

УДК 521.4

СПЕКТРЫ ВАРИАЦИЙ И АНИЗОТРОПИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОДЫ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ В МАРТЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. И. И. Ковалев*, М. В. Кравцова, С. В. Олемской, В. Е. Сдобнов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

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

Поступила в редакцию 27.02.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

По данным наземных наблюдений космических лучей (КЛ) на мировой сети нейтронных мониторов, Якутском комплексе мюонных телескопов и мюонном годоскопе УРАГАН (г. Москва) методом спектрографической глобальной съемки рассчитаны спектры вариаций и анизотропия КЛ во время Форбуш-эффектов 15 и 23.III.2023. Показано, что спектр вариаций КЛ в эти периоды не описывается степенной функцией в широком диапазоне жесткостей. Установлено, что 15 марта Земля находилась в петлеобразной структуре межпланетного магнитного поля, а 23 марта — попала в магнитное облако с замкнутыми силовыми линиями.

DOI: 10.31857/S0023420624060059, EDN: IGDRJU

1. ВВЕДЕНИЕ

Распространение в межпланетном пространстве корональных выбросов массы (КВМ) и высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ) влияет на поток космических лучей (КЛ). Взаимодействие разноскоростных потоков СВ с «вмороженным» в них магнитным полем приводит к образованию в межпланетном магнитном поле (ММП) структур типа «магнитная ловушка». В таких ловушках происходит ускорение или замедление частиц КЛ в зависимости от их энергии и питч-угла, что приводит к возникновению значительной анизотропии и модуляции спектра КЛ [1].

Исследованиям анизотропии КЛ и ее изменениям посвящено большое число работ (например, [2–6]). Подобные исследования дают информацию об электромагнитной обстановке в межпланетном пространстве и используются для создания методик прогноза геоэффективных солнечных событий, а вид адекватного спектра вариаций КЛ важен при решении обратных задач в методиках, использующих данные наземных наблюдений мировой сети станций КЛ.

Год 2023 начался с крайне резкого роста активности Солнца. За первую половину января

2023 г. на Солнце произошло более 100 вспышек, три из которых имели класс X. В марте 2023 г. солнечная активность не уменьшилась — в это время существовали 10 активных областей, 5 корональных дыр, и произошли несколько солнечных вспышек класса C (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/>). Вспышки сопровождались КВМ, которые стали причинами понижений интенсивности КЛ (т.е. Форбуш-эффектов (ФЭ) [7, 8]), наблюдавшихся на фоне геомагнитных возмущений.

Целью работы является исследование спектров вариаций и анизотропии КЛ в периоды Форбуш-эффектов 15 и 23.III.2023 (далее по тексту ФЭ-1 и ФЭ-2).

Начало ФЭ-1 было зарегистрировано мировой сетью станций КЛ 15.III.2023 около 04:00 UT. Амплитуда понижения интенсивности КЛ на высокоширотной ст. Оулу и среднеширотной ст. Иркутск составила ~4% (<https://www.nmdb.eu/>). ФЭ-1 сопровождался незначительным геомагнитным возмущением — *Dst*-индекс составил ~–30 нТл (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Согласно каталогу CCMC DONKI (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/>) 15.III.2023 в 03:48 UT на космических аппаратах (КА) *DSCOVR* и *ACE*, находящихся в точке Лагранжа

L1, наблюдалась межпланетная ударная волна (МУВ). Скорее всего, данная МУВ была вызвана KBM, зарегистрированным коронографом COR2 на КА *STEREO-A* 13.III.2023 в 10:53 UT. KBM был порожден вспышкой класса C3.1 (координаты E90) (<https://solarmonitor.org>) и с 10.36 по 10:53 UT сопровождался радиовсплесками II типа (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html). Скорость KBM составила ~ 1700 км/с. Результаты моделирования WSA-ENLIL+Cone (https://iswa.gsfc.nasa.gov/downloads/20230313_152500_2.0_anim.tim-den.gif) показали, что этот KBM прошел относительно Земли по касательной к северо-западу. Стоит отметить, что 15.III.2023 также в 08:25 UT МУВ наблюдалась и на КА *STEREO-A*, движущемся по гелиоцентрической орбите. При этом аппарат зарегистрировал аналогичное повышение скорости СВ и модуля ММП до 15 нТл.

23.III.2023 на Земле произошла геомагнитная буря, во время которой K_p -индекс составил 8, а Dst -индекс понизился до -163 нТл. Геомагнитная буря сопровождалась ФЭ-2, понижение интенсивности нейтронной компоненты составило $\sim -8\%$ на ст. Оулу и $\sim -6\%$ на ст. Иркутск. Предположительно, эти события были вызваны солнечной вспышкой класса C4.4 (координаты N30E22) и связанным с ней KBM типа гало, зарегистрированным коронографом *SOHO LASCO/C2* (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) 20.III.2023 в 14:42 UT. Скорость KBM составила ~ 1650 км/с. По оценке авторов работы [9] Земля в период данного ФЭ проходила через структуру в солнечном ветре (СВ) типа «магнитное облако» (МО). Наличие МО в этот период отмечено и в каталоге околоземных KBM Ричардсона и Кейн (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/>

[ismetable2.htm](https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/ismetable2.htm)). KBM также сопровождался радиовсплеском II типа.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

Для исследования использовались исправленные на давление данные мировой сети станций нейтронных мониторов (НМ) (33 НМ) (<https://www.nmndb.eu/>), а также данные комплекса мюонных телескопов (МТ) в Якутске (<https://www.usn.ru/ipm>) (счетчиковые телескопы с 5 направлениями приема частиц на глубинах 0, 7, 20 и 40 м водного эквивалента, всего 20 направлений) и мюонного годоскопа (МГ) УРАГАН (г. Москва) [10] (данные усреднены по трем супермодулям и сгруппированы по 5 группам зенитных углов) с временным разрешением 1 ч. Данные наблюдений МТ и МГ использовались без введения поправок на температуру.

Амплитуды модуляции КЛ отсчитывались от фонового уровня 12.III.2023.

Анализ проводился методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [11]. Этот метод позволяет по наземным наблюдениям КЛ на мировой сети станций определять ориентацию ММП, спектры вариаций и питч-угловую анизотропию первичных КЛ, изменение планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания, а также, при использовании данных МТ без введения поправок на температурный эффект, изменение среднемассовой температуры атмосфер в пунктах, где эти детекторы расположены.

В табл. 1 приведены ошибки рассчитываемых методом СГС величин в зависимости от статистической точности используемых данных наблюдений интенсивности КЛ [11]. Следует отметить, что приведенные погрешности

Таблица 1. Стандартные ошибки исследуемых величин для разных погрешностей измерения НМ и МТ

^(a) $\delta I_{\text{НМ}}$, %	^(б) $\delta I_{\text{МТ}}$, %	^(в) $\delta \lambda$, град	^(г) $\delta \Psi$, град	^(д) δA_0 , %	^(е) δA_1 , %	^(ж) δA_2 , %	^(з) δR_c , ГВ	^(и) $\delta T_{\text{ПС}}$, °С	^(к) $\delta T_{\text{СМ}}$, °С
± 0.1	± 0.1	± 16.9	± 21.5	± 1.0	± 8.8	± 1.7	± 0.03	± 1.3	± 0.3
	± 0.2	± 16.9	± 21.5	± 1.0	± 8.8	± 1.7	± 0.03	± 2.5	± 1.2
± 0.15	± 0.1	± 17.0	± 21.8	± 1.3	± 8.8	± 1.7	± 0.04	± 1.3	± 0.3
	± 0.2	± 17.0	± 21.8	± 1.3	± 8.8	± 1.7	± 0.04	± 2.5	± 1.0
± 0.2	± 0.1	± 17.5	± 22.1	± 1.6	± 8.9	± 1.8	± 0.05	± 1.3	± 0.3
	± 0.2	± 17.5	± 22.1	± 1.6	± 8.9	± 1.8	± 0.05	± 2.5	± 1.0

Примечание. (а), (б) – статистические ошибки данных наблюдений; (в), (г) – статистические ошибки определения долготных и широтных углов ориентации ММП; (д) – ошибка определения амплитуды изотропной составляющей спектра КЛ; (е), (ж) – ошибки определения амплитуды первой и второй гармоники питч-угловой анизотропии; (з) – ошибка изменения планетарной системы ЖГО; (и), (к) – ошибки определения температуры (ПС – приземный слой; СМ – среднемассовая температура).

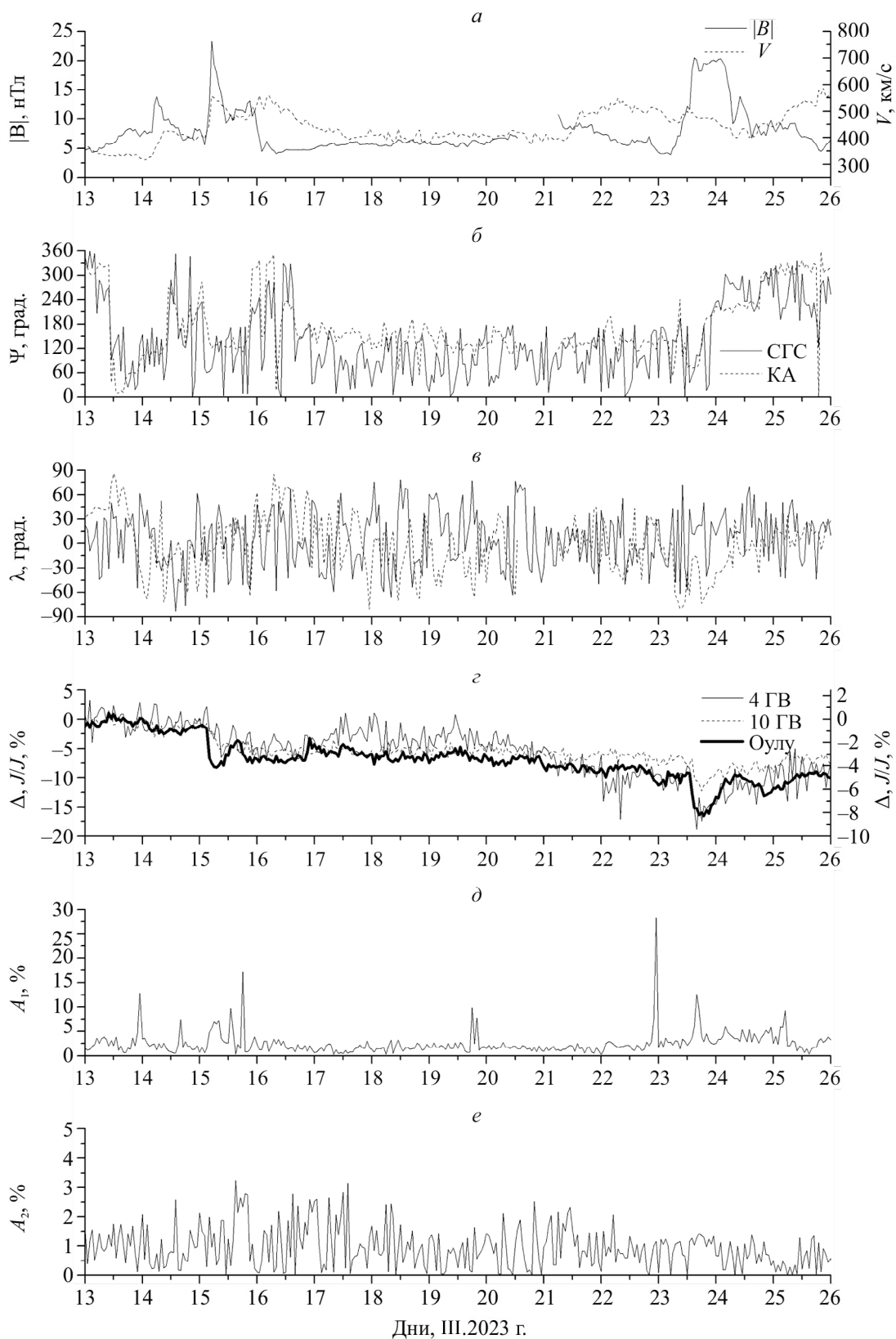


Рис. 1. (а) — Модуль ММП (сплошная линия) и скорость СВ (штриховая линия); (б), (в) — долгота и широта ориентации ММП (сплошная линия — расчет методом СГС, штриховая линия — измерения КА), (г) — вариации первичных КЛ с жесткостями 4 ГВ (сплошная линия) и 10 ГВ (штриховая линия) и вариации интенсивности КЛ, зарегистрированные НМ Оулу (толстая линия); (д), (е) — амплитуда первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии КЛ с жесткостью 4 ГВ.

обусловлены статистической точностью используемых исходных данных и не учитывают другие источники неопределенностей, например, ошибки модели и используемых аппроксимаций.

Полученные результаты интерпретированы в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [12], развиваемой в ИСЗФ СО РАН.

Результаты расчетов ориентации ММП сравнивались с данными прямых измерений (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 за период 13–26.III.2023 приведены значения модуля ММП, скорости СВ, долгота и широта ориентации ММП, вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 и 10 ГВ, вариации интенсивности КЛ, зарегистрированные НМ Оулу, амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ.

Рисунок 1 демонстрирует, что значительный эффект модуляции амплитуды ФЭ, изображенный изменениями вариаций интенсивности КЛ НМ Оулу (см. рис. 1г) связан с совокупностью одновременных изменений скорости СВ и величины ММП (см. рис. 1а). Параметры СВ отреагировали на межпланетные возмущения 15 и 23.III.2023. Прохождение КВМ (15 марта) и МО (23 марта) можно оценить по возрастанию модуля ММП, который увеличивался до 23.3 и 20.5 нТл, соответственно, а также по возрастанию скорости СВ до 500–550 км/с. При этом значительной отрицательной

величины B_z -компоненты 15 марта не наблюдалось, а 23 марта B_z -компонента ММП составила -18 нТл (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Наблюдается удовлетворительное согласие между углами ориентации ММП, полученными методом СГС и данными космических аппаратов (см. рис. 1б, 1в).

Понижения интенсивности изотропного потока первичных КЛ на орбите Земли для частиц с жесткостью 4 и 10 ГВ 15 марта было примерно одинаковым и составило около -4% , 23 марта — достигало $\sim -18\%$ для частиц с жесткостью 4 ГВ и $\sim -12\%$ для частиц с жесткостью 10 ГВ (см. рис. 1г).

Как следует рис. 1д в отдельные моменты рассматриваемого периода наблюдается сильная питч-угловая анизотропия КЛ первой гармоники, совпадающая с повышением модуля ММП (см. рис. 1а). Амплитуда A_1 15 марта возросла до $\sim 6-7\%$, 23 марта — до 12% .

Следует отметить, что повышение амплитуды второй гармоники питч-угловой анизотропии до $\sim 3\%$ наблюдалось только в период ФЭ-1 (см. рис. 1е). Появление A_2 указывает на то, что в данный момент Земля находилась в петлеобразной структуре ММП [5].

На рис. 2 представлены спектры вариаций первичных КЛ на разных этапах исследуемых событий (верхние панели — ФЭ-1), (нижние — ФЭ-2). Тонкой линией изображен спектр вариаций КЛ на начальной фазе, толстой линией — на фазе максимальной модуляции, пунктирной линией — на фазе восстановления. Видно, что спектры вариаций не являются степенными в

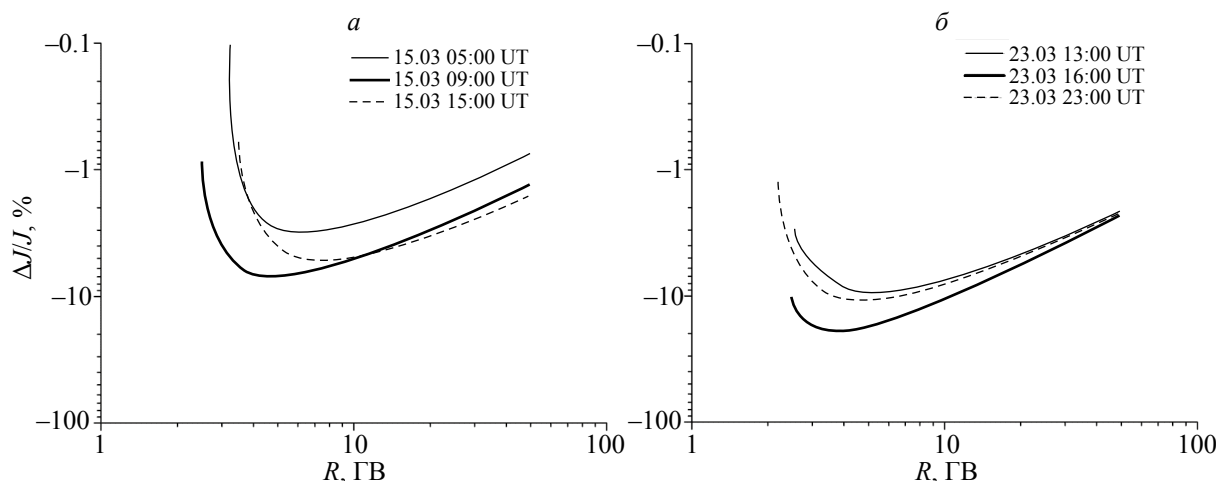


Рис. 2. Спектры вариаций на разных фазах развития исследуемых ФЭ: (а) — ФЭ-1, (б) — ФЭ-2 (сплошная линия — начальная фаза, толстая линия — фаза максимальной модуляции, штриховая линия — фаза восстановления).

Таблица 2. Значения показателя спектра при аппроксимации жесткостных спектров вариации первичных КЛ в области жесткостей более 10 ГВ степенной функцией на разных этапах исследуемых событий

ФЭ	Фаза события	Дата и время, UT	Показатель спектра γ
1	Спад	15.III.2023 05:00	−0.82
	Максимальная модуляция	15.III.2023 09:00	−0.87
	Восстановление	15.III.2023 15:00	−0.80
2	Спад	23.III.2023 13:00	−0.82
	Максимальная модуляция	23.III.2023 16:00	−0.96
	Восстановление	24.III.2023 23:00	−0.85

широком диапазоне жесткостей, как принято считать [13, 14]. Описать спектр вариаций степенной функцией можно только для жесткостей более 10 ГВ. Рассчитанные для этой области спектра показатели степенной функции приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что эти значения находятся в диапазоне от −0.8 до ~ −1.0. Это не

противоречит выводу авторов [13, 14], сделанному на основе наземных и подземных наблюдений мюонных компонент КЛ, о том, что, показатель спектра вариаций КЛ в периоды ФЭ близок к −0.8. Подобные измерения чувствительны к более высокой области энергий, чем измерения нейтронной компоненты.

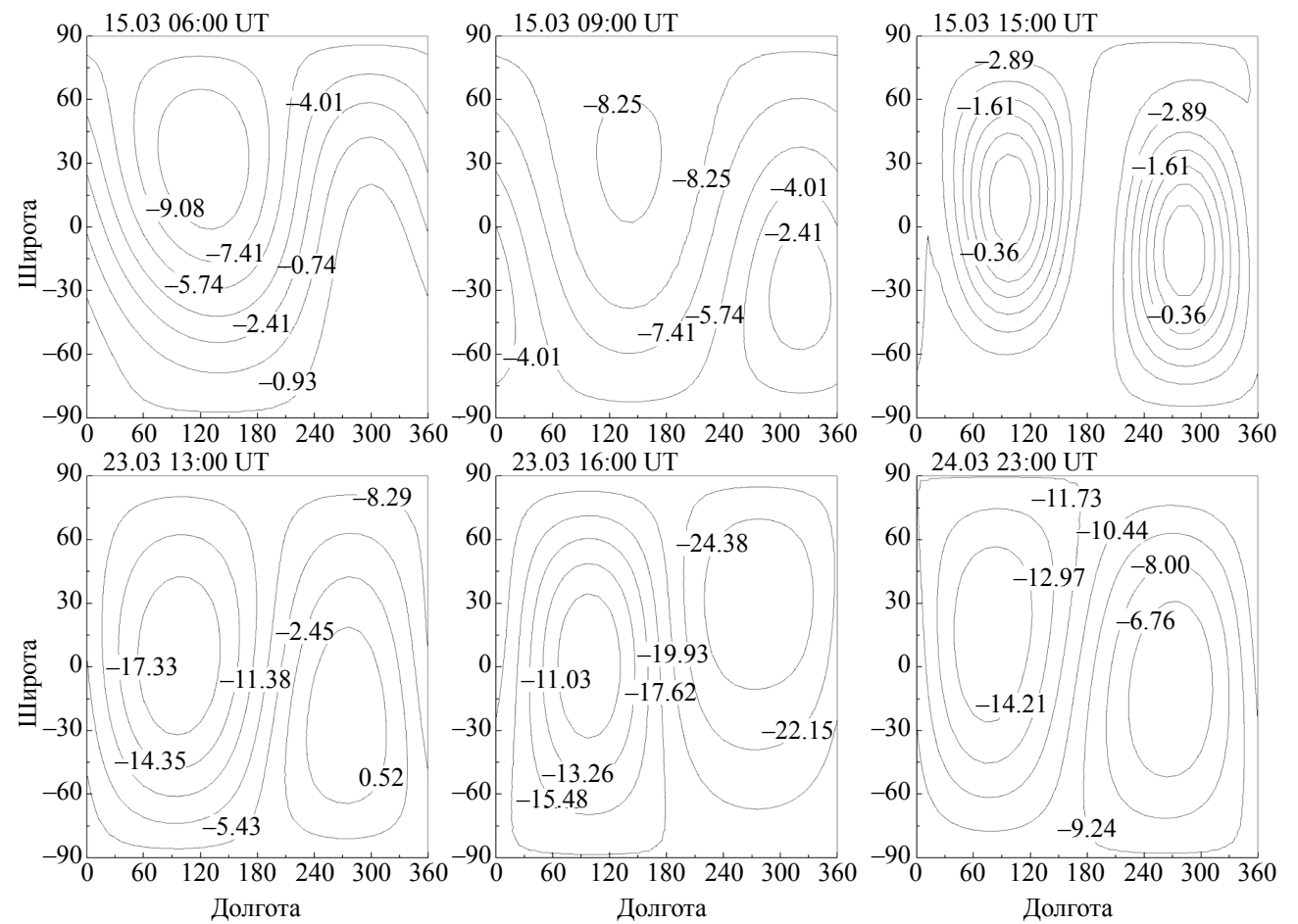


Рис. 3. Пространственное распределение первичных КЛ (в процентах) с жесткостью 4 ГВ в GSE системе координат на разных фазах ФЭ-1 (верхний ряд) и ФЭ-2 (нижний ряд). Слева направо: начальная фаза, фаза максимальной модуляции, фаза восстановления. По оси абсцисс отложены значения долготного угла Ψ , а по оси ординат — широтного угла λ .

Таблица 3. Относительные изменения интенсивности КЛ для частиц с жесткостями 4 ГВ в GSE системе координат на разных фазах развития ФЭ

ФЭ	Фаза события	Анизотропия	Координаты повышенного потока частиц
1	Спад	A_1	$\Psi = 312^\circ, \lambda = -42^\circ$
	Максимум	A_1	$\Psi = 324^\circ, \lambda = -30^\circ$
	Восстановление	A_2	$\Psi = 97^\circ, \lambda = 13^\circ$ и $\Psi = 282^\circ, \lambda = -11^\circ$
2	Спад	A_1	$\Psi = 276^\circ, \lambda = -24^\circ$
	Максимум		$\Psi = 96^\circ, \lambda = 0^\circ$
	Восстановление		$\Psi = 264^\circ, \lambda = -11^\circ$

Минимум спектров на фазе максимальной модуляции смещается в область меньших жесткостей для обоих рассмотренных ФЭ, а сами спектры вариаций КЛ смягчаются по сравнению со спектрами вариаций на других фазах этих событий.

На рис. 3 приведено пространственное распределение первичных КЛ (в процентах) с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе (GSE) координат (верхний ряд — ФЭ-1, нижний ряд — ФЭ-2) на разных фазах развития исследуемых ФЭ (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 . В табл. 3 приведено описание рис. 3.

Из рис. 3 и табл. 3 видно, что на фазе спада и максимума для ФЭ-1 наблюдается однонаправленная анизотропия, а на фазе восстановления — двунаправленная анизотропия. Для ФЭ-2 можно отметить ярко выраженную однонаправленную анизотропию на всех фазах события, и возрастания двунаправленной анизотропии не наблюдается. Отсутствие A_2 свидетельствует о том, Земля находилась в МО или по терминологии [15] в структуре типа «сферомака», магнитные линии которого не соединены с Солнцем.

Ранее были исследованы ФЭ 20.XI.2003 [16] и 23.VI.2015 [17], которые качественно похожи на ФЭ 23.III.2023. Между этими ФЭ есть общие черты: наблюдались они после солнечных вспышек малой мощности (ФЭ 20.XI.2003 и 23.VI.2015 связаны со вспышками класса M), которые сопровождалась КВМ в виде МО; развивались на фоне сильных геомагнитных бурь и имели большую амплитуду модуляции КЛ; доминировала первая гармоника питч-угловой анизотропии; обнаружена конфигурация типа «сферомака» и получены близкие по значению показателя спектра γ .

4. ВЫВОДЫ

Определены дифференциальные жесткостные спектры вариаций первичных КЛ на разных фазах ФЭ. Показано, что в широком диапазоне жесткостей эти спектры не являются степенными по жесткости.

Установлено, что спектр вариаций первичных КЛ для обоих рассматриваемых ФЭ описывается степенной функцией только для жесткостей выше 10 ГВ. Показатель спектра для жесткостей выше 10 ГВ меняется в пределах $\sim 0.8-1.0$ для обоих событий, наиболее мягкий спектр наблюдался на фазе максимальной модуляции.

По поведению первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии и пространственному распределению КЛ в периоды обоих событий установлено, что Земля в эти периоды входила в магнитные ловушки ММП. При этом для ФЭ-1 наблюдалась петлеобразная конфигурация ММП, а для ФЭ-2 — конфигурация типа «сферомака» с замкнутыми силовыми линиями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>) и Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников В.М., Матюхин Ю.Г. Эффекты модуляции космических лучей в коротяирующих магнитных ловушках солнечного ветра // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1979. Т. 43. № 12. С. 2573–2576.
2. Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др. Новый метод исследования анизотропии косми-

- ческих лучей. Исследование по геомагнетизму и аэронауке. М.: Наука, 1966. 105 с.
3. *Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V.* Analysis of cosmic ray pitch-angle anisotropy during the Forbush-effect in June 1972 by the method of spectrographic global survey // *Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf., La Jolla. 1983. V. 3. P. 249–252.*
 4. *Chen J., Bieber J.* Cosmic-ray anisotropies and gradients in three dimensions // *Astrophys. J.* 1993. V. 405. Iss. 1. P. 375–389.
 5. *Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. et al.* Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~ 1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 12579–12592. DOI: 10.1029/1999JA000331.
 6. *Kravtsova M.V., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E.* Ground level enhancements of cosmic rays on October–November 2003 // *J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys.* 2021. Art.ID. 105707. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105707>.
 7. *Forbush S.E.* On the effects in the cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // *Phys. Rev.* 1937. V. 51. P. 1108–1110.
 8. *Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А. и др.* Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2001. Т. 65. № 3. С. 373–376.
 9. *Gololobov P.Yu., Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G. et al.* Forecast of Intense Geomagnetic Storms in February–March 2023, Based on Measurements of Galactic Cosmic Ray Intensity Fluctuations // *Physics of Atomic Nuclei.* 2024. V. 87. Iss. 1. P. 208–214. DOI: 10.1134/S1063778824010198.
 10. *Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* Real-time data of muon hodoscope URAGAN // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56. Iss. 12. P. 2693–2705. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.003>.
 11. *Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E.* A proposal to extend the spectrographic global survey method // *J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys.* 2022. V. 235. Art.ID 105887. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105887>.
 12. *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. DOI: 10.7868/S001679401304007X [Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., and Sdobnov V.E., Diagnostics of the electromagnetic characteristics of the interplanetary medium based on cosmic ray effects // *Geomagn. Aeron.* 2013. V. 53. Iss. 4. P. 430–440.].
 13. *Кузьмин А.И.* Вариации космических лучей высоких энергий. М.: Наука, 1964. 126 с.
 14. *Крымский Г.Ф.* Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве. М.: Наука, 1969. 152 с.
 15. *Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M. et al.* Filament Eruptions, CMEs, and Shocks in the 18 November 2003 Event and Causes of the 20 November Geomagnetic Superstorm. IV. Enigmatic Source of the Geomagnetic Superstorm // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 4653–4673. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0596-5>.
 16. *Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* Особенности модуляции космических лучей в октябре–ноябре 2003 г. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 5. С. 681–684. DOI: 10.7868/S0367676515050294. [Kravtsova, M.V. and Sdobnov, V.E., Features of Cosmic Ray Modulation in October and November 2003 // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2015. V. 79. Iss. 5. P. 627–630].
 17. *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. DOI: 10.7868/S0367676517020259; [Kravtsova, M.V. and Sdobnov, V.E., Analyzing the June 2015 Forbush effect by the spectrographic global survey // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2017. V. 81. Iss. 2. P. 177–179].