

УДК 521.4

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В ПЕРИОД ГЕОМАГНИТНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В ЯНВАРЕ 2015 г.

© 2019 г. М. В. Кравцова¹, *, В. Е. Сдобнов¹

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

*rina@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 13.03.2018 г.

После доработки 13.03.2018 г.

Принята к публикации 20.04.2018 г.

По данным наземных измерений космических лучей (КЛ) на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки исследовано поведение интенсивности КЛ в период геомагнитного возмущения в январе 2015 г. Приведены спектры вариаций КЛ, показатели спектра этих вариаций при аппроксимации спектра степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ, питч-угловая анизотропия КЛ. Показано, что показатели спектра вариаций КЛ при его аппроксимации степенной функцией от жесткости частиц в фазе максимальной модуляции больше, чем на фазах спада и восстановления интенсивности КЛ.

DOI: 10.1134/S0023420619010059

Согласно современным представлениям существуют два основных типа возмущений межпланетной среды: рекуррентные и спорадические. К первому типу относятся вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр, которые являются достаточно стабильными солнечными структурами и могут существовать в течение нескольких 27-суточных солнечных оборотов. Ко второму – корональные выбросы массы (КВМ), представляющие собой магнитные облака (МО), приходящее к Земле с относительно высокой скоростью 600–1000 км/с. Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать отклик как в магнитосфере Земли, так и в вариациях космических лучей (КЛ). К таким вариациям относятся форбуш-эффекты [1] (изменения плотности и анизотропии КЛ в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра (СВ)). Однако высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр, как правило, вызывают менее интенсивные геомагнитные бури и меньшие по величине форбуш-эффекты, чем корональный выбросы.

По данным (<https://www.solarmonitor.org>) с 1–7.1.2015 г. на Солнце были видны многочисленные активные области (AR) и огромная корональная дыра на Южном Полюсе. Наибольшая активность наблюдалась в AR 12253, которая производила в день от ~5 до 16 вспышек в основном класса C. В поле зрения LASCO/C2 3.1.2015 г. в 3.12 в юго-восточном секторе появился слабый и медленный КВМ (скорость составила ~153 км/с) (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2015_01) и по данным (<http://alshamess.ifa.hawaii.edu/CORIMP>) наблюдаемый КВМ явно был обусловлен быстрым СВ из корональной дыры. Де-

тальному описанию корональных процессов на Солнце в этот период посвящена работа [2].

В результате наложения двух процессов: слабого КВМ и высокоскоростного потока СВ от корональной дыры 7.1.2015 г. в магнитосфере Земли произошла умеренная геомагнитная буря (Dst -индекс = -99 нТл). На фоне этой геомагнитной бури мировой сетью станций нейтронных мониторов был зарегистрирован небольшой форбуш-эффект с амплитудой модуляции интенсивности нейтронной компоненты КЛ на средних широтах в несколько процентов.

Исследованию форбуш-эффекта, наблюдавшегося с 7–10.1.2015 г. на фоне умеренной геомагнитной бури 7.1.2015 г. и посвящена данная работа, которой мы продолжаем цикл своих работ для дальнейшего обобщения.

ДАнные И МЕТОД

Для анализа использовались данные мировой сети станций нейтронных мониторов (44 нейтронного монитора) (<ftp://cr0.irmiran.rssi.ru>), исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы, а также информация об электромагнитной обстановке в межпланетном пространстве в период гелиосферных и магнитосферных возмущений (<https://www.solarmonitor.org>, http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2015_01/univ2015_01.html, <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

Амплитуды модуляции КЛ отсчитывались от фонового уровня 15.1.2015 г. Выбор спокойного периода обусловлен тем, что в этот период по сравнению с периодом, когда наблюдался форбуш-эффект, электромагнитная обстановка в

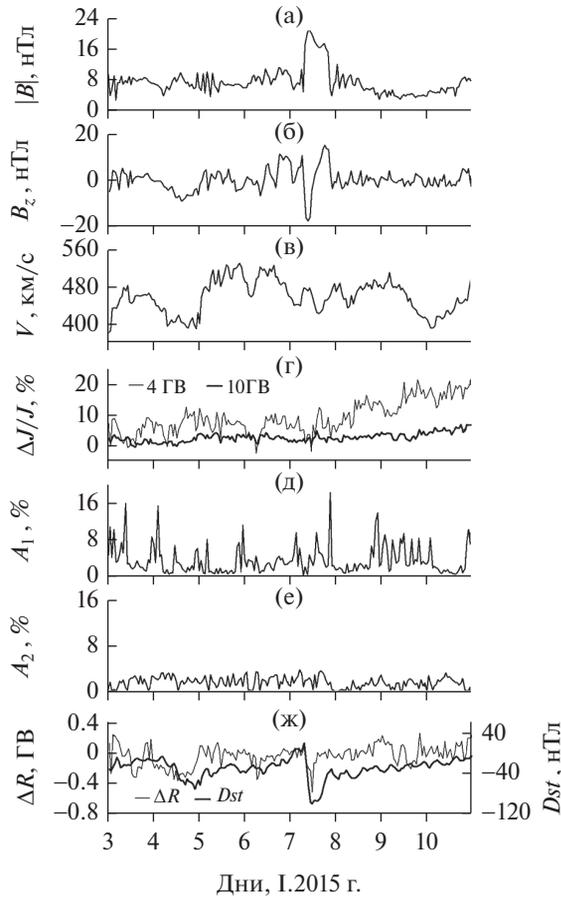


Рис. 1

межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными, а спектр галактических КЛ менее модулирован.

Анализ выполнен с применением метода СГС [3, 4]. В отличие от существующих методов, метод СГС позволяет использовать для анализа весь имеющийся комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировую сеть нейтронных мониторов, расположенных на разных уровнях в атмосфере Земли, а также наземные и подземные мюонные телескопы и т.д.). Метод СГС дает возможность, наряду с фазами первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии, определять жесткостной спектр вариаций изотропной составляющей.

При апробировании метода СГС на большом наблюдательном материале с использованием практических всех доступных данных мировой сети станций КЛ (практически более 40 станций КЛ) было установлено, что среднеквадратическая ошибка решения с учетом статистических ошибок в данных наблюдений всех станций КЛ, а также ошибок, вносимых моделью, в среднем составляет $\sim 0.4\text{--}0.5\%$. С амплитудой такой величины на исходные данные был наложен белый шум, проведены порядка 10000 испытаний. На этой основе были получены величины ошибок ($1\text{--}2\%$) при определении амплитуд первичных спектров вариаций,

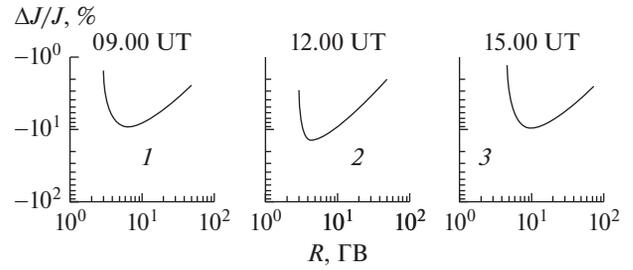


Рис. 2

амплитуд первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии КЛ ($1\text{--}2\%$), широтного и долготного углов межпланетного магнитного поля (ММП) ($10^\circ\text{--}15^\circ$), а также изменений пороговых жесткостей геомагнитного обрезания КЛ ($0.05\text{--}0.07$ ГВ).

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 за период 3–10.I.2015 г. приведены значения модуля и B_z -компоненты ММП, скорости СВ, вариаций изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 и 10 ГВ, амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ; временной ход изменений жесткости геомагнитного обрезания $R = 4$ ГВ совместно с Dst -индексом.

Рис. 1 демонстрирует, что приведенные параметры СВ (а–в) отреагировали на межпланетное возмущение, произошедшее 3.I.2015 г. и достигнувшее Земли 7.I.2015 г. Прохождение МО можно оценить по возрастанию модуля ММП до ~ 21 нТл и отрицательной компоненты $B_z \sim -17$ нТл, а также по изменению скорости СВ, которая варьирует от 400 до 500 км/с.

На рис. 1г можно видеть, что максимальная амплитуда модуляции наблюдается для частиц с $R = 4$ ГВ. 7.I – величина амплитуды вариаций составила $\sim 12\%$.

Как следует из графиков (см. рис. 1д, 1е) в отдельные моменты рассматриваемого периода наблюдается сильная питч-угловая анизотропия КЛ с амплитудами от 8 до $\sim 18\%$ для первой сферической гармоники (A_1). Амплитуды второй сферической гармоники питч-угловой анизотропии (A_2) для частиц той же жесткости незначительные и составляют $\sim 2\%$. В момент максимальной модуляции форбуш-эффекта 7.I.2015 г. в 12.00 UT амплитуды A_1 составили $\sim 4\%$.

Временной ход изменений жесткости геомагнитного обрезания (ΔR) в период геомагнитной бури соответствует изменениям Dst -индекса (см. рис. 1ж), так как они отражают одно и то же явление: усиление кольцевого тока в магнитосфере. При сравнении кривых видно, что максимальное понижение пороговой жесткости в период магнитной бури наблюдается одновременно с минимальным значением Dst -индекса. Во время гео-

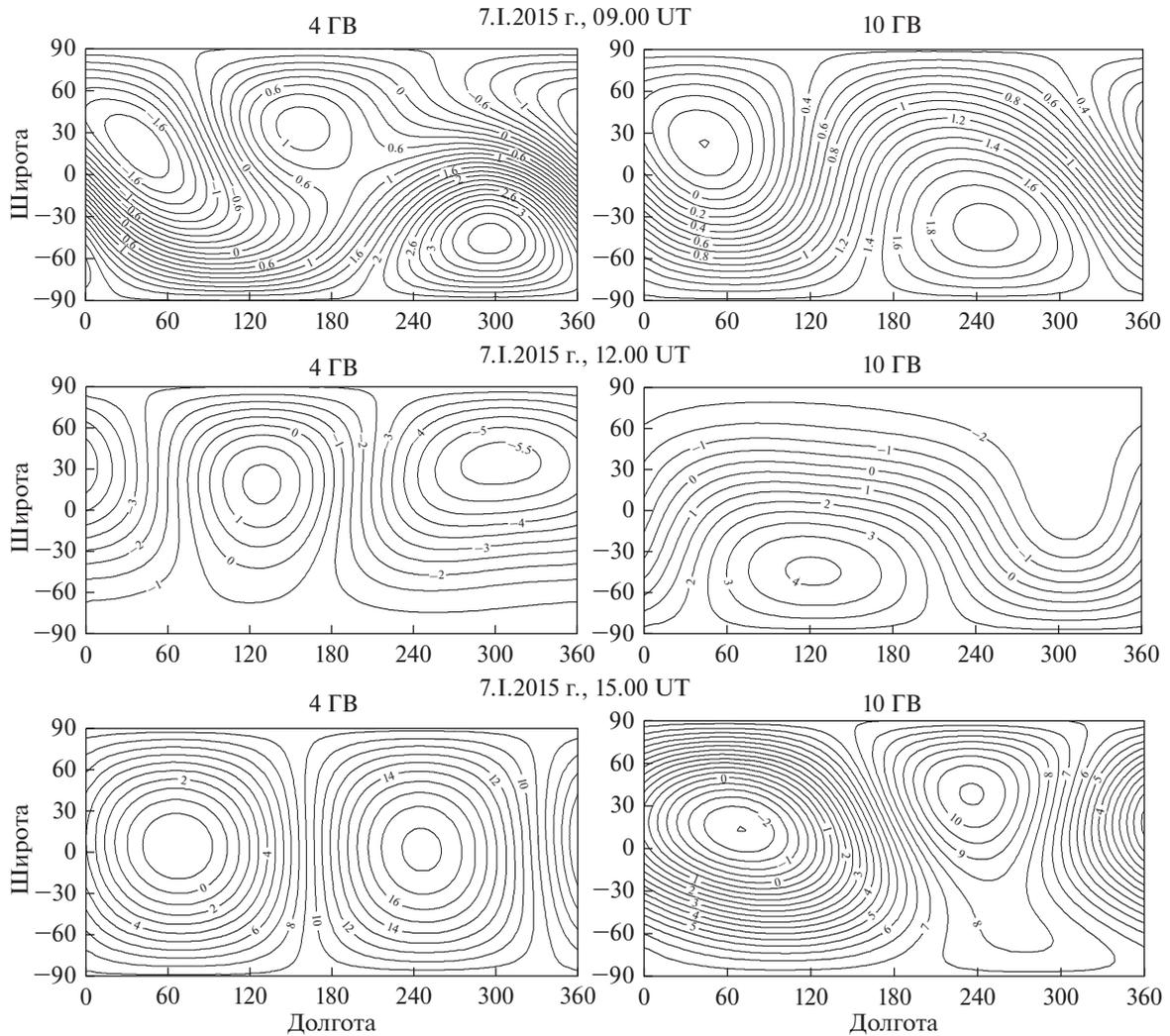


Рис. 3

магнитной бури (7–8.I.2015 г.) коэффициент корреляции между ΔR и Dst -индексом составил 0.69.

В качестве примера на рис. 2 представлены жесткостные спектры амплитуд вариаций первичных КЛ в отдельные моменты развития исследуемого форбуш-эффекта. Исследована динамика жесткостного спектра вариаций КЛ на разных фазах развития форбуш-эффекта. Изменения интенсивности КЛ во время форбуш-эффекта были разделены на три фазы: 1 – спада – интервал от

начала уменьшения интенсивности КЛ до ее минимального значения, 2 – максимальной модуляции – интервал от момента минимального значения интенсивности до начала ее возрастания и 3 – восстановления – интервал, в течение которого темп счета растет до исходного уровня.

Из рис. 2 видно, что жесткостные спектры амплитуд вариаций для форбуш-эффекта нельзя описать степенной функцией от жесткости в жесткостном диапазоне от ~ 2 до 50 ГВ. Аппроксимация жесткостного спектра степенной функцией от жесткости частиц возможна лишь при жесткостях выше ~ 10 ГВ.

В табл. 1 приведены средние значения показателя степени γ при аппроксимации жесткостных спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ на разных стадиях развития события.

Из таблицы видно, что на фазе максимальной модуляции показатель спектра больше, чем на фазах спада и восстановления интенсивности КЛ

Таблица 1. Средние значения показателя степени γ для исследуемого форбуш-эффекта при аппроксимации жесткостных спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ

Дата события	Фаза развития форбуш-эффекта		
	спад	максимальная модуляция	восстановление
7–15.I.2015 г.	~ -0.8	~ -1.0	~ -0.8

и составил $\gamma \sim -1.0$. В общем, наблюдается смягчение спектра в минимуме форбуш-эффекта, что согласуется с результатами, полученными нами ранее [5, 6]. Отметим, что наличие более мягкого спектра в максимальной модуляции форбуш-эффекта можно отнести к закономерности, однако, это заключение противоречит выводам, полученным в работе [7]. В этой работе утверждается, что в минимуме форбуш-эффекта спектр обычно жесткий, а на фазе восстановления — мягкий спектр. Такое расхождение в оценках объясняется тем, что авторы работы [7] представляют спектр степенной функций в диапазоне жесткостей >1 ГВ, а мы неоднократно показывали [5, 6, 8, 9], что спектр вариаций КЛ в данном диапазоне не является степенным. Только при жесткости более ~ 10 ГВ спектр вариаций КЛ в период форбуш-эффекта можно описывать степенной функцией от жесткости.

На рис. 3 представлены относительные изменения интенсивности КЛ (в процентах) для частиц с жесткостями 4 и 10 ГВ в солнечно-эллиптической геоцентрической системе координат на разных фазах развития исследуемого форбуш-эффекта (фаза спада интенсивности, фаза максимальной модуляции и фаза восстановления интенсивности). По оси абсцисс отложены значения долготного угла ψ , а по оси ординат — широтного угла λ .

Из рис. 3 видно, что как для частиц $R = 4$ ГВ, так и для частиц $R = 10$ ГВ во время максимальной модуляции КЛ доминирует первая гармоника. 7.I.2015 г. в 12.00 UT интенсивность КЛ была понижена на $\sim 6\%$ из направления $\psi \sim 305^\circ$, $\lambda \sim 30^\circ$. В рамках модели модуляции КЛ регулярными полями гелиосферы при входе и выходе Земли в структуры подобные КВМ наблюдается повышение первой гармоники пич-углового распределения. Отсутствие заметного возрастания второй гармоники пич-углового распределения указывает на то, что в это время не сформировалась петлеобразная структура в ММП [10].

Проанализировав зависимость изменений пороговых жесткостей геомагнитного обрезания (ΔR_c) от пороговых жесткостей R_c в отдельные моменты исследуемого события с результатами расчетов влияния на изменения жесткости геомагнитного обрезания тока, текущего в западном направлении по параллелям на сфере с силой, пропорциональной косинусу широты, для разных радиусов токового кольца в дипольном поле [11] мы получили, что по мере развития магнитной бури 7–8.I.2015 г. радиус кольцевого тока изменялся от ~ 5 до ~ 3.5 –4 радиусов Земли. В начальной фазе магнитной бури подсолнечная точка магнитосферы сместилась до ~ 8 радиусов Земли.

ВЫВОДЫ

Форбуш-эффект и умеренная геомагнитная буря 7.I.2015 г. обусловлены рекуррентным возмущением в СВ.

При аппроксимации спектров вариаций в период форбуш-эффекта 7.I.2015 г. степенной функцией от жесткости частиц в интервале 10–50 ГВ на фазе максимальной модуляции показатель спектра больше, чем на фазах спада и восстановления интенсивности КЛ.

Отсутствие двунаправленной анизотропии в максимальной фазе модуляции КЛ в рассмотренном событии свидетельствует о том, что в этот период в СВ не сформировалась петлеобразная структура ММП.

Полученные результаты по расчету изменений пороговых жесткостей геомагнитного обрезания могут быть использованы для тестирования различных моделей магнитосферных токовых систем их динамики в периоды геомагнитных возмущений.

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2018 г. № 007-00163-18-00 от 12.I.2018 г. на научном оборудовании Центра коллективного пользования “Ангара” (ЦКП “Ангара”) и УНУ “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbush S.E.* On the effects in the cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // *Phys. Rev.* 1937. V. 51. P. 1108–1109.
2. *Cid C., Palacios J., Saiz E., Guerrero A.* Redefining the boundaries of interplanetary coronal mass ejections from observations at the ecliptic plane // *Astrophys. J.* 2016. V. 828. № 11. P. 1–9. doi 10.3847/0004-637X/828/1/11
3. *Dvornikov V.M., Sdobnov V.E.* Analyzing the solar proton event of October 22, 1989 using the method of spectrographic global survey // *Solar Phys.* 1998. V. 178 (2). P. 405–422.
4. *Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E.* Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004 // *Advances in Space Research.* 2013. V. 51. P. 1230–1237.
5. *Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* Анализ форбуш-понижений в периоды сильных геомагнитных возмущений в марте–апреле 2001 г. // *Письма в АЖ.* 2014. Т. 40. № 8. С. 575–581.
6. *Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* Космические лучи во время гигантских геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронаука.* 2016. Т. 56. № 2. С. 154–162.
7. *Клюева А.И., Белов А.В., Ерошенко Е.А.* Особенности жесткостного спектра эффектов форбуша // *Геомагнетизм и аэронаука.* 2017. Т. 57. № 2. С. 195–207.
8. *Kravtsova M.V., Sdobnov V.E.* Effects in Cosmic Rays in March 1991 // *Geomagn. Aeronomy.* 2011. V. 51. № 7. P. 958–962.
9. *Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* Анализ форбуш-эффекта в июне 2015 г. методом спектрографической глобальной съемки // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 2. С. 196–198.
10. *Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* Диагностика электромагнитных характеристик межпланетной среды по эффектам в космических лучах // *Геомагнетизм и аэронаука.* 2013. Т. 53. № 4. С. 457–468.
11. *Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И.* Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971. с. 399.