

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 524.1-352

ЖЕСТКОСТНЫЕ СПЕКТРЫ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ В 24 И 25 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2025 г. П. А. Сухова^а, И. И. Астапов^{а, *}, Н. С. Барбашина^а,
П. С. Кузьменкова^{а, **}, И. А. Лагойда^а, Ю. Н. Мишутина^а, В. В. Шутенко^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: IIAstapov@mephi.ru

**E-mail: PSKuzmenkova@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.09.2024 г.

После доработки 04.10.2024 г.

Принята к публикации 07.10.2024 г.

В работе представлены результаты анализа жесткостного спектра форбуш-понижений, наблюдаемых в 24–25 циклах солнечной активности. В качестве информации о вариациях космических лучей использовались данные мюонного годоскопа УРАГАН и московского нейтронного монитора, обработанные методом медианных жесткостей. Приводится зависимость показателя жесткостного спектра форбуш-понижений от фазы цикла солнечной активности и полярности общего магнитного поля Солнца.

Ключевые слова: космические лучи, мюонные детекторы, функции связи, показатель спектра

DOI: 10.56304/S2079562925020058

ВВЕДЕНИЕ

Различные солнечные события, такие как корональные выбросы масс, высокоскоростные потоки из корональных дыр влияют не только на состояние межпланетного магнитного поля, но и на поток космических лучей [1]. Резкое понижение интенсивности космического излучения, вызванное возмущениями межпланетного магнитного поля, называют форбуш-понижениями (ФП), или форбуш-эффектами. Отдельный интерес для развития методов прогноза космической погоды представляет связь параметров межпланетной среды или солнечных событий с характеристиками форбуш-понижений [2]. С точки зрения фундаментальных представлений о механизмах формирования форбуш-эффектов и их связи с гелиофизическими эффектами важно исследование жесткостных спектров.

Жесткостной спектр форбуш-понижений обычно полагают степенным [3]. Это предположение лежит в основе анализа как данных спутниковых экспериментов [4], так и наземных детекторов с помощью функций связи [5]. Нейтронные мониторы, образующие мировую сеть, являются стандартными инструментами, для которых разработан ряд методов для определения показателя спектра вариаций. Расчеты проводятся с помощью метода глобальной съемки для сети нейтронных мониторов [6], вычисления амплитудных коэффи-

циентов [7], метода эффективных [8] и медианных [9] энергий.

Мюонные телескопы и годоскопы чувствительны к более высоким первичным энергиям, что существенно расширяет возможности анализа вариаций космических лучей внеземного происхождения по данным наземных детекторов. В частности, установки, регистрирующие частицы в широком диапазоне зенитных углов, позволяют исследовать жесткостные характеристики вариаций космических лучей даже с использованием одного детектора. К таким установкам относится мюонный годоскоп УРАГАН [10], регистрирующий космические лучи в диапазоне зенитных углов от 0° до 84° с точностью ~1°. Для анализа доступен массив экспериментальных данных с 2006 года: полный 24-й цикл солнечной активности, а также фазы спада 23-го и роста 25-го циклов.

Результаты исследования динамики показателя спектра форбуш-понижений на фазах падения, минимума и восстановления по данным мюонного годоскопа УРАГАН с 2006 по 2018 год опубликованы в работах [11, 12]. В [13] обсуждаются особенности жесткостного спектра в зависимости от типа солнечного события, инициировавшего форбуш-понижение. Во всех упомянутых работах используется скорость счета установки в пяти диапазонах зенитных углов с примерно одинаковой статистикой: 0°–17°, 17°–26°, 26°–34°, 34°–44°, 44° и более. Для анализа используются скорости

Таблица 1. Медианные жесткости мюонного годоскопа УРАГАН

Диапазон	0–17°	17–26°	26–34°	34–44°	>44°
R_M , ГВ	46 ± 1	49 ± 1	54 ± 1	62 ± 1	83 ± 1

счета с атмосферной коррекцией методом барометрических и дифференциальных температурных коэффициентов [14]. Чтобы определить показатель спектра, строится зависимость амплитуды форбуш-понижения в пяти зенитно-угловых интервалах от среднелогарифмической энергии и аппроксимируется степенной функцией. Среднелогарифмические энергии рассчитаны с помощью функции связи [15], учитывающей только первичные протоны и использующей степенную модель спектра первичных космических лучей.

В настоящей работе по данным мюонного годоскопа УРАГАН и Московского нейтронного монитора выполнен анализ жесткостных характеристик форбуш-эффектов, наблюдаемых в 24-м и 25-м циклах солнечной активности. Мы используем новую функцию связи мюонного годоскопа УРАГАН, определенную с учетом вклада гелия и более тяжелых ядер, а также прямых измерений спектра первичного излучения.

МЕТОД МЕДИАННЫХ ЖЕСТКОСТЕЙ

Амплитуда форбуш-понижений, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН часто сравнима с солнечно-суточной анизотропией [16], и в исключительно редких случаях может достигать 4–6%. Поскольку величина вариаций невелика, критически важен корректный выбор базового уровня для определения амплитуды форбуш-эффекта. Можно выделить два подхода к выбору базового уровня: на основе анализа скорости счета детектора, либо параметров межпланетной среды. В опубликованных ранее работах при анализе форбуш-эффектов по данным мюонного годоскопа УРАГАН использовался алгоритм по сглаживающему тренду скорости счета [17], который, однако, имеет ряд ограничений при анализе так называемых “каскадных” событий, событий с малыми временами восстановления.

В рамках данного исследования в качестве базового периода выбиралась средняя скорость счета за ближайшие к событию спокойные сутки, когда влияние атмосферных, магнитосферных и аппаратных вариаций незначительно. Предполагается, что таковыми являются сутки, солнечно-суточную анизотропию которых можно корректно описать двумя гармониками ряда Фурье. Подробное описание алгоритма отбора приведено в работах [16, 18]. Описанный алгоритм выбора базового периода не используется для “каскадных” форбуш-эффек-

тов, связанных с совокупным влиянием нескольких солнечных событий, происходящих с промежутком в несколько часов или дней. В таких случаях определение спокойных суток для последующих ступеней каскада невозможно, так как остается влияние возмущенного ранее межпланетного магнитного поля. Поэтому в качестве базового уровня для обработки второй и последующих ступеней каскада выбирается значение интенсивности потока космических лучей, соответствующее окончанию предыдущего падения.

Для определения жесткостного спектра форбуш-понижений мы использовали метод медианных жесткостей [19]. Медианную жесткость можно определить с помощью функции связи детектора согласно выражению:

$$\int_{R_c}^{R_M} W(R) dR = \int_{R_M}^{\infty} W(R) dR,$$

где R_c — жесткость геомагнитного обрезания, R_M — медианная жесткость, $W(R)$ — функция связи.

В анализе использовались часовые данные мюонного годоскопа УРАГАН в пяти диапазонах зенитных углов, скорректированные на температурный и барометрический эффекты, а также данные московского нейтронного монитора с барометрической поправкой. Медианные жесткости для мюонного годоскопа УРАГАН (табл. 1) определены с помощью новой функции связи, вычисленной с учетом реального спектра первичного излучения, а также вклада гелия и более тяжелых ядер. Медианная жесткость московского нейтронного монитора определялась по формуле, предложенной в работе [20] и составила 18 ГВ. Предполагается, что модуляция космических лучей во время форбуш-понижения описывается степенным законом $\delta J(R, T)/J(R) \sim R^{-\gamma}$. Тогда для определения показателя спектра вариаций космических лучей можно построить зависимость амплитуды форбуш-эффекта, наблюдаемого на различных детекторах или в различных диапазонах зенитных углов, от медианной жесткости. Показатель спектра γ , определенный как параметр аппроксимирующей функции, является искомой характеристикой жесткостного спектра форбуш-эффекта. Динамика показателя спектра ФП на примере события от 4 ноября 2021 г. приведена на рис. 1. Можно заметить, что на начальном этапе понижения жесткостной спектр мягкий, на фазе падения становится более жестким, а в минимуме ФП показатель спектра принимает наименьшее значение, после чего наблюдается смягчение.

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЯ ЖЕСТКОСТНОГО СПЕКТРА

Для исследования жесткостного спектра форбуш-понижений сформирован каталог событий,

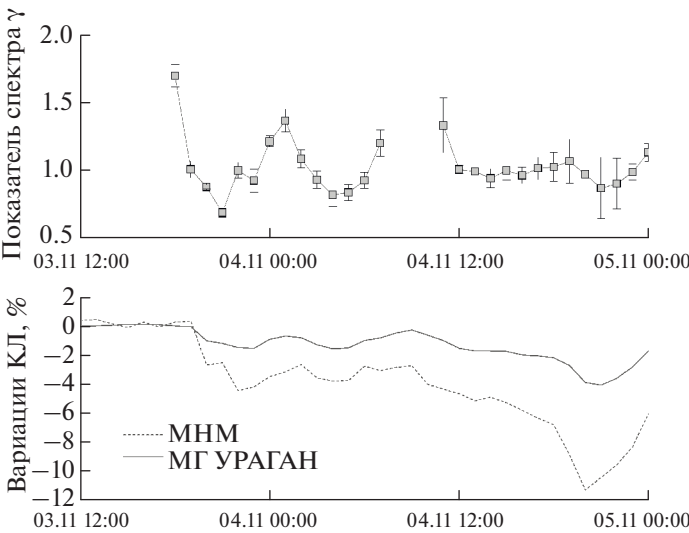


Рис. 1. Динамика показателя спектра форбуш-понижения от 4 ноября 2021 г. в главной фазе (верхняя панель) и вариации космических лучей по данным московского нейтронного монитора и мюонного годоскопа УРАГАН (нижняя панель).

наблюдаемых в 24-м цикле солнечной активности и на фазе роста 25-го солнечного цикла. В выборку включались форбуш-эффекты, имеющие амплитуду более 1% по интегральной скорости счета мюонного годоскопа УРАГАН. Таким образом, методом медианных жесткостей обработано 28 событий в 24-цикле и 32 события в 25-м цикле. Статистический анализ выполнялся для фазы падения – интервала времени от начала события до момента минимального значения интенсивности, а также фазы минимума.

В табл. 2 приведены средневзвешенные значения показателя спектра ФП для фазы падения, рассчитанные только по данным мюонного годоскопа, а также с привлечением данных московского нейтронного монитора. Мы используем усредненные значения, поскольку погрешность определения показателя спектра для отдельных событий может быть велика.

Анализируя полученные результаты, отметим, что в жесткостном диапазоне от 46 до 83 ГВ, соответствующем медианным энергиям мюонного годоскопа УРАГАН, форбуш-понижения характеризуются мягким спектром с показателем, примерно равным 1. При этом отсутствует зависимость показателя спектра от солнечной активности. Полученный результат соответствует проведенным ранее расчетам в рамках анализа жесткостных характеристик форбуш-эффектов исключительно по данным мюонного годоскопа [12].

При выполнении анализа в более широком диапазоне жесткостей (от 18 до 83 ГВ) с использованием данных московского нейтронного монитора значения показателя спектра оказываются меньше, что может свидетельствовать о кусочно-степенной зависимости амплитуды форбуш-понижения от жесткости. Также обнаруживается зависимость показателя спектра от солнечной активности.

Таблица 2. Показатель спектра форбуш-эффекта

Цикл СА	Полярность ОМП	Данные	Фаза падения ФП
24, фаза роста	A < 0	МГ УРАГАН	1.06 ± 0.06
		МГ УРАГАН и МНМ	0.91 ± 0.06
24, фаза спада	A > 0	МГ УРАГАН	0.92 ± 0.10
		МГ УРАГАН и МНМ	0.60 ± 0.07
25, фаза роста	A > 0	МГ УРАГАН	1.07 ± 0.05
		МГ УРАГАН и МНМ	0.65 ± 0.05

Согласно современным представлениям [6], в периоды низкой солнечной активности спектры форбуш-понижений являются более жесткими, чем в максимальной фазе. Отмечается, что для фазы спада характерны мягкие спектры, хотя также существует зависимость от полярности общего магнитного поля (ОМП) Солнца. Так, спектры форбуш-понижений, наблюдаемые на фазе роста, при отрицательной полярности мягче, чем при положительной. На фазе спада солнечной активности зависимость обратна: наблюдаемые при отрицательной полярности форбуш-эффекты имеют более жесткий спектр, чем при положительной.

Сравнивая фазы роста 24-го и 25-го циклов, которым соответствуют периоды отрицательной и положительной полярности ОМП, мы наблюдаем более мягкие спектры в 24-м цикле, что согласуется с результатами ранних работ. Как ожидалось, фаза роста 25-го цикла характеризуется меньшими показателями спектра.

В 24-м цикле более мягкий спектр наблюдается на фазе роста, хотя ожидается обратная зависимость. При этом 24-й цикл соответствует эпохе пониженной солнечной активности [21], в результате чего вблизи минимума 2019 г. спектры ФП могли стать более жесткими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведен анализ жесткостного спектра форбуш-понижений, наблюдаемых в 24-м и на фазе роста 25-го цикла солнечной активности. В анализируемую выборку включались форбуш-эффекты, имеющие амплитуду более 1% по интегральной скорости счета мюонного годоскопа УРАГАН. Анализ выполнялся для фазы падения форбуш-эффекта. В качестве информации о вариациях космических лучей мы использовали скорости счета мюонного годоскопа УРАГАН в пяти диапазонах зенитных углов с приблизительно равной статистикой, а также данные московского нейтронного монитора. Обработка данных осуществлялась методом медианных жесткостей. Медианные жесткости мюонного годоскопа УРАГАН рассчитаны с помощью новой функции связи, учитывающей форму реального спектра первичных космических лучей, а также вклад более тяжелых ядер.

При сравнении расчетов, выполненных только по данным мюонного годоскопа, с результатами совместного анализа с московским нейтронным монитором можно выдвинуть предположение о кусочно-степенной зависимости амплитуды форбуш-понижения от жесткости. Фаза роста 24-го цикла солнечной активности характеризуется более мягкими спектрами, чем фаза роста 25-го цикла. Это связано с зависимостью от полярности общего магнитного поля Солнца. Фаза спада 24-го цикла

характеризуется достаточно жестким (показатель 0.60 ± 0.07) спектром, что может быть связано с пониженной солнечной активностью и максимальной за анализируемый период интенсивностью космического излучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

При поддержке Российского научного фонда (проект “Исследование периодических и спорадических вариаций космических лучей на базе данных спутниковых и наземных экспериментов”, проект № 20-72-10170) разработана методика определения жесткостных характеристик форбуш-эффектов, а также выполнен анализ событий, наблюдаемых в 24-м цикле солнечной активности.

Составление каталога форбуш-понижений, наблюдаемых в 25-м цикле солнечной активности, а также исследование их спектров выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект “Исследование форбуш-эффектов на фазе роста солнечной активности 25 солнечного цикла методом мюонографий”, № FSWU-2023–0086).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Ole-neva V.A., and Yanke V.G. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **511**, 5897 (2022). <https://doi.org/10.1093/mnras/stac478>
2. Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V. and Abunin A.A. Sol Phys **282**, 175 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0127-1>
3. Cane H.V. Space Science Reviews **93**, 55 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1026532125747>
4. Lagoida I.A., Voronov S.A., Mikhailov V.V., Boezio M., et al. Sol Phys **298**, 9 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11207-022-02097-z>
5. Dorman L.I. *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2004). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2113-8>
6. Klyueva A.I., Belov A.V., and Eroshenko E.A. Geomagn. Aeron. **57**, 177 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0016793217020050>
7. Livada M. and Mavromichalaki H. Sol Phys **295**, 115 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01679-z>
8. Koldobskiy A., Kovaltsov G.A., and I. Usoskin G. Sol Phys **293**, 110 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1326-1>
9. Ahluwalia H.S. and Fikani M.M. J. Geophys. Res. **112**, 2006JA011958 (2007). <https://doi.org/10.1029/2006JA011958>
10. Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Mannocchi G., et al. Instrum Exp Tech **51**, 180 (2008). <https://doi.org/10.1134/S002044120802005X>
11. Barbashina N.S., Astapov I.I., Borog V.V., Dmitrieva A.N., et al. J. Phys.: Conf. Ser. **409**, 012189 (2013). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012189>

12. Kovylyayeva A.A., Astapov I.I., Barbashina N.S., Borog V.V., et al. *Phys. Atom. Nuclei* **82**, 892 (2019).
<https://doi.org/10.1134/S1063778819660323>
13. Yakovleva E.I., Astapov I.I., Barbashina N.S., Dmitrieva A.N., et al. *Physics Procedia* **74**, 470 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.234>
14. Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., and Timashkov D.A. *Astroparticle Physics* **34**, 401 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2010.10.013>
15. Yakovleva E.I., Bogdanov A.G., Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., and Timashkov D.A. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **73**, 357 (2009).
<https://doi.org/10.3103/S106287380903023X>
16. Kuzmenkova P.S., Astapov I.I., Abunina M.A., and Belov A.V. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **87**, 1086 (2023).
<https://doi.org/10.3103/S1062873823702489>
17. Barbashina N.S., Dmitrieva A.N., Kompaniets K.G., Petrukhin A.A., Timashkov D.A., Shutenko V.V., Yakovleva E.I., and Yashin I.I. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **73**, 343 (2009).
<https://doi.org/10.3103/S1062873809030198>
18. Belov A.V., Shlyk N.S., Abunina M.A., Abunin A.A., Ole-neva V.A., Yanke V.G., and Melkumyan A.A. *Geomagn. Aeron.* **63**, 268 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S0016793222600837>
19. Lockwood J.A., Webber W.R., and Debrunner H. J. *Geophys. Res.* **96**, 5447 (1991).
<https://doi.org/10.1029/91JA00089>
20. Usoskin I.G., Braun I., Gladysheva O.G., Hörandel J.R., Jämsén T., Kovaltsov G.A., and Starodubtsev S.A. *J. Geophys. Res.* **113**, 2007JA012955 (2008).
<https://doi.org/10.1029/2007JA012955>
21. Ishkov V.N. *Cosmic Res* **58**, 436 (2020).
<https://doi.org/10.1134/S0010952520060064>

Rigidity Spectrum of Forbush Effects Observed during Solar Cycles 24 and 25

P. A. Sukhova¹, I. I. Astapov^{1, *}, N. S. Barbashina¹, P. S. Kuzmenkova^{1, **},
I. A. Lagoida¹, Yu. N. Mishutina¹, and V. V. Shutenko¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*e-mail: IIAstapov@mephi.ru

**e-mail: PSKuzmenkova@mephi.ru

Received September 19, 2024; revised October 4, 2024; accepted October 7, 2024

Abstract—The work presents an analysis of the rigidity spectrum of Forbush decreases observed over 24–25 solar cycles. The URAGAN muon hodoscope and Moscow neutron monitor data were used as information on cosmic ray variations. To determine the rigidity spectrum of Forbush decreases, the median rigidity method was utilized. The dependence of the spectrum index on the phase of solar activity and the polarity of the general magnetic field of the Sun is discussed.

Keywords: cosmic rays, muon detectors, coupling function, spectrum index