛ, косвенно указывающие на процессы модуляции КЛ в крупномасштабной возмущенной структуре.

Представляют также интерес дальнейшие исследования энергетических спектров ФП с использова-

нием методики, основанной на данных регистрации Якутского спектрографа, оснащенного НМ и подземным комплексом МТ на уровнях 0, 7, 20 и 40 м водного эквивалента (в.э.) [Шафер и др., 1967]. В этой методике рассматриваются отношения ожидаемых и наблюдаемых показаний детекторов, расположенных в одной географической точке, поэтому искажающее влияние различных атмосферных и геомагнитных факторов минимизировано.

Исследование механизма формирования ФП было представлено в работе [Крымский и др., 1981], где предполагалось, что понижение КЛ обусловлено высокой степенью нерегулярности ММП и наличием магнитных неоднородностей в солнечном ветре. Такой механизм назывался диффузионным и приводил к формированию степенного спектра с показателем, равным -1 . В этой же работе были проведены расчеты динамики суточной анизотропии КЛ, ожидаемой от диффузионного механизма формирования ФП. Было показано, что приход возмущенной структуры к Земле должен сопровождаться анизотропным потоком КЛ, направленным от Солнца к Земле и возникающим за счет конвективного выноса КЛ. Поэтому наблюдение в эксперименте анизотропии КЛ с соответствующим направлением в периоды ФП можно считать дополнительным признаком диффузионного механизма формирования ФП.

Данная работа посвящена экспериментальному определению особенностей вариаций плотности и анизотропии галактических КЛ в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра в 24-м цикле солнечной активности по данным наземных детекторов КЛ и расчету энергетического спектра ФП на основе данных регистрации Якутского спектрографа КЛ.

ВАРИАЦИИ ВЕКТОРА СУТОЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ КЛ В ПЕРИОДЫ ФП

В работе рассмотрено десять случаев проявлений значимых ФП (>4 % по амплитуде понижения на НМ Якутского спектрографа КЛ) в 24-м цикле СА: 9 марта 2012 г. (11.2 %), 15 июля 2012 г. (7 %), 15 апреля 2013 г. (4.3 %), 24 июня 2013 г. (4.4 %), 12 сентября 2014 г. (5 %), 23 декабря 2014 г. (6.4 %), 17 марта 2015 г. (4.7 %), 23 июня 2015 г. (8.6 %), 16 июля 2017 г. (6.6 %), 8 сентября 2017 г. (8.0 %). Исследованы следующие периоды: сутки до начала возмущений и три последующих дня после. При определении распределения КЛ методом глобальной съемки в среднем для каждого события были использованы данные около 30 НМ и пяти многонаправленных МТ, регистрирующих КЛ с более чем 50 независимых направлений. Это позволило выделить с достаточной точностью одночасовую динамику изотропной части интенсивности и параметров векторной анизотропии КЛ. Данные каждого детектора КЛ были подвергнуты предварительной обработке с целью учета искажающих факторов аппаратного и атмосферного происхождения.

Проведенный анализ показывает, что в восьми случаях из десяти вариации поведения вектора первой

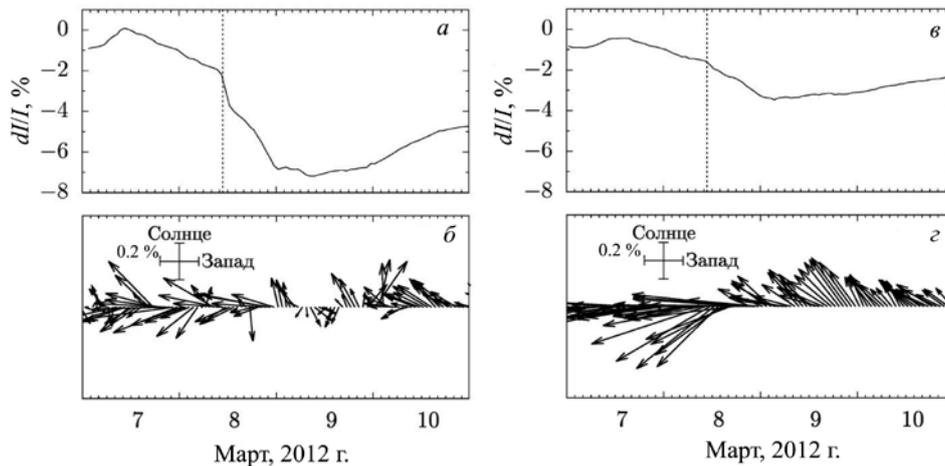


Рис. 1. Изотропные части интенсивности КЛ $dIII$ и поведение векторов суточной вариации анизотропии КЛ \vec{A}_{11} по данным НМ (а, б) и МТ (в, г) в период ФП в марте 2012 г. Вертикальными пунктирными линиями указаны моменты прихода ударной волны, определенные по данным измерений космических аппаратов [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html]

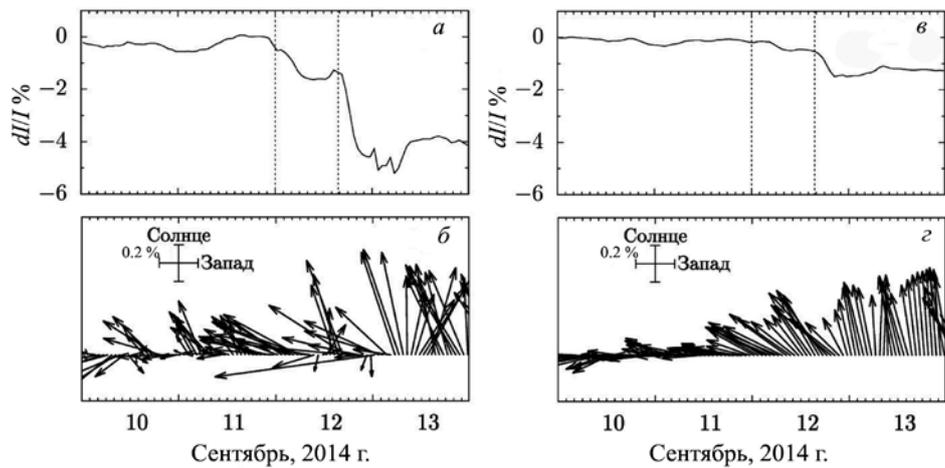


Рис. 2. То же, что на рис. 1 для сентября 2014 г.

гармоники распределения КЛ в периоды ФП согласуются с диффузионным механизмом образования этих возмущений. Азимутальное направление анизотропии КЛ до прихода ударной волны сменяется на радиальное в сторону Солнца, что указывает на повышение турбулентности ММП в 24-м цикле СА по сравнению с предшествующими 22-м и 23-м. Для примера показаны изотропные части интенсивности КЛ и поведение векторов суточной анизотропии \vec{A}_{11} , полученные методом глобальной съемки для случаев ФП, наблюдавшихся в марте 2012 г. (рис. 1) и сентябре 2014 г. (рис. 2).

Из анализа рисунков можно отметить, что поведение вектора \vec{A}_{11} , определенное на основе измерений МТ, заметно устойчивее и стабильнее по величине и направлению, чем при использовании данных НМ. Это обусловлено более низкой чувствительностью КЛ, регистрируемых МТ к мелкомасштабной структуре возмущений солнечного ветра. Но в среднем поведение анизотропии по данным представленных детекторов достаточно согласовано. При этом из-за более жесткого энергетического интервала регистрации частиц, глубина модуляции интенсивности КЛ, регистрируемых МТ в период

возмущений, была намного меньше, чем рассчитанная на основе данных сети НМ.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ФП

Исследования энергетического спектра ФП проводились многими авторами [Кузьмин, 1968; Sakakibara et al., 1987; Despotashvili et al., 1999; Wawrzynczak, Alania, 2011]. Ими была обнаружена и изучена зависимость жесткого (или энергетического) спектра эффектов Форбуша от уровня и фазы СА, а также от знака полярности общего магнитного поля Солнца. При этом общепринятым видом энергетического спектра является степенной с показателем γ [Дорман, 1963; Крымский и др., 1981; Cane, 2000]. Выбор такого вида спектра вызван его простотой и удовлетворительным согласием с экспериментальными данными. По некоторым исследованиям энергетический спектр ФП может иметь более сложную форму. К примеру, в работах [Kojima et al., 2013; Alania, Wawrzynczak, 2012] было отмечено, что спектр ФП по данным НМ может быть более жестким, чем по данным МТ.

Несмотря на это, представляет интерес, с целью дополнения наших ранних работ ([Герасимова и др., 2000; Григорьев и др., 2014]) привлечения данных

Амплитуды ФП по данным НМ и МТ Якутского спектрографа КЛ для выбранных событий.
Указаны соответствующие значения показателя спектра γ и ошибки его определения σ

Дата	$A_{НМ}$, %	$A_{МТ0}$, %	$A_{МТ7}$, %	$A_{МТ20}$, %	$A_{МТ40}$, %	γ	σ
14.04.2013	4.3	1.5	1.2	0.9	0.6	0.79	0.09
15.12.2013	4.7	1.4	1.2	0.8	0.7	0.79	0.10
09.11.2014	3.7	1.2	0.8	0.5	0.3	1.19	0.11
20.12.2014	6.4	2.5	1.8	1.1	0.8	1.01	0.05
16.03.2015	4.7	1.7	1.2	0.7	0.5	1.10	0.08
21.06.2015	8.6	3.8	2.6	1.7	1.0	1.07	0.04
30.12.2015	4.7	1.5	1.2	0.9	0.7	0.79	0.10
16.07.2017	6.6	2.2	1.6	1.0	0.6	1.06	0.06
08.09.2017	8.0	3.5	2.0	1.3	1.0	1.24	0.04

НМ и подземных МТ Якутского спектрографа, для определения показателя γ при предполагаемом степенном спектре эффектов Форбуша. Если ожидаемый спектр форбуш-понижения представить в виде простой степенной функции $a_0 E^{-\gamma}$, где a_0 — некоторая неизвестная постоянная, $E^{-\gamma}$ — энергетический спектр, его амплитуда A (или изменения интенсивности КЛ $\delta I/I$, наблюдаемые некоторым прибором) определяется выражением

$$A = \frac{\delta I}{I} = \int_{E_{\min}}^{\infty} a_0 E^{-\gamma} W(E) dE.$$

Здесь E_{\min} — минимальная энергия, которую способен зарегистрировать данный прибор; $W(E)$ — коэффициенты связи [Дорман, 1963].

Ранее в работе [Герасимова и др., 2000] по данным регистрации интенсивности КЛ на станциях мировой сети НМ и МТ Якутского спектрографа был исследован энергетический спектр ФП, наблюдавшихся в 1965–1994 гг. Была показана зависимость показателя γ энергетического спектра ФП от фазы солнечного цикла и установлена значимая корреляционная связь с уровнем турбулентности ММП. При этом отмечается, что изменение уровня турбулентности ММП может быть одним из основных факторов, определяющих динамику энергетического спектра ФП. Позже в работах [Григорьев, Стародубцев, 2011; Григорьев и др., 2014] рассмотренный период был расширен до 2012 г. и охватывал фазу роста 24-го цикла СА. По данным измерений Якутского спектрографа КЛ, согласно вышеуказанной методике, проведены дальнейшие оценки показателя энергетического спектра γ ФП, наблюдавшихся в 24-м цикле. Рассмотренный период характеризуется низким уровнем СА и малым числом ФП, которые экспериментально наблюдались на всех уровнях регистрации спектрографа. При этом отбирались те события, которые проявились в данных всех уровней подземного комплекса МТ (7, 20 и 40 м в.э.), что в вышеуказанной используемой методике является критерием отбора событий, обеспечивающих наиболее точную оценку показателя спектра. В таблице приведены даты, амплитуды и показатель энергетического спектра для девяти ФП, которые наблюдались в 24-м цикле СА и отвечали вышеуказанному критерию, за исключением тех событий, которые были проанализированы нами ранее.

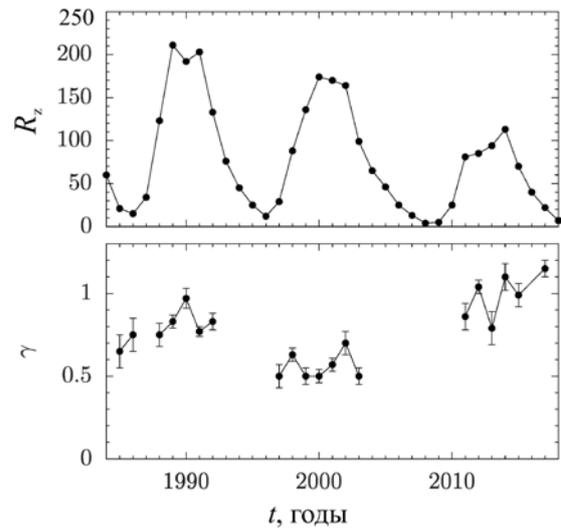


Рис. 3. Числа солнечных пятен R_z и среднегодовые значения показателя γ степенного энергетического спектра ФП за 1985–2017 гг.

Из таблицы видно, что амплитуда на уровне 40 м в.э. в основном сопоставима с величиной статистической ошибки наблюдений ($\sim 0.4\%$).

На рис. 3 показаны ранее определенные нами среднегодовые значения показателя энергетического спектра γ за 1985–2012 гг. [Григорьев, Стародубцев, 2011; Григорьев и др., 2014] и вновь рассчитанные за 2013–2015 и 2017 гг. Видно, что в 24-м цикле наблюдался более мягкий энергетический спектр ФП, чем в 22-м–23-м. Такое смягчение энергетического спектра ФП в 24-м цикле свидетельствует о доминирующей роли диффузионного механизма формирования ФП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные спорадические вариации плотности и анизотропии галактических КЛ по результатам метода глобальной съемки и данных наземных измерений в 24-м цикле позволяют утверждать, что в формировании ФП преобладала роль диффузионного механизма, что свидетельствует о повышенной турбулентности ММП по сравнению с предыдущими циклами. Это подтверждается также оценками показателя энергетического спектра этих вариаций, проведенными по данным измерений приборов Якутского спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина.

Работа была выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № АААА-А21-121011890014-0 с использованием оборудования уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей». Авторы благодарны за предоставленные данные NMDB [www.nmdb.eu] при поддержке программы Европейского союза FP7 (контракт № 213007) и мировой сети данных мюонных детекторов GMDN [<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И., Власова Н.А. Характерные особенности солнечных космических лучей в 21–24-м циклах солнечной активности по данным каталогов солнечных протонных событий. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61, № 3. С. 8–15. DOI: [10.31857/S0016794021010028](https://doi.org/10.31857/S0016794021010028).
- Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Кривошапкин П.А. и др. Изменение жесткого спектра форбуш-понижений с циклами солнечной активности. *Астрономический вестник*. 2000. Т. 34, № 3. С. 283–285.
- Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Временные изменения энергетического спектра форбуш-понижений в 20–23 циклах солнечной активности. *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2011. Т. 75, № 6. С. 850–853.
- Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Исаков Д.Д. Энергетический спектр форбуш-понижений на фазе роста 24-го цикла солнечной активности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54, № 3. С. 304–309. DOI: [10.7868/S0016794014030067](https://doi.org/10.7868/S0016794014030067).
- Дорман Л.И. *Вариации космических лучей и исследование космоса*. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 1028 с.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. *Космические лучи и солнечный ветер*. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.
- Кузьмин А.И. *Вариации космических лучей и солнечная активность*. М.: Наука, 1968. 157 с.
- Шафер Г.В., Кузьмин А.И., Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А. Основные характеристики форбуш-спадов в период минимума солнечной активности. *Изв. АН СССР. Сер. физическая*. 1967. Т. 31, № 8. С. 1319–1321.
- Alania M.V., Wawrzynczak A. Energy dependence of the rigidity spectrum of Forbush decrease of galactic cosmic ray intensity. *Adv. Space Res.* 2012. Vol. 50. P. 725–730.
- Altukhov A.M., Krymsky G.F., Kuzmin A.I. The method of “global survey” for investigating cosmic ray modulation. *Proc. 11th International Conference on Cosmic Rays*. Budapest, 1970. Vol. 4. P. 457–460.
- Belov A.V., Blokh Ya.L., Dorman L.I., et al. Anisotropy and time dependent changes in the spectrum of cosmic-ray intensity variations during August, 1972. *Izv. AN SSSR. Ser. fiz.* [Bull. Academy of Sciences of USSR. Physics]. 1974. Vol. 38. P. 1867–1875.
- Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decrease. *Space Sci. Rev.* 2000. Vol. 93. P. 55–77.
- Despotashvili M.A., Nachkebia N.A., Shatashvili L.Kh. The energetic spectrum changes of Forbush effects during the different 11-year cycles of solar activity. *Proc. 26th International Conference on Cosmic Rays*. Salt Lake City, 1999. Vol. 6. P. 419–422.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. Analysis of cosmic ray pitch-angle anisotropy during the Forbush-effect in June 1972 by the method of spectrographic global survey. *Proc. 18th International Conference on Cosmic Rays*. Bangalore, 1983. Vol. 3. P. 249–252.
- Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., et al. Method of global survey involving data of muon telescope network. *Astroparticle Phys.* 2021. Vol. 131. P. 102586. DOI: [10.1016/j.astropartphys.2021.102586](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2021.102586).
- Kojima H., Shibata S., Oshima A., Hayashi Y. Rigidity dependence of Forbush decrease. *Proc. 33rd International Conference on Cosmic Rays*. Rio de Janeiro, 2013. 135187.
- Nagashima K. Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space. *Rep. Ionosphere Space Res.* 1971. Vol. 25. P. 189–211.
- Sakakibara S., Munakata K., Nagashima K. Rigidity spectrum of Forbush decrease. *Proc. 20th International Conference on Cosmic Rays*. Moscow, 1987. Vol. 4. P. 67–70.
- Wawrzynczak A., Alania M.V. Energy dependence of the rigidity spectrum of Forbush decrease of galactic cosmic ray intensity. *Proc. 32nd International Conference on Cosmic Rays*. Beijing, 2011. Vol. 10. P. 288–291.
- URL: <https://www.nmdb.eu> (дата обращения 10 августа 2021 г.).
- URL: <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/Archives/GMDN.php> (дата обращения 10 августа 2021 г.).
- URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 10 августа 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Григорьев В.Г., Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А., Зверев А.С. Особенности спорадических вариаций плотности и анизотропии галактических космических лучей в 24-м цикле солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 34–38. DOI: [10.12737/szf-81202204](https://doi.org/10.12737/szf-81202204).