

УДК 524.1

АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТНЫХ СПЕКТРОВ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОКТЯБРЕ 2012 г.

© 2021 г. А. А. Луковникова*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: luk@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

По данным наземных и спутниковых наблюдений космических лучей на мировой сети станций нейтронных мониторов методом спектрографической глобальной съемки исследованы Форбуш-эффекты в октябре 2012 г. Получены жесткостные спектры вариаций первичных космических лучей на орбите Земли. Приведены показатели спектров вариаций космических лучей в отдельные периоды исследуемого события.

DOI: 10.31857/S0367676521110211

ВВЕДЕНИЕ

В течение 24-го цикла солнечной активности (СА) наблюдались аномалии в гелиосфере и на Солнце, например, ослабление солнечных магнитных полей, что подтверждается различными наблюдениями. Из-за этих аномалий данный цикл отличался необычно слабой модуляцией космических лучей (КЛ) на фазах роста и максимума СА [1].

Во время исследуемого периода наблюдался низкий уровень солнечной активности [2–4]. Число групп пятен на видимом диске Солнца менялось от 3 до 9. Вспышечная активность отмечена на среднем уровне 8–10 октября, на высоком – 20, 22 и 23 октября, когда в выходящей на видимый диск Солнца группе пятен Южного полушария произошли три мощные вспышки рентгеновского балла M9, M5 и X1.8. На средних широтах Земли возникли две магнитные бури, и четверо суток сохранялась возмущенная геомагнитная обстановка. На геостационарных орбитах 9–26 октября был отмечен очень высокий поток релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ. В октябре 2012 г. максимальные значения модуля межпланетного магнитного поля (ММП) были ~20 нТл, скорости солнечного ветра (СВ) ~600 км/с и $D_{st} = -130$ нТл. В течение октября 2012 г. по наземным наблюдениям на мировой сети станций КЛ было зафиксировано 10 Форбуш-эффектов [5] с различными амплитудами. На полярных станциях КЛ амплитуды модуляций доходили до ~–6.5%, на среднеширотных до ~–4%, на низкоширотных до ~–3%.

Целью данной работы является получение жесткостных спектров вариаций первичных КЛ на орбите Земли и спектральных индексов галактического спектра КЛ в периоды Форбуш-эффектов в октябре 2012 г.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Для анализа использовались усредненные часовые данные наземных измерений на мировой сети нейтронных мониторов (42 станции) [6, 7], а также данные спутника GOES-13 [8]. Методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [9–11] исследовались Форбуш-эффекты в октябре 2012 г. (период на фазе роста в 24-м цикле СА). Амплитуды модуляций отсчитывались от фонового уровня 05 октября 2012 года. В этот период электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными: магнитных бурь не наблюдалось, вспышек класса C и выше на Солнце не было, D_{st} -индекс был ~0 нТл. По данным наземных наблюдений космических лучей на мировой сети станций, используемой как единый многоканальный прибор, методом СГС возможно исследовать вариации жесткостного спектра, анизотропии и изменения жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений [12]. Выражение для жесткостного спектра КЛ получено в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [13, 14]. Жесткостный дифференциальный спектр КЛ в широком диапазоне энергий описывается выражением:

$$J(R) = A \frac{(\epsilon^2 - \epsilon_0^2)^{3/2}}{\epsilon [(\epsilon + \Delta\epsilon)^2 - \epsilon_0^2]} \left(\frac{\epsilon + \Delta\epsilon}{T_0 + \epsilon_0} \right)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где ϵ – полная энергия частиц с жесткостью R , ϵ_0 – энергия покоя, T_0 – кинетическая энергия, при которой интенсивность КЛ соответствующей жесткости равна A , γ – спектральный индекс галактическо-

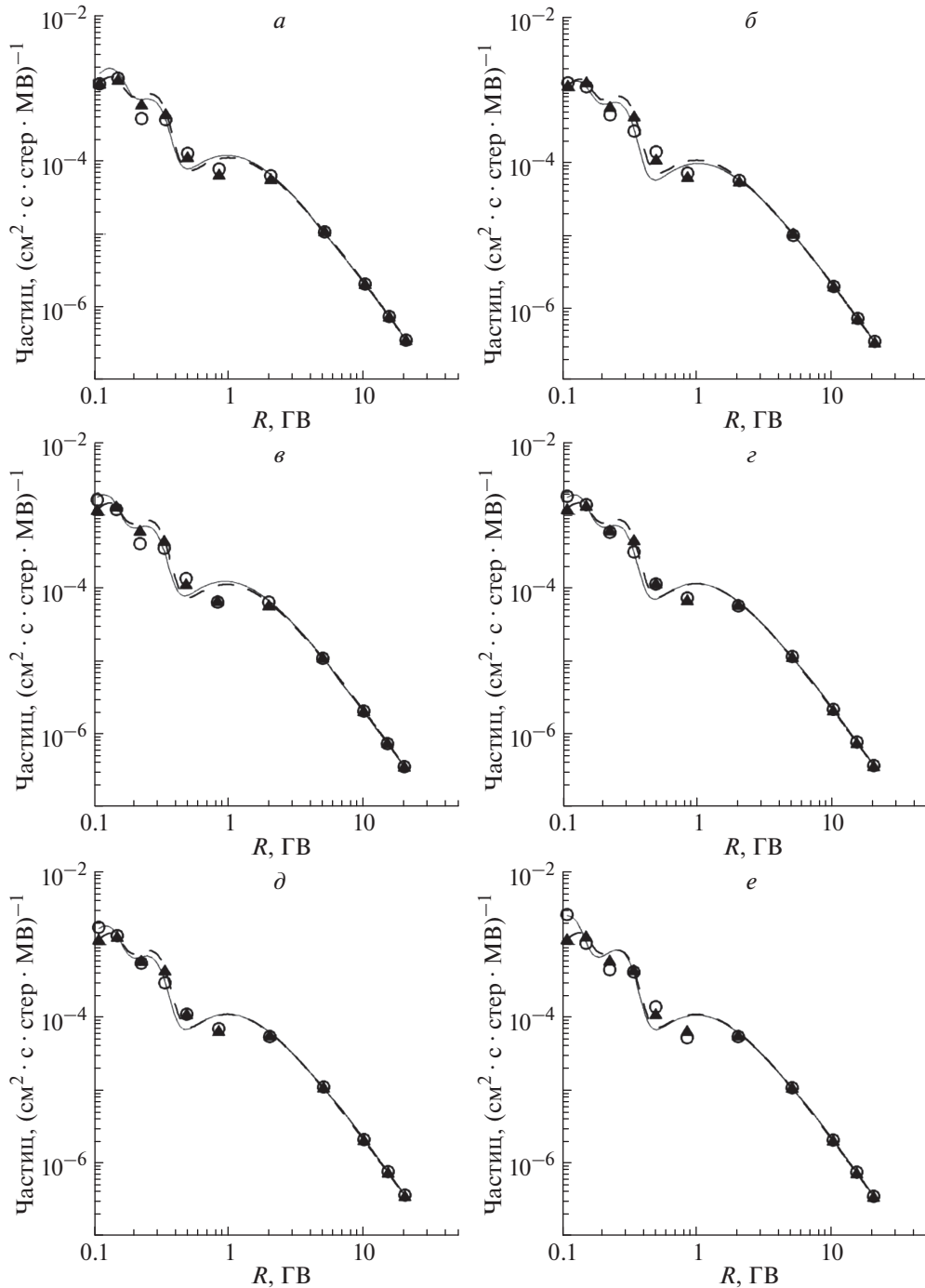


Рис. 1. Дифференциальные жесткостные спектры КЛ за 11 октября (панели *a–в*, 12:00, 13:00 и 15:00 UT соответственно) и 31 октября 2012 г. (панели *г–е*, 14:00, 15:00 и 19:00 UT соответственно) совместно с фоновым спектром КЛ. Сплошные кривые — результаты расчетов модельного спектра в указанные моменты времени, круги — данные наблюдений. Пунктирная кривая — расчетный фоновый спектр, треугольники — данные наблюдений.

го спектра КЛ, $\Delta \epsilon$ — изменение полной энергии частиц в электромагнитных полях гелиосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На рис. 1*a–f* представлены дифференциальные жесткостные спектры КЛ за отдельные часы

октября 2012 г. совместно с фоновым спектром КЛ. Результаты расчетов спектра в указанные моменты времени показаны сплошными кривыми на графиках, данные наблюдений — кругами. Для сравнения расчетный фоновый спектр за 00:00 UT 5 октября 2012 года обозначен пунктирной кри-

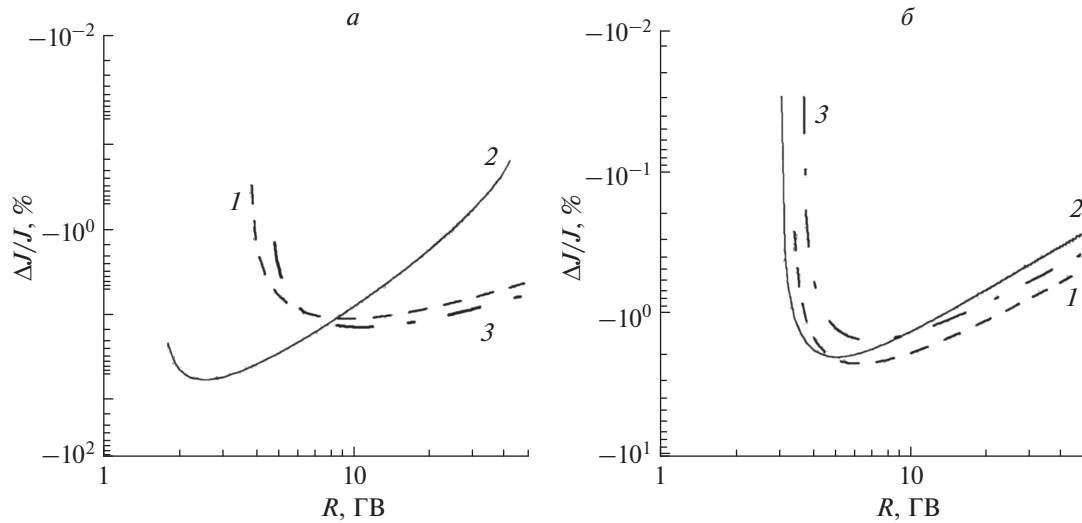


Рис. 2. Спектры вариаций первичных КЛ в отдельные моменты Форбуш-эффектов 11 (а) и 31 (б) октября 2012 г. Сплошные линии – фаза максимальной модуляции КЛ, штриховая и штрихпунктирная линии – фазы спада и восстановления соответственно.

вой, а данные наблюдений – треугольниками. Анализ рисунков показывает, что дифференциальный жесткостный спектр солнечных КЛ в этот период не описывается ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц в широком диапазоне жесткостей. Используемый вид спектра хорошо (1) описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости в заданном диапазоне жесткостей.

На рис. 2 представлены спектры вариаций КЛ в отдельные часы 11 и 31 октября 2012 г. на разных стадиях исследуемого события. Во время фазы максимальной модуляции (13:00 UT) 11 октября (рис. 2а) максимум понижения КЛ находился в диапазоне ~2–3 ГВ, на фазе спада (12:00 UT) – в области ~6–7 ГВ, затем постепенно возвращался к начальным значениям во время восстановления (15:00 UT). Из рис. 2а видно, что вид спектра вариаций КЛ степенной только в области жесткостей от ~6 ГВ и выше в фазе максимальной модуляции КЛ, в другие моменты времени спектр степенным не является.

На рис. 2б представлены спектры вариаций КЛ в отдельные часы 31 октября 2012 г. на разных стадиях исследуемого события: 14:00 UT (фаза спада), 15:00 UT (фаза максимальной модуляции), 19:00 UT (фаза восстановления). Во время фазы максимальной модуляции максимум понижения КЛ находился в диапазоне ~3 ГВ, на фазе спада и восстановления – в области ~7 ГВ.

В табл. 1 приведены показатели спектра КЛ при его представлении степенной функцией по жесткости частиц в виде

$$\Delta J/J \sim R^{-\gamma}, \quad (2)$$

где $\Delta J/J$ – амплитуда вариаций первичного спектра КЛ, R – жесткость частиц, γ – спектральный индекс галактического спектра КЛ (показатель спектра вариаций КЛ). Значения спектрального индекса γ (2) в диапазоне жесткостей 7–50 ГВ изменяются 11 октября от 0.7 до 2.13 (стандартная ошибка ~0.024), 31 октября от 0.87 до 1.02 (стандартная ошибка ~0.022).

Табл. 1. Спектральные индексы галактического спектра КЛ при представлении его степенной функцией жесткости частиц в различных диапазонах жесткостей

Дата и время, UT	Диапазон жесткостей, ГВ	γ
11.10.2012 12:00 UT	10–50	0.7
31.10.2012 14:00 UT		0.87
11.10.2012 13:00 UT	7–30	2.13
31.10.2012 15:00 UT	10–50	1.02
11.10.2012 15:00 UT	10–50	0.75
31.10.2012 19:00 UT		0.85

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемый вид спектра (1) хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости на всем анализируемом временном интервале. Максимум понижения КЛ во время фазы максимальной модуляции находился в диапазоне $\sim 2-3$ ГВ, на фазе спада и во время восстановления – в области $\sim 6-7$ ГВ. Вид спектра амплитуд модуляции является степенным только в области жесткостей от ~ 6 ГВ и выше в фазе максимальной модуляции КЛ во время описываемых Форбуш-эффектов, в другие моменты времени спектр степенным не является. Значения спектрального индекса γ (2) изменяются 11 октября от 0.7 до 2.1, 31 октября от 0.87 до 1.02.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rg.ru/ckp/3056/> и Уникальной научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)” [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гущина П.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А. и др.* // Геомагн. и аэронавиг. 2014. Т. 54. № 4. С. 470; *Gushchina R.T., Belov A.V., Eroshenko E.A. et al.* // Geomagn. Aeron. 2014. V. 54. No. 4. P. 430.
2. *Ишков В.Н.* // Земля и Вселенная. 2013. № 2. С. 33.
3. http://tesis.lebedev.ru/sun_flares.html.
4. <http://www.spaceweather.com>.
5. <http://spaceweather.izmiran.ru>.
6. <http://nmdb.eu/nest>.
7. <ftp://ftp.isee.nagoya-u.ac.jp>.
8. <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/2012/10/goes13>.
9. *Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V.* // Proc. 18th ICRC. V. 3. (Bangalore, 1983). P. 249.
10. *Dvornikov V.M., Sdobnov V.E.* // JGR. 1997. V. 102. No. A11. Art. No. 24209.
11. *Richardson I.G., Cane H.V., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E.* // JGR. 2000. V. 105. No. A6. Art. No. 12579.
12. *Lukovnikova A.A.* // Proc. 36th ICRC. V. 358. (Madison, 2019). Art. No. 27.
13. *Dvornikov V.M., Sdobnov V.E.* // IJGA. 2002. V. 3. No. 3. P. 217.
14. *Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Lukovnikova A.A. et al.* // Proc. 30th ICRC. V. 1. (Merida, 2007). P. 127.
15. http://cr.izmiran.ru/dbs_unu.html.

Analysis of rigidity spectra of cosmic ray variations in October 2012

A. A. Lukovnikova*

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Irkutsk, 664033 Russia

**e-mail: luk@iszf.irk.ru*

According to ground-based and satellite observations of cosmic rays with the world-wide network of neutron monitor stations using the spectrographic global survey method, the October 2012 Forbush-effects were studied. We obtained rigidity spectra of primary cosmic ray variations in the Earth's orbit. Parameters of the spectra of cosmic ray variations in different periods of the addressed event are presented.