

УДК 521.4

## ФОРБУШ-ЭФФЕКТ И ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ В АПРЕЛЕ 1990 г.

© 2021 г. М. В. Кравцова<sup>1</sup>, \*, С. В. Олемской<sup>1</sup>, В. Е. Сдобнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*E-mail: rina@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 измерений космических лучей на мировой сети станций исследованы Форбуш-эффект и геомагнитная буря в апреле 1990 г. Рассчитаны спектры вариаций, анизотропия космических лучей и изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания. Определены расстояние до подсолнечной точки, радиус кольцевого тока, а также вклад кольцевого тока в  $D_{st}$ -индекс во время исследуемых событий.

DOI: 10.31857/S036767652111017X

### ВВЕДЕНИЕ

В период умеренной солнечной активности [1] 9 апреля 1990 г. произошла геомагнитная буря с внезапным началом ~08:42 UT, вызванная приходом ударной волны от солнечной вспышки в активной области 6007 (координаты  $24^\circ$  с.ш.,  $28^\circ$  в.д.). Вспышка сопровождалась радиовсплеском II типа, что указывает на наличие коронального выброса массы [2, 3]. К сожалению, в данный период имеются только отрывочные данные наблюдений межпланетного магнитного поля (ММП), но можно отметить, что скорость солнечного ветра (СВ) на орбите Земли составляла ~500 км/с и выше, модуль ММП и его  $B_z$ -составляющая в 19:00 UT 10 апреля доходили до ~28 и ~-25 нТл, соответственно. В этот период на мировой сети станций космических лучей (КЛ) наблюдался Форбуш-эффект (ФЭ). Следует отметить, что максимальное понижение интенсивности КЛ произошло почти на сутки раньше максимальной депрессии геомагнитного поля. Так максимальное понижение скорости счета нейтронного монитора (НМ) в Иркутске составило ~-8% в 21:00 UT 9 апреля, а минимальное значение  $D_{st}$ -индекса составило -280 нТл 10 апреля 1990 г. в 19:00 UT.

В работе рассчитаны спектры вариаций и анизотропия КЛ, а также параметры магнитосферных токовых систем в период исследуемых событий, с целью получения дополнительной информации для понимания природы этих явлений.

### ДАННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

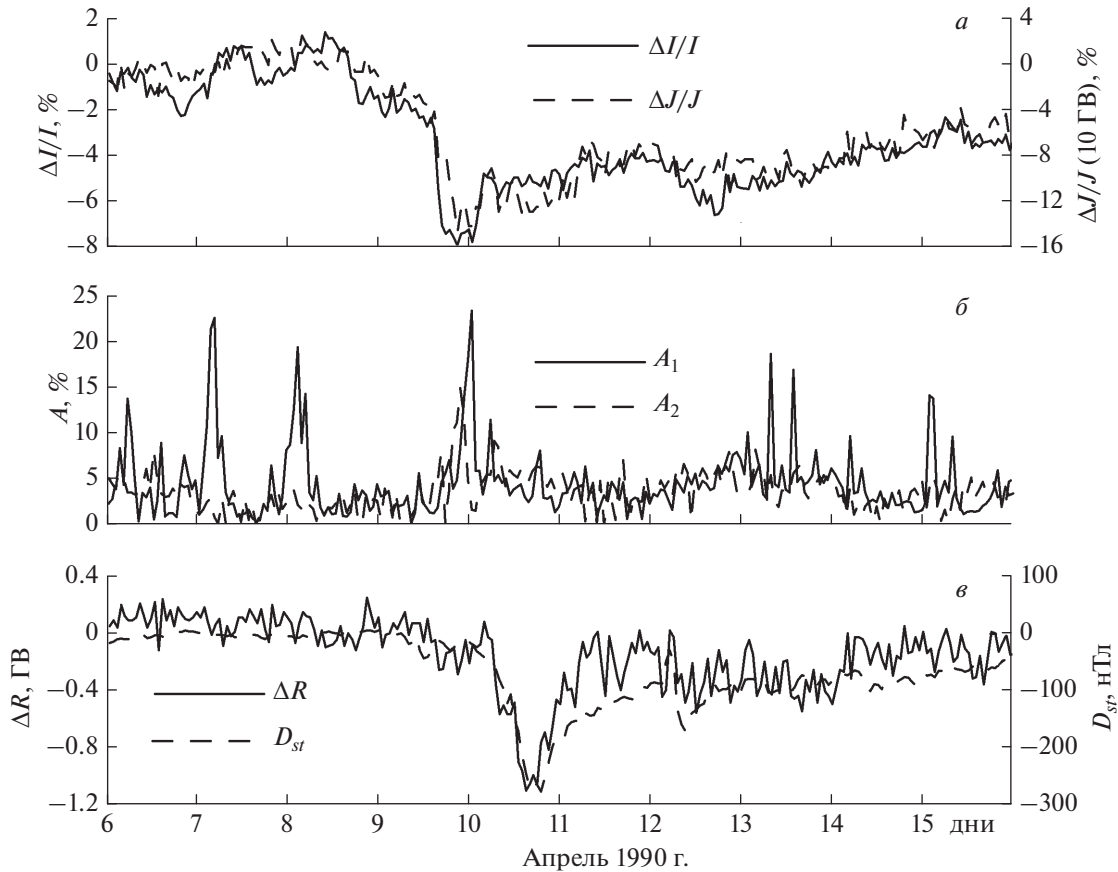
Для анализа использовались данные мировой сети станций КЛ (42 НМ) [4], исправленные на

давление и усредненные за часовые интервалы, а также данные космического аппарата GOES-7 (протоны в семи энергетических интервалах 0.8–4, 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ) [5]. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 8 апреля 1990 г. Выбор спокойного периода обусловлен тем, что в этот период электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными, а спектр галактических КЛ наименее модулирован.

Анализ выполнен с применением метода спектрографической глобальной съемки (СГС) [6, 7]. Результаты интерпретированы в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [8] и осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли [9].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены амплитуды вариаций нейтронной компоненты КЛ ( $\Delta I/I$ ) на ст. Иркутск ( $R_c = 3.64$  ГВ), амплитуды вариаций КЛ с жесткостью 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 (ЖГО) ( $\Delta R$ ) в Иркутске совместно с  $D_{st}$ -индексом 6–15 апреля 1990 г. Амплитуда понижения интенсивности КЛ на ст. Иркутск (см. рис. 1а) 9 апреля в 21:00 UT составила ~-8%, а амплитуда эффекта в это время для частиц с жесткостью 10 ГВ на границе магнитосферы составила ~-15%. Максимальные значения  $A_1$  (более 20%) наблюдались 7, 8 и 10 апреля, а  $A_2$  (~15%) – 9 ап-



**Рис. 1.** Вариации нейтронной компоненты КЛ на ст. Иркутск (сплошная кривая) совместно с вариациями изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 10 ГВ (штриховая кривая) (а). Амплитуды первой  $A_1$  (сплошная кривая) и второй  $A_2$  (штриховая кривая) гармоник пичч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ (б); Временной ход изменений ЖГО в Иркутске ( $R_c = 3.64$  ГВ) (сплошная кривая) совместно с  $D_{st}$ -индексом (штриховая кривая) (в).

реля (см. рис. 1б). В рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [8] возрастание амплитуд  $A_1$  и  $A_2$  (двунаправленной) наблюдается при изменениях напряженности ММП. Перед началом ФЭ амплитуды  $A_1$  наблюдались в отдельные часы 06:00–08:00 UT, а также перед понижением интенсивности КЛ в конце 9–начале 10 апреля. Появление  $A_2$  указывает на пребывание Земли в магнитном поле петлеобразной структуры. В это время повышенный поток частиц наблюдался из направлений с координатами в солнечно-эклиптической геоцентрической системе  $\psi = \sim 110^\circ$ ,  $\lambda = \sim 20^\circ$  и  $\psi = \sim 270^\circ$ ,  $\lambda = \sim -20^\circ$ .

Изменения ЖГО в Иркутске в период магнитной бури, сопровождавшей ФЭ, доходили до  $\sim -1.1$  ГВ (см. рис. 1в). Максимальное понижение ЖГО и  $D_{st}$ -индекса произошло 10 апреля в 15:00 UT и в 19:00 UT, соответственно. Коэффициент корреляции между изменениями ЖГО в Иркутске и  $D_{st}$ -индексом составил  $\sim 0.82$ . ФЭ на Земле произошел на  $\sim 18$  ч раньше, чем максимальное пониже-

ние ЖГО и на  $\sim 22$  ч раньше, чем депрессия  $D_{st}$ -индекса. Причиной большой разницы начала ФЭ и геомагнитной бури согласно [10, 11] является геометрический фактор пересечения Землей переднего фронта крупномасштабных возмущений СВ.

Спектры вариаций КЛ в период рассматриваемого ФЭ не являются степенными в широкой области жесткостей. Только в диапазоне жесткостей выше  $\sim 10$  ГВ эти спектры по жесткости близки к степенным. Получены средние значения показателя степени  $\gamma$  на разных стадиях события при аппроксимации жесткостных спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей выше 10 ГВ. В моменты максимальной модуляции КЛ спектры вариаций мягче ( $\gamma = 0.93$ ), чем на фазах спада ( $\gamma = 0.80$ ), и восстановления ( $\gamma = 0.87$ ) интенсивности КЛ.

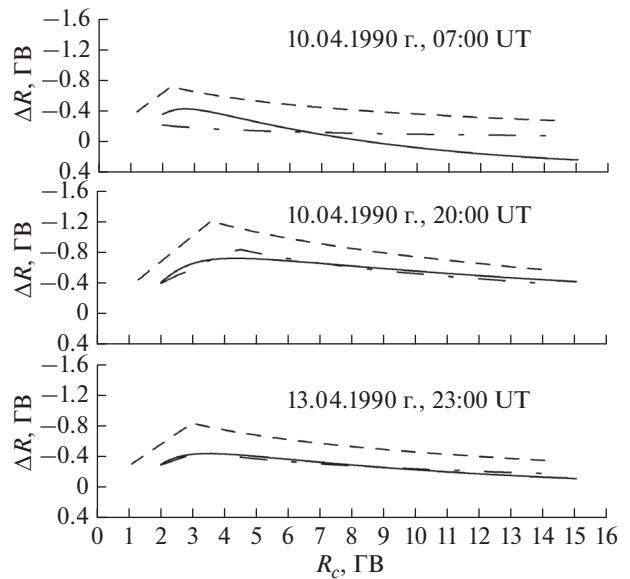
На основе рассчитанных планетарных изменений ЖГО в период магнитной бури в апреле 1990 г. в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы, учитывающей токи на магнитопаузе и кольцевой ток [9], мы рассчитали расстоя-

ние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока, силу кольцевого тока ( $I_{DR}$ ), тока на магнитопаузе ( $I_{DCF}$ ), а также соотношение между вкладками от этих токов в  $D_{st}$ -индекс на разных фазах магнитной бури.

На рис. 2 представлены изменения ЖГО в отдельные моменты на разных фазах геомагнитной бури в апреле 1990 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 [9], включающую только кольцевой ток и токи на магнитопаузе.

В табл. 1 представлены наблюдаемые ( $D_{st \text{набл}}$ ) и рассчитанные ( $D_{st \text{расч}}$ ) значения  $D_{st}$ -индекса на разные фазы развития магнитной бури, а также вклад кольцевого тока ( $D_{st \text{DR}}$ ) и токов на магнитопаузе ( $D_{st \text{DCF}}$ ) в полную величину  $D_{st}$ -индекса и силу тока этих токовых систем. Рассчитанные параметры кольцевого тока и тока на магнитопаузе отражают суммарные вклады нескольких токовых систем. Поэтому правильнее говорить об эффективных радиусах токовых систем, дающих вклады в  $D_{st}$ -индекс подобно кольцевому току и току на магнитопаузе.

В табл. 2 приведены средние радиусы кольцевого тока ( $r_c$ ) в единицах радиуса Земли и средние расстояния до подсолнечной точки ( $r_m$ ) в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы для разных фаз развития геомагнитной бури. Минимальные радиусы кольцевого тока наблюдаются в главной фазе геомагнитной бури с



**Рис. 2.** Зависимость изменения ЖГО от ЖГО на разных фазах геомагнитной бури в апреле 1990 г. Сплошная линия — результаты, полученные из данных мировой сети станций КЛ методом СГС, штрих-пунктирная линия — расчет по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током. Штриховая линия — вклад в изменения ЖГО от кольцевого тока, полученного по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы.

последующим возрастанием на фазе восстановления геомагнитного возмущения. Поскольку в осесимметричной модели ограниченной магнитосферы не учитываются вклады многих токовых систем, а рассчитанные значения  $D_{st}$ -индекса в неко-

**Таблица 1.** Вклад DR и DCF-токов в развитии магнитной бури в апреле 1990 г. на разных стадиях эффекта

Дата	$D_{st \text{набл}}$ , нТл	$D_{st \text{расч}}$ , нТл	$D_{st \text{DR}}$ , нТл	$D_{st \text{DCF}}$ , нТл	$I_{DR}$ , $10^6$ А	$I_{DCF}$ , $10^6$ А
10.04.1990 г. 07:00 UT	-65	-38	-171	133	14.9	4.9
10.04.1990 г. 20:00 UT	-257	-254	-386	132	15.4	3.1
13.04.1990 г. 23:00 UT	-93	-118	-236	118	13.5	3.1

**Таблица 2.** Средние значения радиусов кольцевого тока ( $r_c$ ) в единицах радиуса Земли и расстояния до подсолнечной точки ( $r_m$ ) в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы для разных фаз развития геомагнитной бури

10 апреля 1990 г.				13 апреля 1990 г.	
начальная фаза в 07:00 UT		главная фаза в 20:00 UT		фаза восстановления в 23:00 UT	
$r_c$	$r_m$	$r_c$	$r_m$	$r_c$	$r_m$
~4.8	~8.4	~3.8	~8.5	~4.2	~8.7

торые моменты близки к наблюдаемым, можно предположить, что в эти периоды магнитной бури основной вклад в ее интенсивность вносят симметричная составляющая DR и DCF-токов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектры вариаций КЛ в период ФЭ не являются степенными в широкой области жесткостей, только выше  $\sim 10$  ГВ жесткостные спектры вариаций КЛ близки к степенным. При аппроксимации спектров вариаций в период ФЭ степенной функцией от жесткости частиц при жесткости более 10 ГВ на фазе максимальной модуляции интенсивности КЛ наблюдается наибольший показатель спектра. В период повышенной амплитуды двунаправленной пичч-угловой анизотропии КЛ в апреле 1990 г. Земля находилась в петлеобразной структуре ММП. Показана возможность по данным наземных измерений КЛ на мировой сети станций проводить количественную оценку радиуса и силу кольцевого тока, а также рассчитывать расстояние до подсолнечной точки и силу тока на магнитопаузе в периоды геомагнитных возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> и Уникальной научной установки “Российская

национальная наземная сеть станций космических лучей” (Сеть СКЛ) [12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Antalova A.* // Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso. 1991. V. 21. P. 205.
2. *Wild J. P., Smerd, S.F., Weiss A.A.* // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1963. V. 1. P. 291.
3. *Gopalswamy N.* // In: The Sun and the Heliosphere as an integrated system. Dordrecht: Springer, 2004. V. 317. P. 201.
4. <http://center.stelab.nagoya-u.ac.jp/WDCCR>.
5. [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_avg](http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg).
6. *Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V.* // JGR. 2000. V. 105. Art. No. 12579.
7. *Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 196; *Kravtsova M.V., Sdobnov V.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 177.
8. *Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* // Геомагн. и аэронаом. 2013. Т. 53. № 4. С. 457; *Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E.* // Geomagn. Aeron. 2013. V. 53. No. 4. P. 430.
9. *Кичигин Г.Н., Сдобнов В.Е.* // Геомагн. и аэронаом. 2017. Т. 57. № 2. С. 149; *Kichigin G.N., Sdobnov V.E.* // Geomagn. Aeron. 2017. V. 57. No. 2. P. 132.
10. *Шадрина Л.П., Мамрукова В.П., Плотников И.Я.* // Геомагн. и аэронаом. 1996. Т. 36. № 3. С. 169.
11. *Shadrina L.P., Starodubtsev S.A., Plotnikov I.Ya.* // IJGA. 2001. V. 2. No. 3. P.
12. <https://ckp-rf.ru/usu/433536>.

## Forbush effect and geomagnetic storm in April 1990

M. V. Kravtsova<sup>a,\*</sup>, S. V. Olemskoy<sup>a</sup>, V. E. Sdobnov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: rina@iszf.irk.ru*

We studied the Forbush effect and geomagnetic storm in April 1990 from data of ground-based measurements of cosmic rays at the worldwide network of stations. Spectra of variations, anisotropy of cosmic rays and changes of the planetary system of geomagnetic cutoff rigidities were calculated. We determined the distance to the subsolar point, radius of the ring current, and the ring current contribution to  $D_{sr}$ -index during the investigated events.