

## МОНИТОРИНГ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, МАГНИТОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ПЕРИОДЫ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ В КОНЦЕ АВГУСТА 2005 Г.

### MONITORING OF NEAR-EARTH SPACE, EARTH'S MAGNETOSPHERE AND ATMOSPHERE DURING FORBUSH DECREASES IN AUGUST 2005

**И.И. Ковалев** 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, ivankov@iszf.irk.ru*

**М.В. Кравцова** 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, rina@iszf.irk.ru*

**С.В. Олемской** 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, osv@iszf.irk.ru*

**В.Е. Сдобнов**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, sdobnov@iszf.irk.ru*

**С.А. Стародубцев** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, starodub@ikfia.sbras.ru*

**I.I. Kovalev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, ivankov@iszf.irk.ru*

**M.V. Kravtsova**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, rina@iszf.irk.ru*

**S.V. Olemskoy**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, osv@iszf.irk.ru*

**V.E. Sdobnov**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, sdobnov@iszf.irk.ru*

**S.A. Starodubtsev**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.sbras.ru*

**Аннотация.** Приводятся результаты мониторинга состояния околоземного межпланетного пространства, магнитосферы и атмосферы Земли во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра в конце августа 2005 г. Мониторинг проводился с использованием данных наземных наблюдений космических лучей (КЛ) на мировой сети нейтронных мониторов с привлечением данных мюонных телескопов, расположенных в Якутске и Новосибирске. В результате проведенного разными методами анализа данных определены свойства вариаций интенсивности КЛ различных жесткостей на орбите Земли и их питч-угловая анизотропия, ориентация и конфигурация межпланетного магнитного поля, изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обреза в периоды геомагнитных возмущений, а также среднemasовая температура над станциями КЛ, на которых установлены мюонные телескопы. В периоды геомагнитных возмущений определены параметры кольцевого тока и токов на магнитопаузе.

**Ключевые слова:** космические лучи, форбуш-эффект, магнитосфера, атмосфера.

**Abstract.** We present the results of near-Earth interplanetary space, magnetosphere, and atmosphere monitoring during large-scale solar wind disturbances at the end of August 2005. The monitoring was carried out using ground-level cosmic ray (CR) observations made at the worldwide network of neutron monitors as well as muon telescopes in Yakutsk and Novosibirsk. As a result of the analysis performed by different methods, we have obtained variation properties of CRs of different rigidities in Earth's orbit, their pitch angle anisotropy, orientation and configuration of the interplanetary magnetic field, changes in the planetary system of geomagnetic cutoff rigidities during geomagnetic disturbances, as well as mass average air temperature over CR stations equipped with muon telescopes. For the periods of geomagnetic disturbances, we have determined parameters of magnetospheric ring current and magnetopause currents.

**Keywords:** cosmic rays, Forbush effect, magnetosphere, atmosphere.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением в области современных исследований вариаций интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) является изучение состояния гелиосферы, магнитосферы и атмосферы на основе наземных измерений потоков КЛ. Наблюдаемые вариации КЛ представляют собой интегральный результат модуляции потока КЛ вследствие различных физических явлений на Солнце,

в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. Измеряемая на поверхности Земли интенсивность КЛ зависит от метеорологических параметров (например, температуры и давления воздуха), состояния геомагнитного поля, а также от так называемой космической погоды — физических условий на Солнце и в гелиосфере. В соответствии с этим вариации КЛ можно разделить на три класса: I — метеорологического происхождения, II — обуслов-

ленные изменениями магнитного поля Земли и III — обусловленные изменениями космической погоды, которая определяется уровнем активности Солнца. К последнему классу вариаций КЛ относятся спорадические наземные возрастания потока солнечных КЛ (СКЛ) и понижения интенсивности ГКЛ, известные как форбуш-эффекты (ФЭ) [Forbush, 1937; Белов и др., 2001], которые часто сопровождаются геомагнитными возмущениями.

При использовании данных наземных наблюдений КЛ для решения задач, связанных с мониторингом явлений в межпланетной среде, магнитосфере и атмосфере Земли, необходимы непрерывная регистрация интенсивности различных компонент КЛ и применение специальных методик обработки данных, позволяющих использовать всю мировую сеть станций как единый многоканальный и многонаправленный прибор.

В данной работе на основе наблюдений интенсивности КЛ на мировой сети нейтронных мониторов (НМ), а также измерений с помощью мюонных телескопов (МТ) на ст. «Якутск» и «Новосибирск» были изучены вариации жесткостного спектра, анизотропии ГКЛ, изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания (ЖГО) КЛ, а также температурных характеристик атмосферы в Якутске и Новосибирске в конце августа 2005 г.

Исследуемый период времени характеризуется значительным энерговыделением в активной области (АО) 10798, которая возникла в центре небольшой корональной дыры (КД). Особенности эволюции АО 10798 детально рассмотрены в работе [Asai et al., 2009]. Эта АО породила три вспышки класса М. Две вспышки произошли 22 августа 2005 г.: первая (S11W54) характеризовалась рентгеновским классом M2.6, вторая (S13W65) — M5.6. Третья вспышка (S14W90) класса M2.7 произошла 23 августа 2005 г. Каждая вспышка сгенерировала корональный выброс массы (КВМ) типа гало [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/UNIVERSAL\_vr1/2005\_08/univ2005\_08.html]. Все КВМ (обозначим их КВМ-1, КВМ-2 и КВМ-3) имели высокие скорости: около 1200, 2400 и 1900 км/с соответственно. В поле зрения коронографа LASCO/SOHO КВМ-1 попал 22.08.2005 в 01:31 UT, КВМ-2 — 22.08.2005 в 17:30 UT и КВМ-3 — 23.08.2005 в 14:54 UT. Каждый КВМ был связан с радиовсплеском II типа [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/radio/waves\_type2.html]. Этот тип радиовсплеска можно рассматривать как признак распространяющейся ударной волны, способной ускорять частицы. Особенно быстрым был КВМ-2. Он наблюдался примерно через 16 ч после регистрации КВМ-1. Во время движения к Земле КВМ-2 догнал более медленный КВМ-1 и соединился с ним, затем наблюдался КВМ-3. Серия последовательных высокоскоростных КВМ создала межпланетное возмущение, при котором на фоне высокоскоростного потока солнечного ветра (СВ) (скорость свыше 700 км/с) (рис. 1, б) наблюдались резкое возрастание модуля межпланетного магнитного поля (ММП) до ~55 нТл (рис. 1, а) и южная  $B_z$ -компонента ММП до -30 нТл [https://omniweb.gsfc.nasa.gov]. Свя-

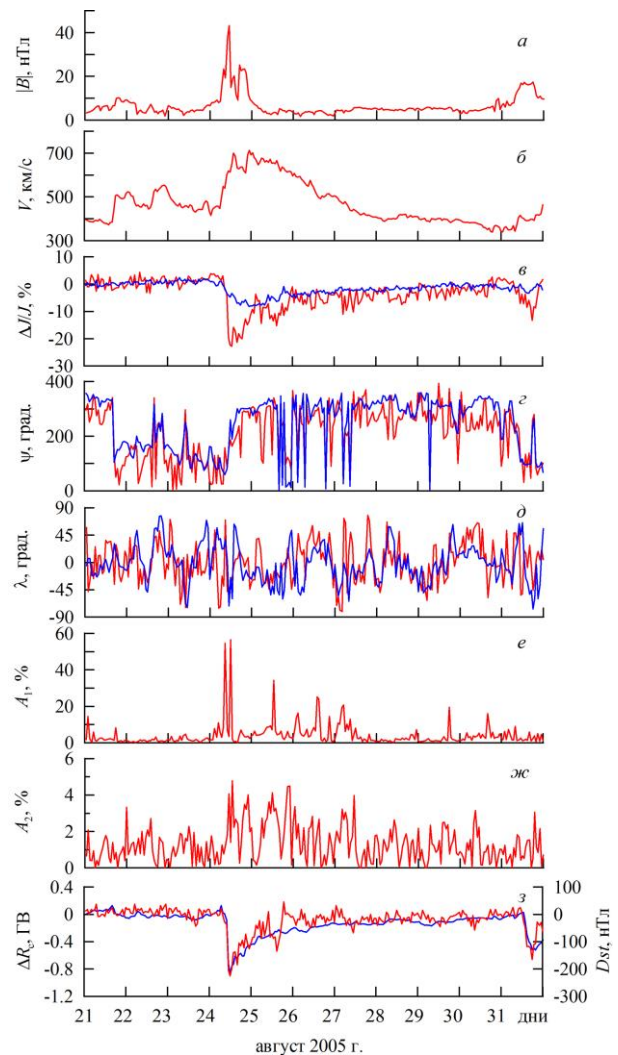


Рис. 1. Модуль ММП (а) и скорость СВ (б); изотропная составляющая вариаций КЛ (в) с жесткостью 4 ГВ (красная линия) и 10 ГВ (синяя линия); долготные (з) и широтные (д) углы ориентации ММП: красная линия — расчет методом СГС, синяя линия — экспериментальные данные; первая (е) и вторая (ж) гармоники питч-угловой анизотропии КЛ с жесткостью 4 ГВ; изменения (з) ЖГО в Иркутске (красная линия) и  $Dst$ -индекса (синяя линия)

званная с прохождением КВМ квазиперпендикулярная межпланетная ударная волна (МУВ) была зарегистрирована находившимся в точке либрации L1 космическим аппаратом (КА) ACE 24 августа 2005 г. в 05:37 UT и характеризовалась средним углом между направлением вектора ММП и нормалью к фронту МУВ  $\Theta_{Вн}=64.6^\circ$  [https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks]. Она была зарегистрирована также находившимся вблизи точки L1 КА WIND ( $\Theta_{Вн}=66.8^\circ$ ). Двадцать четвертого августа 2005 г. началась геомагнитная буря с минимальным  $Dst$ -индексом -216 нТл (рис. 1, з). Одновременно с геомагнитной бурей на Земле был зарегистрирован ФЭ (далее по тексту ФЭ-1) со значительными амплитудами -6÷-8 % на полярных и среднеширотных станциях КЛ.

На фазе восстановления интенсивности ГКЛ 30 августа 2005 г. произошел второй ФЭ (далее по тексту ФЭ-2) с амплитудой понижения интенсивности КЛ более 2 % на высокоширотных станциях КЛ, кото-

рый также сопровождался геомагнитной бурей с понижением  $Dst$ -индекса до  $-131$  нТл (рис. 1, з). По данным КА WIND [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/radio/waves\\_type2.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html)], эти геоэффективные события были связаны с залимбовой вспышкой, которая и вызвала 29 августа в 10:24 UT КВМ типа гало. Скорость его составляла 1600 км/с. Однако в это время МУВ на КА ACE и WIND не была зарегистрирована [<https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks/>]. Начиная с 11:10 UT наблюдался всплеск II типа в метровом радиодиапазоне [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/radio/waves\\_type2.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html)]. Межпланетное возмущение проявилось в возрастании скорости СВ до 460 км/с, модуля ММП свыше 17 нТл (рис. 1, а, б) [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>].

Профили ФЭ-1 и ФЭ-2 различны. ФЭ-1 характеризовался внезапным началом и сопровождался резким понижением интенсивности КЛ, при этом  $B_z$ -компонента ММП была около  $-41$  нТл. ФЭ-2 начинался постепенно и  $B_z$ -компонента ММП составляла примерно  $-16$  нТл. В работе [Абунин и др., 2012] показано, что ФЭ с внезапным началом обусловлены КВМ, в то время как значительная часть событий с постепенным началом связана с высокоскоростными потоками плазмы из КД. В нашем случае для ФЭ-2 с постепенным началом утверждение авторов работы [Абунин и др., 2012] не однозначно, поскольку в это время в межпланетном пространстве наблюдался быстрый КВМ типа гало, который может быть связан с КД [Verma, 1998; Liu, Hayashi, 2006].

## ДААННЫЕ И МЕТОД

Для анализа мы использовали усредненные за один час данные как мировой сети НМ (44 НМ) [<https://www.nmdb.eu>], исправленные на давление, так и МТ на станциях КЛ «Якутск» (5 направлений прихода частиц) [<https://ysn.ru/ipm/yktMT00>] и «Новосибирск» (22 направления прихода частиц) [<https://cosm-rays.ipgg.sbras.ru>]. Амплитуды модуляции интенсивности КЛ отсчитывались от спокойного фонового уровня 20 августа 2005 г.

Для анализа параметров солнечной активности, ММП и СВ использовались данные, представленные в каталогах [<https://www.solarmonitor.org>; <https://cdaw.gsfc.nasa.gov>; <https://lweb.cfa.harvard.edu>; <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>].

При анализе данных измерений КЛ применялся метод спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov, Sdobnov, 1997; Kovalev et al., 2022], с помощью которого по данным наземных наблюдений возможно определять и изучать вариации жесткостного спектра и анизотропии КЛ, изменения планетарной системы ЖГО за каждый час измерений, а также оценивать среднemasсовую температуру атмосферы в пунктах наблюдения мюонов. Эффективность метода СГС при решении задач солнечно-земной физики доказана во многих публикациях, например, в [Grigoryev et al., 2009; Alania et al., 2013; Кичигин и др., 2017; Ptitsyna et al., 2023].

В табл. 1 приведены ошибки рассчитываемых методом СГС величин в зависимости от статистической точности используемых данных наблюдений

интенсивности КЛ [Kovalev et al., 2022]. Следует отметить, что приведенные погрешности обусловлены статистической точностью используемых исходных данных и не учитывают другие источники неопределенностей, например, ошибки модели и используемых аппроксимаций.

Полученные результаты интерпретированы на основе модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [Дворников и др., 2013], развиваемой в ИСЗФ СО РАН. В отличие от общепринятой конвективно-диффузионной модели [Parker, 1958; Крымский, 1964], согласно которой модуляция КЛ происходит из-за изменения плотности частиц вследствие их выметания мелкомасштабными магнитными неоднородностями СВ, а возрастания интенсивности при солнечных вспышках — за счет солнечного источника, в нашей модели модуляция КЛ обусловлена изменением энергии частиц в электромагнитных полях гелиосферы различной природы. Наша модель позволяет объяснить высокую степень анизотропии КЛ при возмущениях СВ и солнечных протонных событиях, например, [Dvornikov, Sdobnov, 1997; Richardson et al., 2000].

Для расчета параметров магнитосферных токовых систем — радиусов кольцевого тока во внутренней магнитосфере ( $r_{DR}$ ) и токов на магнитопаузе ( $r_{DCF}$ ) — нами была использована информация об изменениях планетарной системы ЖГО, которая получена на основе метода СГС и простой осесимметричной модели магнитосферы: магнитное поле образовано дипольным полем Земли и двумя сферами с текущими по параллелям сфер токами противоположных направлений, величина которых пропорциональна косинусу широты [Кичигин, Сдобнов, 2017].

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже представлены результаты исследования методом СГС геоэффективных событий в межпланетном пространстве, магнитосфере и атмосфере Земли в конце августа 2005 г. по данным наблюдений КЛ.

На рис. 1 показаны данные прямых измерений параметров ММП и СВ, расчеты изменения изотропного потока КЛ с жесткостями 4 и 10 ГВ на границе магнитосферы, определенные углы ориентации ММП, поведение амплитуд первой ( $A_1$ ) и второй ( $A_2$  или двунаправленная анизотропия КЛ) сферической гармоник питч-угловой анизотропии КЛ с жесткостью 4 ГВ, рассчитанные изменения ЖГО в Иркутске, а также наблюдаемые значения  $Dst$ -индекса.

В период ФЭ-1 максимальная амплитуда понижения интенсивности КЛ для частиц с жесткостью 4 ГВ составила примерно 23 % в 13:00 UT, а для частиц с жесткостью 10 ГВ — около 8 % в 23:00 UT (см. рис. 1, в). Обращает на себя внимание тот факт, что, в отличие от ФЭ-1, ФЭ-2 проявился только в интенсивности КЛ с достаточно низкой жесткостью частиц 4 ГВ, хотя оба ФЭ сопровождалась сильными геомагнитными бурями.

На рис. 1, з, д видно хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений долготных и широтных углов ориентации ММП.



Таблица 1

Стандартные ошибки исследуемых величин для разных погрешностей измерения НМ и МТ [Kovalev et al., 2022]

$^1\delta I_{\text{НМ}}, \%$	$^2\delta I_{\text{МТ}}, \%$	$^3\delta\lambda, \text{град.}$	$^4\delta\Psi, \text{град.}$	$^5\delta A_0, \%$	$^6\delta A_1, \%$	$^7\delta A_2, \%$	$^8\delta R_c, \text{ГВ}$	$^9\delta T_{\text{ПС}}, \text{°C}$	$^{10}\delta T_{\text{СМ}}, \text{°C}$
±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

1, 2 — статистические ошибки данных наблюдений; 3, 4 — статистические ошибки определения долготных и широтных углов ориентации ММП; 5 — ошибка определения амплитуды изотропной составляющей спектра КЛ; 6, 7 — ошибки определения амплитуды первой и второй гармоники питч-угловой анизотропии; 8 — ошибка изменения планетарной системы ЖГО; 9, 10 — ошибки определения температуры: ПС — приземного слоя, СМ — среднемассовой.

В рамках модели модуляции КЛ электромагнитными полями гелиосферы [Дворников и др., 2013] возрастание амплитуд  $A_1$  наблюдается при росте напряженности ММП. Из рис. 1, *e* следует, что в отдельные моменты времени для частиц с жесткостью 4 ГВ наблюдается сильная анизотропия КЛ при увеличении модуля ММП  $|B|$  (см. рис. 1, *a*). Максимальные амплитуды  $A_1$  наблюдались 24 августа 2005 г. в 09:00–12:00 UT (54–56 %),  $|B| \approx 40$  нТл; 30 августа 2005 г. — в 14:00–15:00 UT (9–16 %),  $|B| \approx 9$  нТл и 31 августа 2005 г. — в 04:00–08:00 UT (4–9 %),  $|B| \approx 19$  нТл. Заметим, что 24–25 августа 2005 г. возрасла амплитуда  $A_2$  (жесткость частиц 4 ГВ) до 4–5 % при фоновых значениях 1–2 % (рис. 1, *ж*). В период геомагнитного возмущения 30–31 августа 2005 г. амплитуда  $A_2$  возросла практически до 3 % в 19:00 UT.

Поскольку изменения ЖГО ( $\Delta R_c$ ) и  $Dst$ -индекса отражают состояние основных магнитосферных токовых систем, то эти величины хорошо коррелируют между собой (см. рис. 1, *з*). Рассчитанный коэффициент линейной корреляции за период 20–31 августа 2005 г. составил 0.8, для магнитной бури 24 августа 2005 г. и ФЭ-1 он равен 0.9, а для магнитной бури 31 августа 2005 г. и ФЭ-2 — 0.8. При этом максимальное  $\Delta R_c$  в Иркутске в периоды геомагнитных возмущений совпадает с максимальным уменьшением  $Dst$ -индекса. Так, 24 августа 2005 г. в 12:00 UT,  $\Delta R_c$  составило  $-0.9$  ГВ,  $Dst = -216$  нТл, 31 августа 2005 г. в 18:00 UT —  $-0.66$  ГВ и  $-128$  нТл соответственно.

В периоды ФЭ в СВ в области орбиты Земли образуются структуры типа магнитных ловушек с характерным размером порядка 1 а.е. и более (вдоль спирального ММП). Подобные структуры могут возникнуть при распространении высокоскоростных потоков СВ. Степень регулярности поля внутри ловушек сравнительно велика. В соответствии с этим коэффициент питч-угловой диффузии мал. Модуляция происходит за счет изменения энергии частиц при их движении в регулярных полях СВ [Дворников, Матюхин, 1976].

При больших длинах транспортного пробега, когда возмущения траекторий движения незначительны, частицы «чувствуют» средний по ловушке эффект изменения энергии, который в данном слу-

чае является отрицательным. При этом время замедления для пролетных и захваченных частиц будет существенно различным, в результате чего будут различаться и амплитуды модуляции КЛ при больших и малых питч-углах [Дворников, Матюхин, 1979].

В отдельные моменты времени (см. рис. 1, *ж*) наблюдалась двунаправленная анизотропия КЛ большой амплитуды в угловом распределении частиц больших (несколько ГэВ) энергий, что свидетельствует, во-первых, о наличии структур типа магнитных ловушек (с размерами от 0.1 а.е. до нескольких а.е.), и, во-вторых, — о малости коэффициента диффузии в импульсном пространстве. Двунаправленная анизотропия, характеризующаяся дефицитом частиц с большими питч-углами, наблюдается после прохождения частицами областей с повышенной напряженностью ММП, а также структур ММП с ориентацией либо перпендикулярной паркерской спирали, либо противоположной по отношению к фоновой полярности поля. Данное обстоятельство указывает на вынос петлеобразных структур магнитного поля, которые, по мере своего движения от Солнца, вытесняют фоновое магнитное поле, деформируя его, особенно на фронте возмущения среды. Проникновение КЛ внутрь магнитной ловушки и выход из нее происходит за счет центробежного и градиентного дрейфов частиц, а понижение интенсивности — за счет изменения энергии КЛ при их движении в регулярных электромагнитных полях гелиосферы.

Судя по поведению модуля напряженности ММП и скорости СВ (см. рис. 1, *a, б*), 24 августа Земля вошла в область КВМ, что послужило причиной ФЭ и магнитной бури. Об этом свидетельствуют повышенные значения амплитуды первой гармоники питч-угловой анизотропии КЛ. Повышенные значения двунаправленной анизотропии 24–26 августа указывают на то, что Земля пересекала это образование с петлеобразной структурой ММП [Richardson et al., 2000].

Тридцать первого августа в межпланетном пространстве наблюдалось возрастание модуля ММП до 15–16 нТл, однако существенных возрастаний амплитуды  $A_1$  и  $A_2$  не наблюдается. Данный факт можно объяснить двумя причинами. Во-первых, эффекты

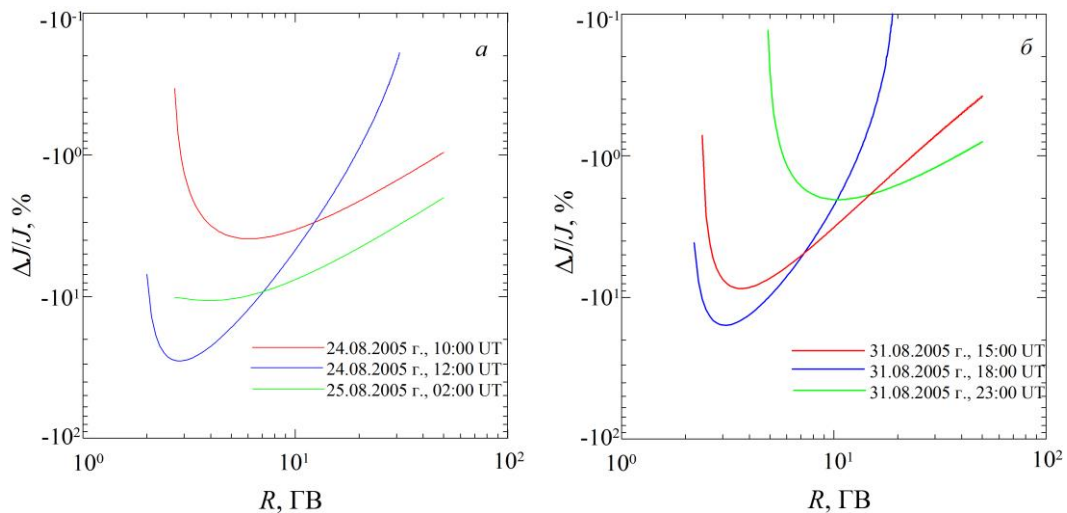


Рис. 2. Жесткостные спектры вариаций КЛ для отдельных моментов времени 24 августа 2005 г. (а) и 31 августа 2005 г. (б). Цветом помечены спектры на разных фазах развития ФЭ: спад — красная линия; максимальная модуляция — синяя линия; восстановление — зеленая линия

потери энергии высокоэнергичных частиц, а следовательно и понижение их интенсивности, будут наблюдаться только в том случае, когда частицы, перед тем как попасть на Землю, пересекают (за счет магнитного дрейфа) область с повышенной напряженностью магнитного поля. Таким образом, если, например, Земля попадет в область южной границы магнитной структуры с повышенной напряженностью поля, а скорость дрейфа направлена с юга на север, то эффект в КЛ высоких энергий наблюдаться не будет. Во-вторых, не будет наблюдаться эффект понижения интенсивности КЛ и в том случае, если не сформируется петлеобразная структура ММП, являющаяся магнитной ловушкой. В этом случае эффект повышения амплитуды второй гармоники будет отсутствовать [Cane et al., 2001], что и наблюдается в указанный период.

На рис. 2 приведены жесткостные спектры вариаций интенсивности ГКЛ в периоды геомагнитных возмущений 24 и 31 августа 2005 г. Видно, что вопреки устоявшемуся мнению [Кузьмин, 1964; Крымский, 1969] спектры вариаций КЛ в широком диапазоне жесткостей от единиц до десятков ГВ не описываются простой степенной функцией вида  $\Delta J/J \sim R^{-\gamma}$ . Описать таким образом спектры вариаций КЛ удастся только при жесткостях частиц выше 10–15 ГВ. Заметим, что в работах [Кузьмин, 1964; Крымский, 1969] вывод о том, что спектры вариаций КЛ описываются степенной функцией, сделан на основе исследований вариаций КЛ по данным наблюдений мюонов на разных уровнях в атмосфере и под землей, которые дают информацию о спектрах вариаций КЛ при жесткостях частиц выше 10 ГВ.

Из рис. 2 видно, что по мере развития ФЭ минимум спектра модуляции смещается сначала в область меньших жесткостей, а затем, на фазе восстановления, — в область больших жесткостей. Анализ показывает, что на фазе максимальной модуляции ФЭ при жесткостях более 10 ГВ показатель спектра вариаций КЛ при его аппроксимации степенной функцией становится больше, чем на фазах спада и

восстановления интенсивности КЛ. Наши расчеты показали, что на фазах спада и восстановления ФЭ показатель спектра вариаций КЛ  $\gamma$  составил  $-0.8$  и  $-0.9$  соответственно. На фазе же максимальной модуляции спектр становится существенно мягче:  $\gamma = -3.0$  (для ФЭ-1) и  $-5.0$  (для ФЭ-2).

На рис. 3 представлены относительные изменения интенсивности КЛ для частиц с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат (GSE) на разных фазах развития ФЭ. В табл. 2 приведено описание рис. 3.

Из рис. 3 и табл. 2 видно, что на фазах спада и восстановления ФЭ-1 доминирует  $A_1$ , а на фазе максимальной модуляции КЛ появляется  $A_2$ . Противоположная картина наблюдается для ФЭ-2 — на фазах спада и восстановления доминирует  $A_2$ , а на фазе максимальной модуляции КЛ —  $A_1$ .

В работе [Дворников, Матюхин, 1979] рассматривалось влияние коротящей магнитной ловушки ММП, которая является частным случаем крупномасштабных электромагнитных полей гелиосферы [Дворников и др., 2013], на распределение частиц по питч-углам и было показано, что при длинах транспортного пробега, превышающих размеры ловушки, захваченные частицы существенно замедляются и, соответственно, происходит анизотропное понижение интенсивности КЛ. Таким образом, возрастание амплитуд  $A_1$  и/или  $A_2$  авторы работы [Дворников, Матюхин, 1979] связывают с изменениями напряженности ММП и/или вхождением Земли в петлеобразные структуры ММП. Следовательно, присутствие двунаправленной анизотропии  $A_2$  в событиях 24 и 31 августа 2005 г. означает, что Земля попала в петлеобразную структуру ММП, являющуюся магнитной ловушкой.

На рис. 4 показаны результаты расчетов изменения ЖГО ( $\Delta R_c$ ) в зависимости от величины ЖГО ( $R_c$ ) на разных фазах геомагнитных возмущений 24 и 31 августа 2005 г. Из него следует, что в период магнитной бури 24 августа радиус кольцевого тока  $r_{DR}$  сначала уменьшился с 4.7 до 4.3 радиусов Земли

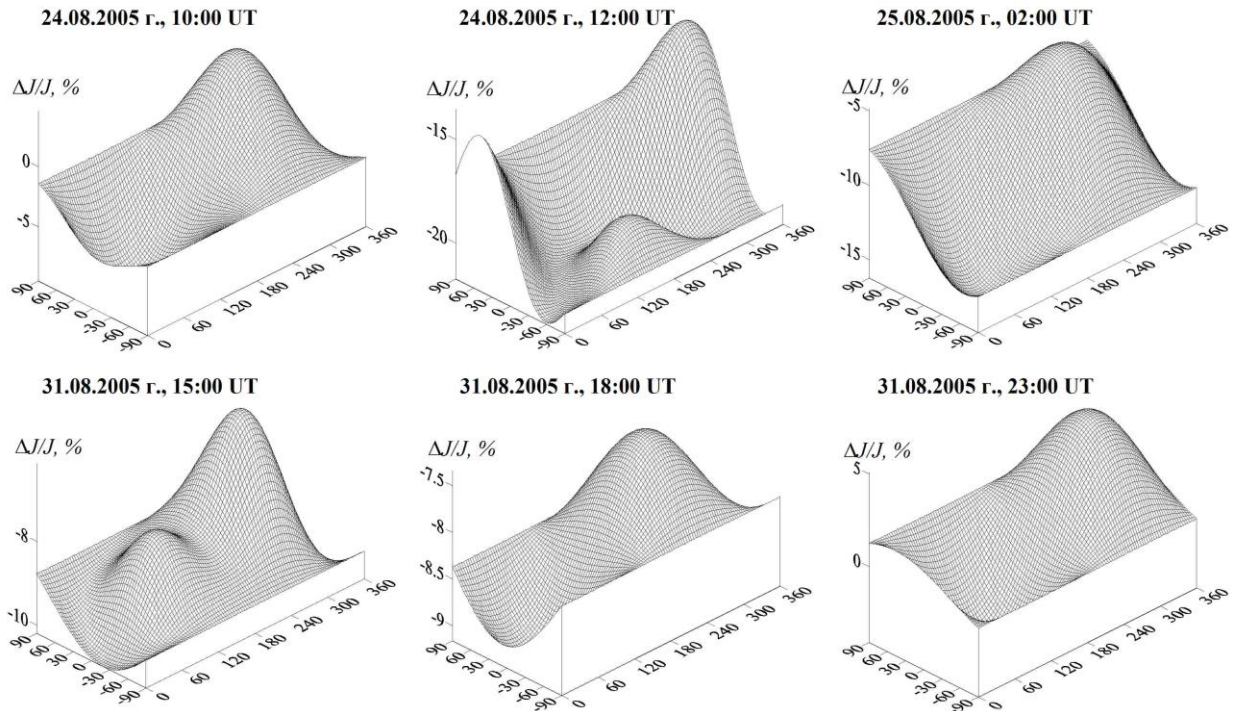


Рис. 3. Относительные изменения интенсивности КЛ для частиц с жесткостями 4 ГВ в GSE-координатах на разных фазах развития ФЭ (фаза спада, фазе максимальной модуляции и фазе восстановления): верхние панели — ФЭ-1; нижние панели — ФЭ-2. По оси абсцисс отложены значения долготного угла  $\psi$ , а по оси ординат — широтного угла  $\lambda$

Таблица 2

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

ФЭ	Фаза ФЭ	Дата	Время, UT	Гармоника пичч-угловой анизотропии	Направление потока ( $\psi$ — долгота, $\lambda$ — широта)
ФЭ-1	спад	24.08.2005	10:00	$A_1$	$\psi \approx 270^\circ, \lambda \approx 30^\circ$
	максимальная модуляция	24.08.2005	12:00	$A_2$	$\psi \approx 150^\circ, \lambda \approx -45^\circ$ и $\psi \approx 340^\circ, \lambda \approx 60^\circ$
	восстановление	25.08.2005	02:00	$A_1$	$\psi \approx 285^\circ, \lambda \approx 25^\circ$
ФЭ-2	спад	31.08.2005	15:00	$A_2$	$\psi \approx 105^\circ, \lambda \approx 0^\circ$ и $\psi \approx 260^\circ, \lambda \approx 15^\circ$
	максимальная модуляция	31.08.2005	18:00	$A_1$	$\psi \approx 240^\circ, \lambda \approx 25^\circ$
	восстановление	31.08.2005	23:00	$A_2$	$\psi \approx 105^\circ, \lambda \approx -75^\circ$ и $\psi \approx 285^\circ, \lambda \approx 15^\circ$

( $R_E$ ), а затем возрос до  $5.4R_E$ . При этом расстояние до подсолнечной точки, которое ассоциируется с  $r_{DCF}$ , 24 августа в 12:00 UT уменьшилось от  $8.6R_E$  до  $6.0R_E$ , а потом снова увеличилось до  $9.0R_E$ . В период же геомагнитной бури 31 августа  $r_{DR}$  уменьшился с  $4.8R_E$  в начале события до  $2.3R_E$  в 23:00 UT, однако  $r_{DCF}$  в этот период не менялся.

Следует отметить, что в моменты максимальных геомагнитных возмущений наблюдаются существенные расхождения зависимостей изменения ЖГО от ЖГО, рассчитанных по данным мировой сети станций КЛ и в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током [Кичигин, Сдобнов, 2017]. По-видимому, в это время в магнитосфере Земли появляются или усиливаются другие токовые системы, которые не учитываются в применяемой нами модели [Кичигин, Сдобнов, 2017].

Немаловажной особенностью этой работы является использование данных мюонных телескопов без введения температурных поправок. Это позволило, во-первых, улучшить надежность получаемой информации в высокоэнергичной области спектра вариаций ГКЛ и, во-вторых, определить температурные характеристики атмосферы над пунктами размещения мюонных детекторов.

Поскольку образование мюонов происходит на высотах ниже 13–15 км, то становится возможным получать информацию о температуре на стандартных изобарических уровнях в атмосфере по данным наземных измерений заряженных частиц. Для этого необходимо в каждом пункте иметь данные наблюдений на станциях КЛ, на которых установлены мюонные детекторы, характеризующиеся хорошей статистической точностью, различными коэффициен-



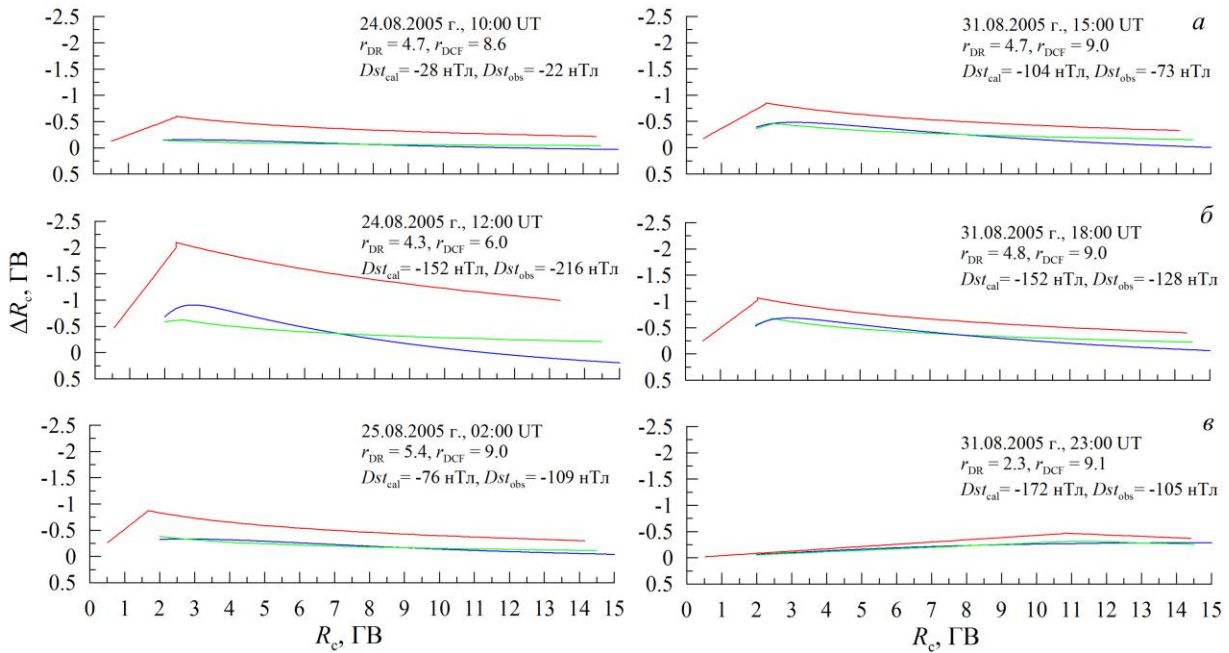


Рис. 4. Зависимость изменения ЖГО от ЖГО на начальной фазе (а), на фазах максимума (б) и восстановления (в) во время магнитных бурь в конце августа 2005 г. (слева — 24 августа 2005 г.; справа — 31 августа 2005 г.): синяя линия — результаты, полученные методом СГС по данным наземных наблюдений КЛ; зеленая — результаты расчетов по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы; красная линия — вклад в изменение ЖГО кольцевого тока, рассчитанного по осесимметричной модели магнитосферы. Справа приведены: дата,  $r_{DR}$  и  $r_{DCF}$ , наблюдаемый и расчетный  $Dst$ -индекс

тами связи и плотностью температурных коэффициентов [Дорман, 1957]. При этом число направлений прихода частиц на детектор должно существенно превышать число изобарических уровней. К сожалению, мы не имеем данных приборов с такими характеристиками, поэтому с приемлемой точностью можем рассчитать только среднюю температуру. В отсутствие регулярных и достаточно частых наблюдений характеристик атмосферы на шаразондах это важно для решения целого ряда прикладных задач в различных областях науки.

На рис. 5 показана рассчитанная нами средне-массовая температура атмосферы над мюонными телескопами в Новосибирске и Якутске вместе с данными прямыми аэрологическими наблюдениями [ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1]. Ошибки определения средне-массовой температуры атмосферы не превышают  $\pm 1.2^\circ$  (см. табл. 1). Из рис. 5 видно вполне удовлетворительное согласие рассчитанных значений средне-массовой температуры с данными наблюдений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По наземным наблюдениям КЛ на мировой сети нейтронных мониторов с привлечением данных мюонных телескопов, расположенных в Якутске и Новосибирске, проведен мониторинг состояния околоземного космического пространства, магнитосферы и атмосферы Земли во время крупномасштабных возмущений межпланетной среды во второй половине августа 2005 г. Определены вариации КЛ различных жесткостей на орбите Земли и амплитуды их питч-угловой анизотропии, получена информация

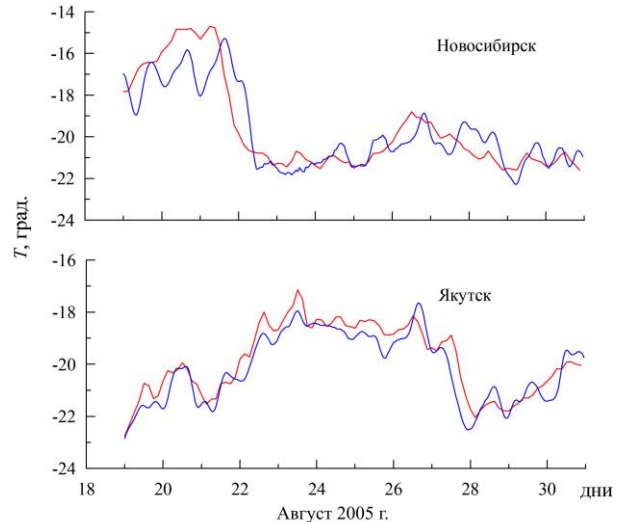


Рис. 5. Временной ход средне-массовой температуры атмосферы во второй половине августа 2005 г.: синяя линия — расчет методом СГС с привлечением данных наблюдений над станциями КЛ в Новосибирске и Якутске, где установлены МТ; красная линия — данные наблюдений [ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1]

об ориентации и конфигурации ММП, изменения планетарной системы ЖГО в периоды сильных геомагнитных возмущений.

Установлено, что во время ФЭ Земля находилась в крупномасштабных электромагнитных полях СВ с петлеобразными структурами ММП.

Определены дифференциальные жесткостные спектры вариаций КЛ на разных фазах ФЭ. Показано, что в широком диапазоне жесткостей эти спектры не описываются простым степенным законом. Им

можно описать спектры вариаций интенсивности КЛ только при жесткостях частиц более 10 ГВ. При этих жесткостях для фазы спада и восстановления ФЭ-1 и ФЭ-2 показатели спектров составили  $\gamma \approx -0.8$  и  $\gamma \approx -0.9$  соответственно, что согласуется с выводами работ [Кузьмин, 1964; Крымский, 1969]. В периоды максимальной модуляции КЛ спектры вариаций при жесткостях выше 10 ГВ существенно мягче:  $\gamma \approx -3.0$  и  $\gamma \approx -5.0$  соответственно для геоэффективных событий космической погоды 24 августа и 31 августа 2005 г., притом что эти события различаются как по профилю изменений интенсивности КЛ, наблюдаемой на станциях, так и по величине отклика магнитосферы на воздействие возмущений СВ.

В периоды геомагнитных возмущений 24 августа 2005 г. радиус кольцевого тока  $r_{DR}$  изменялся на начальной фазе развития магнитной бури от значения  $4.7R_E$  до  $4.3R_E$ . На восстановительной фазе  $r_{DR} \sim 5.0R_E$ . В этот период положение подсолнечной точки  $r_{DCF}$  изменялось от  $\sim 9.0R_E$  до  $\sim 6.0R_E$  и возвращалось к исходным значениям. В событии 31 августа  $r_{DR}$  изменялся от  $\sim 4.7R_E$  на начальной фазе развития магнитной бури до  $\sim 2.3R_E$ , при этом положение подсолнечной точки ( $r_{DCF} \sim 9.0R_E$ ) не изменялось.

Использование в методе СГС данных МТ без введения температурных поправок, с одной стороны, улучшает устойчивость решения системы уравнений в высокоэнергичной области, с другой стороны, дает возможность получения среднemasсовой температуры атмосферы над пунктами регистрации КЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, ИКФИА СО РАН (код научной темы FWRS-2021-0012, номер государственного учета в ЕГИСУ НИОКТР 122011700180-7). 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

- Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2012. Т. 52, № 3. С. 313–320.
- 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.
- Дворников В.М., Матюхин Ю.Г. Энергетические потери космических лучей при движении в регулярном магнитном поле солнечного ветра. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1976. Т. 39, № 3. С. 624–626.
- Дворников В.М., Матюхин Ю.Г. Эффекты модуляции космических лучей в коротящих магнитных ловушках солнечного ветра. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1979. Т. 43, № 12. С. 2573–2576.
- 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](https://doi.org/10.7868/S001679401304007X).
- Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Госизд-во технико-теоретической литературы, 1957. 492 с.
- Кичигин Г.Н., Сдобнов В.Е. Жесткости геомагнитного обреза космических лучей в модели ограниченной

магнитосферы с кольцевым током. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2017. Т. 57, № 2. С. 149–153. DOI: [10.7868/S0016794017020043](https://doi.org/10.7868/S0016794017020043).

Кичигин Г.Н., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Параметры токовых систем в магнитосфере по данным наблюдений космических лучей в период магнитной бури в июне 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 15–19. DOI: [10.12737/stp-33201702](https://doi.org/10.12737/stp-33201702).

Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей. *Геомагнетизм и аэронаука*. 1964. Т. 4, № 6. С. 977–986.

Крымский Г.Ф. Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве. М.: Наука, 1969. 152 с.

Кузьмин А.И. Вариации космических лучей высоких энергий. М.: Наука, 1964. 126 с.

Alania M.V., Wawrzynczak A., Sdobnov V.E., Kravtsova M.V. Temporal changes in the rigidity spectrum of Forbush. *Solar Phys.* 2013. Vol. 286. P. 561–576. DOI: [10.1007/s11207-013-0273-0](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0273-0).

Asai A., Shibata K., Ishii T.T., et al. Evolution of the anemone AR NOAA 10798 and the related geo-effective flares and CMEs. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A00A21. DOI: [10.1029/2008JA013291](https://doi.org/10.1029/2008JA013291).

Cane H.V., Richardson I.G., Wibberenz G., et al. Cosmic ray evidence for magnetic field line disconnection inside interplanetary coronal mass ejections. *Proc. 27<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf.* Hamburg, Germany, August 2001. 2001. Vol. 9. P. 3531–3534.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Time variations of the cosmic ray distribution function during a solar event of September 29, 1989. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, A11. P. 24209–24219.

Forbush S.E. On the effects in the cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. *Phys. Rev.* 1937. Vol. 51. P. 1108–1110.

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Estimation of the solar proton spectrum in the GLE70 event. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43. P. 515–517. DOI: [10.1016/j.asr.2008.08.010](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.08.010).

Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2022. Vol. 235, 105887. DOI: [10.1016/j.jastp.2022.105887](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105887).

Liu Y., Hayashi K. The 2003 October–November fast halo coronal mass ejections and the large-scale magnetic field structures. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 640, 1135. DOI: [10.1086/500290](https://doi.org/10.1086/500290).

Parker E.N. Cosmic ray modulation by the solar wind. *Phys. Rev.* 1958. Vol. 110, no. 6. P. 328–334.

Ptitsyna N.G., Danilova O.A., Tyasto M.I., Sdobnov V.E. Cosmic ray cutoff rigidity governing by solar wind and magnetosphere parameters during the 2017 Sep 6–9 solar-terrestrial event. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2023. Vol. 246. 106067. DOI: [10.1016/j.jastp.2023.106067](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106067).

Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta. *JGR*. 2000. Vol. 105, no. A6. P. 12579–12591. DOI: [10.1029/1999JA000331](https://doi.org/10.1029/1999JA000331).

Verma V.K. On the origin of solar coronal mass ejections. *J. Ind. Geophys. Union*. 1998. Vol. 2. P. 65–74.

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL\\_ver1/2005\\_08/univ2005\\_08.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver1/2005_08/univ2005_08.html) (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/radio/waves\\_type2.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html) (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://web.cfa.harvard.edu/shocks> (дата обращения 10 января 2024 г.).



URL: <https://www.nmdb.eu> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://ysn.ru/ipm/yktMT00> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://cosm-rays.ipgg.sbras.ru> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://www.solarmonitor.org> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://lweb.cfa.harvard.edu> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://cdaw.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 10 января 2024 г.).

URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536/> (дата обращения 10 января 2024 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Ковалев И.И., Кравцова М.В., Олемской С.В., Сдобнов В.Е., Стародубцев С.А. Мониторинг околоземного космического пространства, магнитосферы и атмосферы Земли в периоды Форбуш-эффектов в конце августа 2005 г. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 29–37. DOI: [10.12737/szf-102202403](https://doi.org/10.12737/szf-102202403).