

УДК 521.4

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В ПЕРИОД ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ В МАРТЕ 1989 г. И В МАРТЕ 1991 г.: СПЕКТРЫ ВАРИАЦИЙ, АНИЗОТРОПИЯ И ВАРИАЦИИ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ

© 2020 г. М. В. Кравцова^{1, *}, С. В. Олемской^{1, **}, В. Е. Сдобнов^{1, ***}

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

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

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

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

Поступила в редакцию 29.10.2019 г.

После доработки 22.11.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

По данным наземных измерений космических лучей на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки выполнен анализ двух Форбуш-эффектов во время геомагнитных бурь в марте 1989 г. и в марте 1991 г. Приведены жесткостные спектры и спектры вариаций,pitch-угловая анизотропия космических лучей на разных фазах развития Форбуш-эффектов, а также изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания. Показано, что при аппроксимации спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в интервале 10–50 ГВ на фазе максимальной модуляции показатель спектра мягче, чем на фазах спада и восстановления интенсивности космических лучей. В рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли, учитывающей токи на магнитопаузе и кольцевой ток, определены расстояние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока, а также вклад кольцевого тока в изменения жесткости геомагнитного обрезания и в *Dst*-индекс во время исследуемых событий.

DOI: 10.31857/S0016794020040082

1. ВВЕДЕНИЕ

Вариации вторичных космических лучей (КЛ), регистрируемые наземной аппаратурой, являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных, магнитосферных и атмосферных явлений. Примером влияния солнечной активности на КЛ являются Форбуш-эффекты, которые представляют собой резкие понижения интенсивности КЛ, наблюдаемые на Земле [Forbush, 1937]. Форбуш-эффекты дают непосредственную информацию о возмущениях в межпланетной среде, поскольку их параметры тесно связаны с явлениями в солнечно-земной физике. Они выделяются среди других вариаций КЛ величиной, частотой появления и многообразием. Причинами разнообразия Форбуш-эффектов являются как влияние различных солнечных источников, их изменчивость, так и особенности распространения возмущения в межпланетной среде и его взаимодействия с гелиосферным токовым слоем и т.д. Поэтому в вариациях галактических КЛ содержится информация об электромагнитных характеристиках межпланетных возмущений и межпланетного магнитного поля (ММП). В

связи с этим исследования Форбуш-эффектов актуальны и практически важны для астрофизики КЛ, физики солнечно-земных связей, геофизики и прогнозирования космической погоды. Об актуальности проблемы свидетельствует не уменьшающийся поток публикаций на тему о Форбуш-эффектах [например, Belov et al., 2014; Белов и др., 2016; Livada et al., 2018; Мелкумян и др., 2019].

В данной работе нами рассчитаны пространственные и энергетические характеристики двух Форбуш-эффектов, наблюдавшихся в марте 1989 г. и в марте 1991 г., с целью получения дополнительной информации для понимания природы этих явлений. Исследуемые события сопровождались геомагнитными бурями (самыми большими в 22-ом солнечном цикле), которые вызвали массовые сбои в энергосистеме, а также многочисленные нарушения связи и сбои в работе спутников [Karpenman and Albertson, 1990; Smart et al., 1995]. Для решения этой задачи были рассмотрены гелиосферные источники геомагнитных возмущений на основе спутниковых наблюдений (раздел 3), в разделе 4 приведено обсуждение по-

лученных результатов и в Заключении представлены основные выводы.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

Для анализа использовались данные мировой сети станций нейтронных мониторов, исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы. В исследовании события в марте 1989 г. использовались данные 43 нейтронных мониторов, а амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 2 марта 1989 г. В исследовании события в марте 1991 г. использовались данные 46 нейтронных мониторов, а амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 3 марта 1991 г. (<http://center.stelab.nagoya-u.ac.jp/WDCCR>).

Выбор спокойного периода обусловлен тем, что в эти периоды по сравнению с периодами, когда наблюдались геомагнитные возмущения, электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными, а спектр галактических КЛ наименее модулирован. При анализе событий в марте 1989 г. и в марте 1991 г. использовались данные космического аппарата GOES-7 (http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/) (протоны в семи энергетических интервалах 0.8–4, 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ).

Анализ выполнен с применением метода спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov et al., 1983; Dvornikov and Sdobnov, 2002; Кравцова и Сдобнов, 2014, 2016, 2017]. В отличие от существующих методов исследования вариаций КЛ, 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 мезонные телескопы и т.д.). Данное обстоятельство дает возможность на ряду с фазой первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии определять жесткостный спектр изотропной составляющей и анизотропии КЛ, по фазе второй гармоники получать информацию об ориентации ММП, а также определять изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания (ЖГО) за каждый час наблюдений в периоды возмущений геомагнитного поля. Достоверность информации, получаемой методом СГС по данным мировой сети станций КЛ, подтверждается ее сопоставлением с наблюдаемыми параметрами ММП и магнитосферы Земли. Геомагнитное поле в марте 1989 г. и в марте 1991 г. было сильно возмущено. К сожалению, в этот период практически нет данных о ММП, получаемых космическими аппаратами. В работе [Hofer and Flückiger, 1997] приведены изменения ММП 24 марта 1991 г. согласно измерениям на космическом аппарате Галилео. Максимальные

значения величины ММП в отдельные моменты 24 марта 1991 г. достигали ~25 нТл, а средняя скорость солнечного ветра (СВ) согласно [Le et al., 2003] достигала ~1400 км/с. Тем не менее, мы можем использовать рассчитанные нами значения параметров анизотропии и жесткостного спектра [Дворников и др., 2013], определенные за исследуемый период, чтобы сделать выводы об изменениях в ММП. В рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы сильная питч-угловая анизотропия является отражением структурных особенностей крупномасштабных полей в межпланетном пространстве (таких, например, как магнитные ловушки), обусловленных неоднородностью по гелиодолготе и нестационарностью истечения СВ в источнике, т.е. является индикатором динамических процессов в гелиосфере. Возрастание амплитуд A_1 и A_2 (двунаправленной) гармоник питч-угловой анизотропии КЛ наблюдается при изменениях напряженности ММП. При входе и выходе Земли в структуры подобные корональным выбросам массы (КВМ) наблюдается увеличение амплитуды A_1 , а возрастание амплитуды A_2 указывает на наличие в ММП петлеобразной структуры [Дворников и др., 2013].

Для расчета спектров КЛ использовалось выражение, полученное в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [Дворников и др., 2013] в предположении, что интенсивность КЛ с определенной жесткостью изменяется в соответствии с теоремой Лиувилля. Предположение справедливо в том случае, когда можно пренебречь эффектами рассеяния частиц на магнитных неоднородностях и при отсутствии СКЛ в рассматриваемом диапазоне энергий.

Главная особенность магнитной бури – резкое усиление кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы. Во время магнитной бури наряду с резким усилением кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы происходит значительное усиление и других магнитосферных токовых систем: токов хвоста, токов на магнитопаузе и не учитываемых в нашей модели продольных и ионосферных токов. Соотношение между вкладами этих токовых систем в Dst -индекс на разных фазах магнитной бури может характеризовать их относительную динамику во время магнитосферных возмущений.

В данной работе для оценки магнитосферных эффектов мы используем простейшую осесимметричную модель ограниченной магнитосферы приводимые нами радиусы кольцевого тока и тока на магнитопаузе отражают суммарные вклады нескольких токовых систем. Поэтому правильнее говорить об эффективных радиусах токовых си-

стем, дающих вклады в Dst -индекс подобно кольцевому току и току на магнитопаузе.

Используя результаты расчетов методом СГС зависимости изменений ЖГО от ЖГО по данным мировой сети станций КЛ (ΔR_{ob}) и изменений ЖГО от ЖГО в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли (ΔR_{cal}) [Кичигин и Сдобнов, 2017] рассчитаны некоторые параметры магнитосферных токовых систем (DCF и DR). Этими параметрами в данной модели являются радиусы кольцевого тока (DR) (r_c), токов на магнитопаузе (DCF) (r_m) и Dst -индекс. Параметры токовых систем (r_c , r_m) определяются путем их перебора и перебора значений Dst -индекса для минимизации функционала

$$\left(\sum_i [\Delta R_{ob}(R_i) - \Delta R_{cal}(R_i, r_c, r_m, Dst)]^2 \right) = \min.$$

3. ГЕЛИОСФЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

3.1. Март 1989 г.

6 марта 1989 г. на восточном лимбе Солнца (координаты 35° N, 69° E) появилась активная область (АО) 5395, которая с 6 по 19 марта произвела 11 рентгеновских вспышек X класса, 48 рентгеновских вспышек M класса и ~ 10 КВМ разной мощности (от слабых до ярких). Такая колоссальная активность на Солнце имела много важных последствий на Земле и в околоземном пространстве. События, которые произошли на Солнце, породили на Земле гигантскую магнитную бурю, сильные возмущения ионосферы и громкое понижение интенсивности КЛ (Форбуш-эффект) [Allen et al., 1989; Venkatesan et al., 1990; Fujii et al., 1992; Nagatsuma et al., 2015].

Геомагнитная буря, которая развилась 13–14 марта 1989 г., была самым экстремальным возмущением с 1957 г. Она была вызвана КВМ из солнечной вспышки X4.5/3B, произошедшей 10 марта [Allen et al., 1989]. Этот КВМ не был исключительным с точки зрения его скорости ~ 770 км/с [Feynman and Hundhausen, 1994]. Тем не менее, авторы [Feynman and Hundhausen, 1994] отметили его высокую яркость, что проявилось в сильном динамическом давлении на магнитосферу Земли. Максимальной интенсивности геомагнитная буря достигла 13 марта, когда планетарный индекс A_p возрос до значения 246, а Dst -индекс геомагнитной активности (между 01:00 и 02:00 UT 14 марта) достиг значения -589 нТл [Venkatesan et al., 1990; Allen et al., 1989]. Вероятность появления события такого масштаба может происходить один раз в 60 лет [Tsubouchi and Omura, 2007].

Это событие хорошо известно своими практическими последствиями. Из-за сильного геомаг-

нитно-индуцированного тока, который протекал в линиях электропередач, в Северной Америке рухнула энергосистема [Karpenman and Albertson, 1990; Bolduc, 2002]. В результате шесть миллионов жителей провинции Квебек оставались без электричества более 9 ч. Кроме того, в южной части Соединенных Штатов ночью 13 марта и рано утром 14 марта было видно низкоширотное сияние.

В Иркутске ($R_c = 3.66$ ГВ) скорость счета нейтронного монитора понизилась на $\sim -12\%$ относительно спокойного периода 2 марта 1989 г.

3.2. Март 1991 г.

Интенсивная солнечная активность в трех АО (6538, 6545, 6555) с 22 по 23 марта 1991 г. привела к большим возмущениям в околоземном космическом пространстве и магнитосфере Земли. 22 марта в 22:43 UT произошла вспышка балла 3B/X9.4 (координаты 26° S, 28° E), после которой образовалась ударная волна (с радиоизлучением II типа). Вспышка сопровождалась высокоскоростным КВМ, его скорость достигала 1400 км/с [Le et al., 2003]. Ударная волна достигла Земли в 03:42 UT 24 марта 1991 г. и вызвала внезапное начало магнитной бури (SSC). При этом магнитопауза сместилась до 6.6 радиусов Земли [Smart et al., 1995]. K_p -индекс возрос до 9, а Dst -индекс геомагнитной активности достиг значения -298 нТл. Полярные сияния наблюдались в Австралии. Кроме того последствия этой геомагнитной бури имели техногенный характер [Smart et al., 1995]: были повреждены панели солнечных батарей на космических аппаратах GOES-6 и 7; сбой в энергосистеме США, Канады и Центральной Австралии. В это же время было отмечено начало гигантского Форбуш-эффекта [Hofer and Flückiger, 1997, 2000; Ahluwalia et al., 2009].

Максимальная амплитуда понижения скорости счета нейтронного монитора в Иркутске составила $\sim -23\%$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Спектры вариаций и анизотропии КЛ

На рисунке 1 приведены амплитуды вариаций нейтронной компоненты КЛ ($\Delta I/I$) на ст. Иркутск ($R_c = 3.66$ ГВ) в периоды Форбуш-эффектов в марте 1989 г. и в марте 1991 г., амплитуды вариаций КЛ с жесткостью 4 и 10 ГВ на границе магнитосферы ($\Delta J/J$), амплитуды первой (A_1) и второй (A_2) гармоник питч-угловой анизотропии для частиц с жесткостью 4 ГВ, а также изменения жесткости геомагнитного обрезания (ΔR) в Иркутске совместно с Dst -индексом.

Хотя магнитная буря в марте 1991 г. (Dst -индекс ~ -300 нТл) была менее интенсивная, чем в марте 1989 г. (Dst -индекс ~ -600 нТл), амплитуда

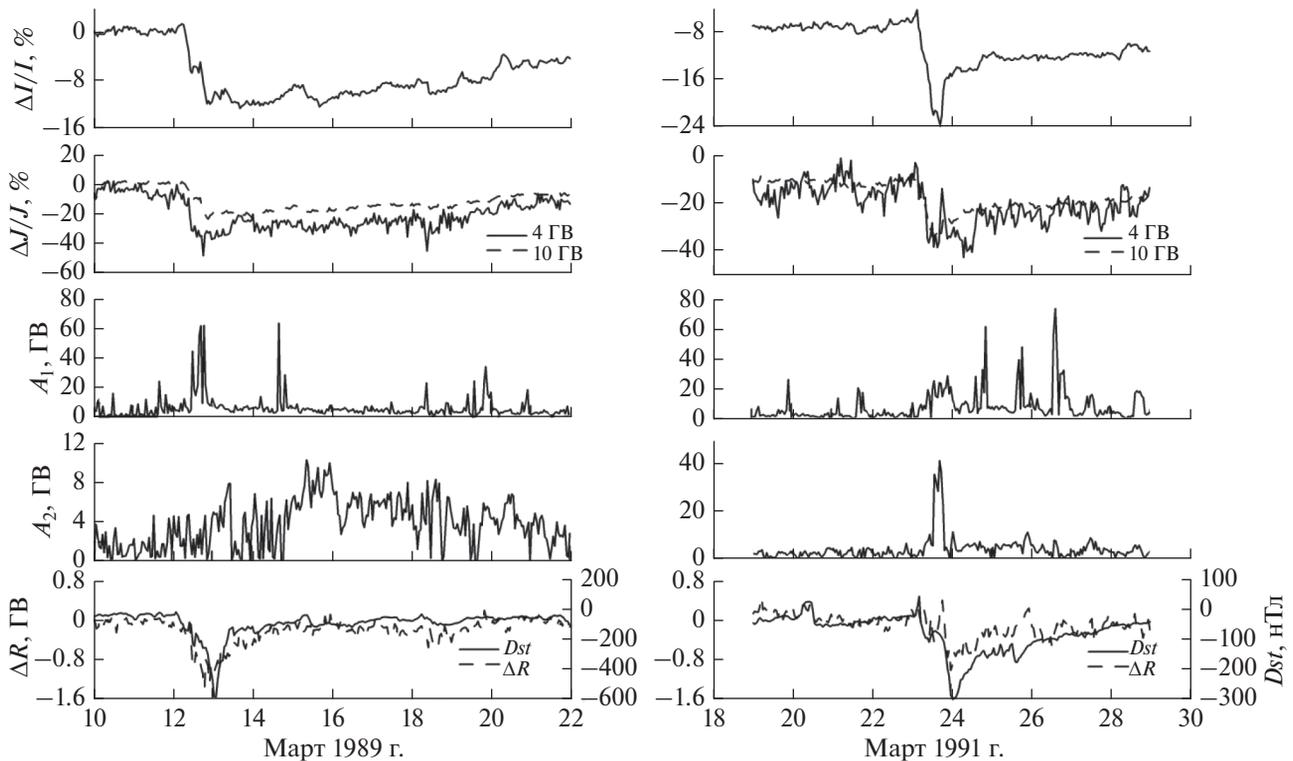


Рис. 1. За период 10–22 марта 1989 г. (левая панель) и 18–30 марта 1991 г. (правая панель) представлены: *a* – вариации нейтронной компоненты КЛ на станции Иркутск; *b* – вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ (сплошная кривая) и 10 ГВ (штриховая кривая); *в*, *г* – амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ; *д* – временной ход изменений ЖГО в Иркутске ($R_c = 3.66$ ГВ) (штриховая кривая) совместно с Dst -индексом (сплошная кривая).

эффекта в скорости счета нейтронного монитора в Иркутске в марте 1989 г. относительно его начала ($\sim -12\%$) была меньше, чем в марте 1991 г. ($\sim -18\%$), а амплитуда эффекта для частиц с жесткостью 4 и 10 ГВ на границе магнитосферы относительно начала события в марте 1989 г. была больше, чем для события в марте 1991 г. Максимальное повышение амплитуды первой гармоники питч-угловой анизотропии в событии в марте 1989 г. составило $\sim 30\%$ и $\sim 40\%$ 13 и 15 марта, соответственно, а в марте 1991 г. максимальное повышение амплитуды первой гармоники питч-угловой анизотропии от $\sim 30\%$ до $\sim 50\%$ произошло 25, 26, 27 числа. Амплитуды второй гармоники питч-угловой анизотропии в событиях в марте 1989 г. и в марте 1991 г. достигали $\sim 8\text{--}10\%$, но 24 марта 1991 г. с 14:00 до 19:00 UT амплитуда второй гармоники питч-угловой анизотропии возросла до $\sim 30\text{--}40\%$.

Изменения ЖГО в Иркутске в марте 1989 г. и в марте 1991 г. доходили до ~ -1.3 и ~ -1.0 ГВ, соответственно. Коэффициент корреляции между изменениями ЖГО в Иркутске и Dst -индексом для периода с 11 по 22 марта 1989 г. составил ~ 0.8 , а для периода с 20 по 29 марта 1991 г. – 0.75 .

На рисунке 2 представлены жесткостные спектры и спектры вариаций первичных КЛ в отдель-

ные моменты разных фаз развития исследуемых событий. Видно, что во всех представленных моментах Форбуш-эффектов в жесткостных спектрах до ~ 1 ГВ интенсивность протонов на орбите Земли выше фонового уровня, а при более высоких энергиях интенсивность протонов ниже фонового уровня, т.е. в диапазоне чувствительности нейтронных мониторов наблюдаются Форбуш-эффекты. Спектры вариаций КЛ не являются степенными в широкой области жесткостей. Только в диапазоне жесткостей выше ~ 10 ГВ эти спектры по жесткости близки к степенным.

Мы рассчитали показатели степени γ при представлении спектров вариаций первичных КЛ степенной функцией в диапазоне жесткостей выше ~ 10 ГВ. В таблице 1 представлены средние значения показателя степени γ для исследуемых событий при аппроксимации жесткостных спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ. Видно, что в среднем спектры вариаций КЛ в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ в событии в марте 1989 г. мягче, чем для Форбуш-эффекта в марте 1991 г. Для обоих событий спектры вариаций КЛ, как и в других случаях [Кравцова и Сдобнов, 2014, 2016, 2017], в моменты максимальной

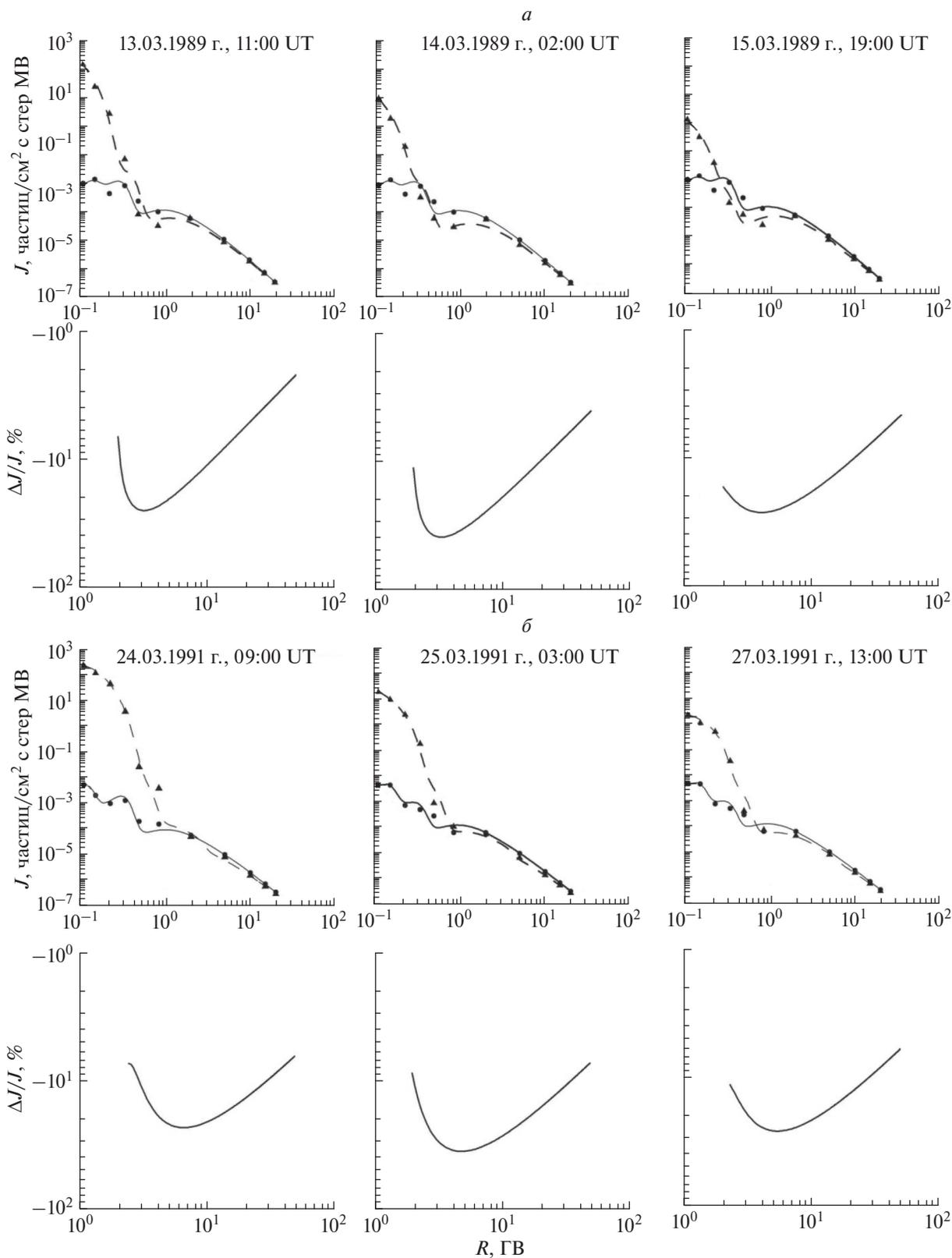


Рис. 2. Жесткостные спектры и спектры вариаций первичных КЛ на разных фазах развития исследуемых Форбуш-эффектов: *a* – март 1989 г.; *б* – март 1991 г. Штриховая кривая – расчетный модельный спектр в указанный момент времени, сплошная кривая – расчетный фоновый спектр; значки – данные наблюдений.

Таблица 1. Средние значения показателя степени γ для исследуемых событий 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
Март 1989 г.	~ -0.9	~ -1.0	~ -0.9
Март 1991 г.	~ -0.8	~ -0.9	~ -0.8

модуляции мягче, чем на фазах спада и восстановления интенсивности КЛ.

На рисунке 3 представлены относительные изменения интенсивности КЛ для частиц с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат на разных фазах развития исследуемых Форбуш-эффектов. По оси абсцисс отложены значения долготного угла ψ , а по оси ординат – широтного угла λ . В один из моментов фазы спада 13 марта 1989 г. в 11:00 UT видна первая гармоника питч-углового распределения с повышенным потоком частиц из направления с координатами в солнечно-эклиптической геоцентрической системе $\psi = \sim 309^\circ$ и $\lambda = \sim 42^\circ$. На том же этапе развития эффекта 24 марта 1991 г. в 09:00 UT существовала двунаправленная анизотропия с повышенным потоком частиц из направлений $\psi = \sim 75^\circ$, $\lambda = \sim 15^\circ$ и $\psi = \sim 255^\circ$, $\lambda = \sim -15^\circ$.

В один из моментов фазы максимальной модуляции 14 марта 1989 г. в 02:00 UT видна вторая гармоника питч-углового распределения с повышенным потоком частиц из направлений с координатами в солнечно-эклиптической геоцентрической системе $\psi = \sim 20^\circ$, $\lambda = \sim 25^\circ$ и $\psi = \sim 200^\circ$, $\lambda = \sim -25^\circ$, а 25 марта 1991 г. в 03:00 UT из направлений $\psi = \sim 51^\circ$, $\lambda = \sim -34^\circ$ и $\psi = \sim 230^\circ$, $\lambda = \sim -34^\circ$. На фазе спада Форбуш-эффекта в 19:00 UT 15 марта 1989 г. видна первая гармоника питч-углового распределения с повышенным потоком частиц из направления с координатами $\psi = \sim 117^\circ$, $\lambda = \sim -12^\circ$, а 27 марта 1991 г. в 14:00 UT из направлений $\psi = \sim 22^\circ$, $\lambda = \sim 56^\circ$. Расчеты показали большую амплитуду двунаправленной питч-угловой анизотропии с 14:00 по 20:00 UT 24 марта 1991 г., что согласуется с результатами [Le et al., 2003]. Hofer and Flückiger [2000] предположили,

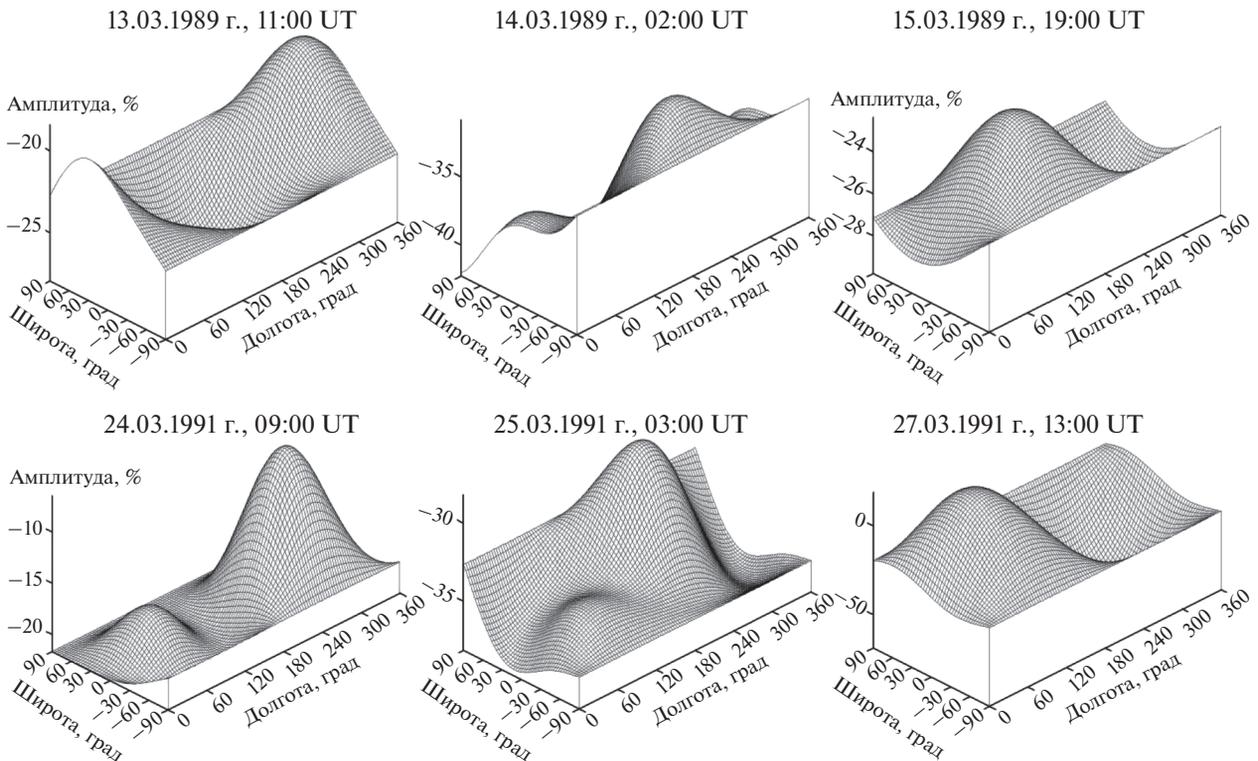


Рис. 3. Относительные изменения интенсивности КЛ для частиц с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат на разных фазах развития исследуемых Форбуш-эффектов. По оси абсцисс отложены значения долготного угла ψ , а по оси ординат – широтного угла λ .

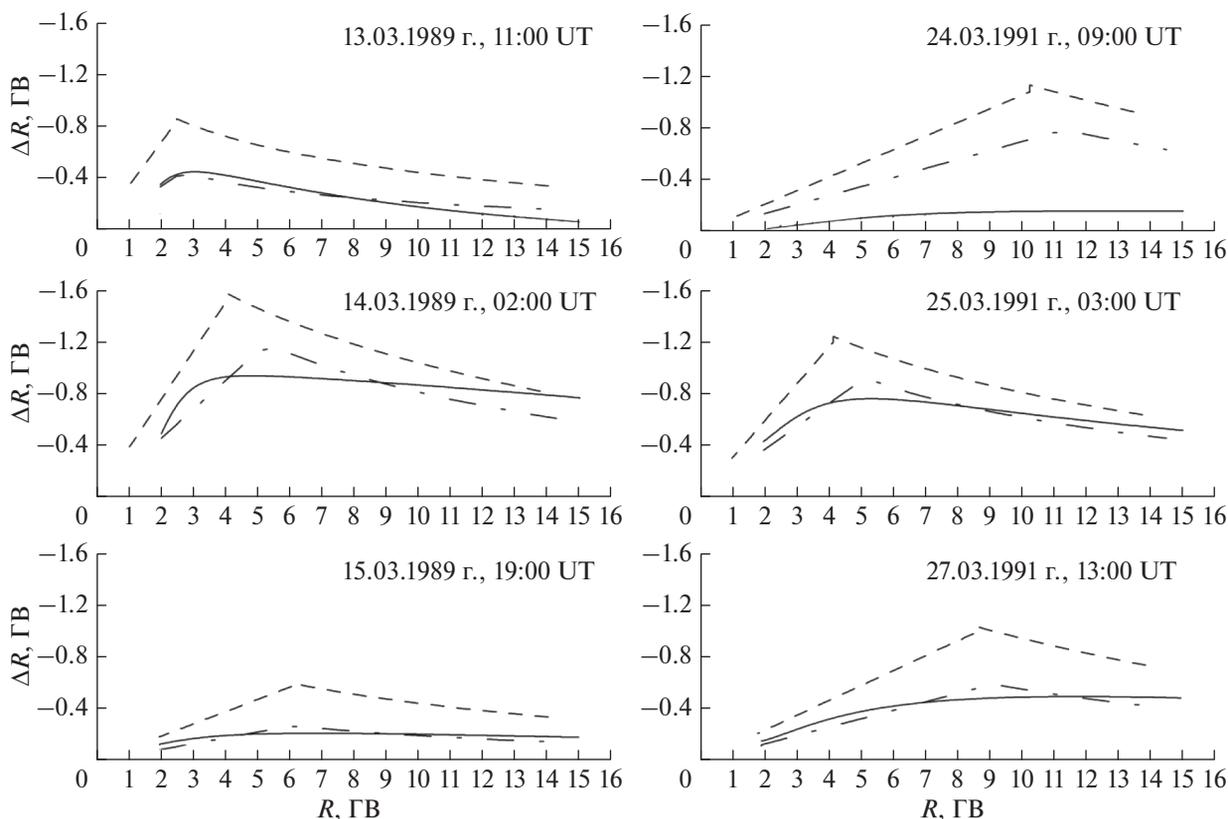


Рис. 4. Зависимость изменения ЖГО от ЖГО на разных фазах геомагнитных бурь в марте 1989 г. и в марте 1991 г. Сплошная линия – результаты, полученные из данных мировой сети станций КЛ методом СГС, штрихпунктирная линия – расчет по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током. Штриховая линия – вклад в изменения ЖГО от кольцевого тока, рассчитанного по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы.

что солнечная деятельность 22 марта 1991 г. в 22:45 UT привела к КВМ, за которым последовало магнитное облако пространственной протяженностью порядка 0.4 а. е. По их мнению, в этот период Земля находилась в мощной петлеобразной структуре ММП.

По данным изменений интенсивности КЛ на мировой сети станций в периоды магнитных бурь, совпадающими с Форбуш-эффектами в марте 1989 г. и в марте 1991 г. рассчитаны планетарные изменения ЖГО. На основе полученных планетарных изменений ЖГО в рамках осесим-

Таблица 2. Вклад DR и DCF токов в развитии магнитных бурь в марте 1989 г. и в марте 1991 г.

Дата/время	$Dst_{\text{набл}}$, нТл	$Dst_{\text{расч}}$, нТл	Dst_{DR} , нТл	Dst_{DCF} , нТл	$I_{\text{DR}} \times 10^6$ А	$I_{\text{DCF}} \times 10^6$ А
13.03.89 г. 11:00 UT	-101	-104	-226	122	13.9	3.7
14.03.89 г. 02:00 UT	-589	-400	-558	158	18.3	3.4
15.03.89 г. 19:00 UT	-99	-96	-285	129	13.6	1.4
24.03.91 г. 13:00 UT	-63	-432	-663	181	20.1	2.4
25.03.91 г. 03:00 UT	-294	-302	-425	123	15.1	2.5
27.03.91 г. 14:00 UT	-84	-110	-229	114	13.3	3.6

Таблица 3. Вклад DR и DCF токов в развитии магнитных бурь в марте 1989 г. и в марте 1991 г.

Геомагнитная буря	начальная фаза		главная фаза		фаза восстановления	
	r_c	r_m	r_c	r_m	r_c	r_m
Март 1989 г.	~4.5–5.0	~8.0	~3.5	~7.5	~4.0	~9.0
Март 1991 г.	~5.0–5.3	~7.0–7.2	~3.5	~7.5–8.0	~4.7	~9.0

метричной модели ограниченной магнитосферы [Кичигин и Сдобнов, 2017], учитывающей токи на магнитопаузе и кольцевой ток, в данной работе рассчитано расстояние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока, сила кольцевого тока (IDR), тока на магнитопаузе (I_{DCF}), а также соотношение между вкладами от этих токов в Dst -индекс на разных фазах магнитной бури.

4.2. Магнитосферные токовые системы на разных фазах развития бури

На рисунке 4 представлены изменения ЖГО в отдельные моменты на разных фазах геомагнитных бурь в марте 1989 г. и в марте 1991 г. в зависимости от ЖГО. Видно, что на фазах наиболее интенсивного развития магнитной бури и на фазах ее затухания результаты расчетов изменений ЖГО по данным наблюдений интенсивности КЛ на мировой сети станций хорошо описываются осесимметричной моделью ограниченной магнитосферы [Кичигин и Сдобнов, 2017], включающую только кольцевой ток и токи на магнитопаузе.

В таблице 2 представлены наблюдаемые ($Dst_{набл}$) и рассчитанные ($Dst_{расч}$) значения Dst -индекса на разные фазы развития магнитных бурь, а также вклад кольцевого тока (Dst_{DR}) и токов на магнитопаузе (Dst_{DCF}) в полную величину Dst -индекса и силу тока этих токовых систем. Рассчитанные нами параметры кольцевого тока и тока на магнитопаузе отражают суммарные вклады нескольких токовых систем. Поэтому правильнее говорить об эффективных радиусах токовых систем, дающих вклады в Dst -индекс подобно кольцевому току и току на магнитопаузе.

В таблице 3 приведены значения средних радиусов кольцевого тока (r_c) в единицах радиуса Земли и среднего расстояния до подсолнечной точки (r_m) в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы для разных фаз развития геомагнитных бурь. Минимальные радиусы кольцевого тока наблюдаются в главной фазе геомагнитной бури с последующим возрастанием на фазе восстановления геомагнитного возмущения. Поскольку в используемой в данной работе осесимметричной модели ограниченной магнитосферы не учитываются вклады многих токовых систем, а рассчитанные значения Dst -индекса в некоторые моменты близки к наблюдаемым,

можно предположить, что в эти периоды магнитных бурь основной вклад в их интенсивность вносят симметричная составляющая DR и DCF токов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенный анализ показал следующее.

Спектры вариаций КЛ в период Форбуш-эффектов в марте 1989 г. и в марте 1991 г. не являются степенными в широкой области жесткостей, только выше ~10 ГВ эти спектры близки к степенным по жесткости.

При аппроксимации спектров вариаций в период Форбуш-эффектов в марте 1989 г. и в марте 1991 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.

В период повышенной амплитуды двунаправленной пичч-угловой анизотропии КЛ в событиях марта 1989 и 1991 гг. Земля находилась в петлеобразной структуре ММП.

Показана возможность по данным наземных измерений КЛ на мировой сети станций проводить количественную оценку параметров некоторых токовых систем в магнитосфере в периоды магнитных бурь.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-gf.ru/ckp/3056/>) и Уникальной научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы Фундаментальных научных исследований И.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунина М.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение плотности потока космических лучей в начале Форбуш-эффектов // Гео-

- магнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 683–689. 2016.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016060055>
- Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Диагностика электромагнитных характеристик межпланетной среды по эффектам в космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 4. С. 457–468. 2013.
<https://doi.org/10.7868/S001679401304007X>
- Кичигин Г.Н., Сдобнов В.Е. Жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 2. С. 149–153. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017020043>
- Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Анализ форбуш-понижений в периоды сильных геомагнитных возмущений в марте–апреле 2001 г. // Письма в Астрон. журн. Т. 40. № 8. С. 575–58. 2014.
<https://doi.org/10.7868/S0320010814070043>
- Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Космические лучи во время гигантских геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 2. С. 154. 2016.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016020103>
- Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Анализ форбуш-эффекта в июне 2015 г. методом спектрографической глобальной съемки // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 81. № 2. С. 196–198. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S0367676517020259>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Рекуррентные и спорадические Форбуш-понижения в 23-м и 24-м солнечных циклах // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 1. С. 39–47. 2019.
<https://doi.org/10.12737/szf-51201904>
- Ahluwalia H.S., Ygbuhay R.C., Duldig M.L. Two intense Forbush decreases of solar activity cycle 22 // Adv. Space Res. V. 44. P. 58–63. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.04.004>
- Allen J., Frank L., Reiff P., Sauer H. Effects of the March 1989 Solar Activity // Eos. V. 70. № 46. P. 1479–1488. 1989.
<https://doi.org/10.1029/89EO00409>
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H., Gopalswamy N., Yashiro S. Coronal mass ejections and non-recurrent Forbush decreases // Solar Phys. V. 289. № 10. P. 3949–3960. 2014.
<https://doi.org/10.1007/s11207-014-0534-6>
- Bolduc L. GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. Is 16. P. 1793–1802. 2002.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00128-1)
- Dvornikov V.M., Sergeev A.V., Sdobnov V.E. Analysis of cosmic ray pitch - angle anisotropy during the June 1972 Forbush effect by method of spectrographic global survey / Proc. 18th ICRC. Bangalore. V. 3. P. 249–252. 1983.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush effect on 12–15 July // Intern. J. Geomagnet. Aeronom. V. 3. № 3. P. 217–226. 2002.
- Feynman J., Hundhausen A.J. Coronal mass ejections and major solar flares: The great active center of March 1989 // J. Geophys. Res. V. 99. № A5. P. 8451–8464. 1994.
- Forbush S.E. On the effects in the cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // Phys. Rev. V. 51. P. 1108–1109. 1937.
- Fujii R., Fukunishi H., Kokubun S., Sugiura M., Tohyama F., Hayakawa H., Tsuruda K., Okada T. Field-aligned current signatures during the March 13–14, 1989, great magnetic storm // J. Geophys. Res. V. 97. № A7. P. 10703–10715. 1992.
<https://doi.org/10.1029/92JA00171>
- Hofer M.Y., Flückiger E.O. Cosmic ray modulation during the 24 March 1991 Forbush decreases / Proc. 25th ICRC. Durban, South Africa, July, 1997. V. 1. P. 401–404. 1997.
- Hofer M.Y., Flückiger E.O. Cosmic ray spectral variations and anisotropy near earth during the March 24, 1991, Forbush decrease // J. Geophys. Res. V. 105. № A10. P. 23085–23097. 2000.
- <http://center.stelab.nagoya-u.ac.jp/WDCCR>
- http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/
- Kappenman J.G., Albertson V.D. Bracing for the geomagnetic storms // IEEE Spectrum. V. 27. № 33. P. 27–33. 1990.
- Le G.M., Ye Z.H., Gong J.H., Tan Y.H., Lu H., Tang Y.Q. Time determination of March 1991's CME hitting magnetosphere / Proc. 28th ICRC. Tsukuba, Japan. P. 3601–3604. 2003.
- Livada M., Mavromichalaki H., Plainaki C. Galactic cosmic ray spectral index: The case of Forbush decreases of March 2012 // Astrophys. Space Sci. V. 363. № 8. P. 9. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s10509-017-3230-9>
- Nagatsuma T., Kataoka R., Kunitake M. Estimating the solar wind conditions during an extreme geomagnetic storm: a case study of the event that occurred on March 13–14, 1989 // Earth, Planets Space. 67:78. 2015.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0249-4>
- Smart D.F., Shea M.A., Flückiger E.O., Sanahuja B. Solar, interplanetary, and geomagnetic phenomena in March 1991 and their association with spacecraft and terrestrial problems / Proc. Suppl. Nuclear Physics B. № 39A. P. 26–34. 1995.
[https://doi.org/10.1016/0920-5632\(95\)00004-S](https://doi.org/10.1016/0920-5632(95)00004-S)
- Tsubouchi K., Omura Y. Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events // Space Weather. 5. S12003. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2007SW000329>
- Venkatesan D., Decker R.B., Krimigis S.M., Mathews T., Sarris E.T. The great Forbush decrease of March 1989 and interplanetary energetic particle environment / Proc. 21th ICRC. Adelaide, Australia, 6–19 January, 1990. P. 247–250. 1990.