

**МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ
ПО ЭФФЕКТАМ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В АВГУСТЕ 2018 г.****MONITORING OF MAGNETOSPHERIC PARAMETERS
BASED ON COSMIC RAY EFFECTS IN AUGUST 2018****И.И. Ковалев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ivankov@mail.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, sдобнов@iszf.irk.ru***I.I. Kovalev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ivankov@mail.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, sдобнов@iszf.irk.ru*

Аннотация. По данным наземных измерений космических лучей на мировой сети нейтронных мониторов с привлечением данных (без исправления на температурный эффект) комплекса мюонных телескопов в Якутске и мюонного годоскопа УРАГАН (Москва) модифицированным методом спектрографической глобальной съемки в период геомагнитных возмущений в августе 2018 г. произведено разделение вариаций космических лучей на составляющие межпланетного, магнитосферного и атмосферного происхождения. Получены временные вариации потока первичных частиц и пичч-угловой анизотропии космических лучей с жесткостью 4 ГВ, ориентации межпланетного магнитного поля, приведены изменения жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске.

На основе полученных данных по изменениям планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания в рамках простейшей осесимметричной модели ограниченной магнитосферы рассчитаны некоторые параметры магнитосферных токовых систем, а именно радиусы кольцевого тока и токов на магнитопаузе и *Dst*-индекс.

Ключевые слова: космические лучи, магнитосфера, кольцевой ток, геомагнитные бури.

Abstract. Using data (uncorrected for the temperature effect) from the global network of neutron monitors (GNNM), along with data from the Yakutsk muon telescope complex and the muon hodoscope URAGAN (Moscow), we have applied a modified spectrographic global survey (SGS) method to the 2018 August event in order to split cosmic ray variations into components of primary, magnetospheric, and atmospheric origin. We obtained time variations in the 4 GV-rigidity primary particle isotropic flux and pitch-angle anisotropy, as well as in the interplanetary magnetic field (IMF) orientation. We also showed variations in the geomagnetic cutoff rigidity (GCR) in Irkutsk.

Using the obtained data on the changes in the planetary system of GCR within a simple model of a bounded magnetosphere, we have calculated some parameters of magnetospheric current systems, namely, the ring current radius, the magnetopause current radius, and the *Dst* index.

Keywords: cosmic rays, magnetosphere, ring current, geomagnetic storms.

ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабные солнечные возмущения, такие как корональные выбросы массы (КВМ), оказывают значительное влияние на околоземную среду. В частности, когда КВМ или ударная волна достигает Земли, магнитосфера сжимается под давлением солнечного ветра, а кольцевой ток усиливается вследствие инъекции заряженных частиц. Оба этих явления оказывают влияние на жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО) космических лучей (КЛ) и, как следствие, приводят к заметным вариациям магнитосферного характера.

Август 2018 г. отличался низким уровнем солнечной активности. Исключением являлся КВМ,

произошедший 20 августа 21:43 UTC в результате эрупции волокна (координаты N40W05). Скорость солнечного ветра (СВ) не превышала 400 км/с. Модуль и B_z -компонента межпланетного магнитного поля (ММП) составили 3.3 и -1.9 нТл соответственно. При этом значительных изменений потока мягкого рентгена на космических аппаратах (КА) GOES зарегистрировано не было. Тем не менее 25–26 августа 2018 г. этот относительно медленный КВМ вызвал необычно сильную магнитную бурю [Abunina et al., 2020]. В течение геомагнитной бури значение *Dst*-индекса уменьшилось до -175 нТл, скорость СВ составила 444 км/с, модуль и B_z -компонента ММП достигли значений 18.2 и -14.7 нТл соответственно [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>].

Магнитная буря сопровождалась форбуш-эффектом. На некоторых станциях (преимущественно в Северном полушарии) после форбуш-эффекта наблюдалось резкое повышение интенсивности КЛ. Аномальное повышение интенсивности КЛ наблюдалось на многих станциях, расположенных на разных широтах, в том числе на ст. Oulu ($R_c=0.8$ ГВ), Moscow ($R_c=2.43$ ГВ), Thailand ($R_c=16.8$ ГВ), при этом поведение КЛ различалось: например, нейтронный монитор в Москве 26 августа зарегистрировал два пика интенсивности — в 07:00–08:00 и 14:00 UTC. На станциях в Южном полушарии (например, McMurdo, Mirny, South Pole) подобного поведения интенсивности КЛ не наблюдалось [Abunin et al., 2020].

Задачей данной работы является оценка параметров магнитосферы Земли в ходе геомагнитной бури 25–26 августа 2018 г. по эффектам в космических лучах. Подобные исследования уже проводились для других событий и описаны, например, в работе [Кравцова и др., 2020]. Существенным отличием данной работы является привлечение данных мюонных детекторов.

ДАнные И МЕТОД

Анализ события в КЛ в конце августа 2018 г. проводился с помощью метода спектрографической глобальной съемки (СГС) [Дворников и др., 1986; Kovalev et al., 2022]. Данный метод использует данные мировой сети станций КЛ и успешно применяется для анализа событий в межпланетной среде и геомагнитосфере [Дворников и др., 2013]. Метод позволяет, наряду с фазами первой и второй гармоники питч-угловой анизотропии, определять жесткостной спектр изотропной составляющей и анизотропии КЛ, по фазе второй гармоники получать информацию об ориентации ММП, а также определять изменения среднemasсовой температуры над пунктами наблюдения нестабильных компонент вторичных КЛ (при использовании данных, не исправленных на температурный эффект) и планетарной системы ЖГО в каждый момент времени наблюдений в периоды возмущений геомагнитного поля.

Для исследования периода августа 2018 г. методом СГС применялись данные:

- мировой сети нейтронных мониторов (36 станций);
- мюонного годоскопа УРАГАН без температурных поправок (зарегистрированные тремя супермодулями (15 каналов) потоки частиц под зенитными углами 0–17°, 17–26°, 26–34°, 34–44°, 44–90°, интегрированные по азимутальному углу);
- комплекса мюонных телескопов в Якутске без температурных поправок (сглаженные скользящим средним данные 10 каналов телескопов на уровнях 0 и 7 м водного эквивалента [<http://www.ysn.ru/ipm/>]).

В качестве базового уровня для расчета относительной интенсивности была выбрана средняя скорость счета за 1 августа 2018 г. Временное разрешение данных — 1 ч.

На основе полученных результатов по изменению планетарной системы ЖГО рассчитываются ряд

параметров магнитосферных токовых систем. Для оценки этих параметров использовалась простейшая осесимметричная модель ограниченной магнитосферы [Кичигин, Сдобнов, 2017]. В результате получены некоторые параметры токовых систем в магнитосфере Земли, а именно радиусы кольцевого тока r_{DR} и тока на магнитопаузе r_{DCF} , а также Dst -индекс. Эти параметры определяются путем минимизации функционала:

$$\left(\sum_i [\Delta R_{obs}(R_i) - \Delta R_{calc}(R_i, r_{DR}, r_{DCF}, Dst)]^2 \right) = \min,$$

где $\Delta R_{obs}(R_i)$ — изменение ЖГО для пункта с ЖГО R_i , полученное методом СГС, $\Delta R_{calc}(R_i, r_{DR}, r_{DCF}, Dst)$ — изменение ЖГО для пункта с ЖГО R_i , рассчитанное по модели ограниченной магнитосферы с параметрами r_{DR} , r_{DCF} , Dst .

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены: модуль ММП $|B|$ и скорость солнечного ветра V ; наблюдавшиеся на КА (сплошная линия) [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>] и рассчитанные (штриховая линия) по данным наземных измерений на мировой сети станций КЛ широта Ψ_0 и долгота λ_0 направления вектора ММП; вариации изотропного потока $\Delta J/J$ и интенсивности потока частиц $\Delta I/I$ на ст. Oulu; амплитуда A_1 первой гармоники питч-угловой анизотропии для частиц с жесткостью 4 ГВ; изменения жесткости геомагнитного обрезания ΔR_c для Иркутска в сравнении с вариациями Dst -индекса.

Можно отметить удовлетворительное согласие данных о направлении вектора ММП, полученных с помощью КА и определенных методом СГС. Кроме того, наблюдается падение интенсивности изотропного потока частиц с жесткостью 4 ГВ на границе магнитосферы 25–27 августа до $\approx -15\%$, а также повышение амплитуды A_1 за период 25–27 августа до 30%, свидетельствующее о входе и выходе Земли из образования типа магнитной ловушки. Существенного возрастания амплитуды второй гармоники питч-угловой анизотропии не наблюдалось. Максимальное изменение ΔR_c в период геомагнитного возмущения в Иркутске составило ≈ -1.0 ГВ, а временной ход ΔR_c хорошо коррелирует с временным ходом Dst -индекса (коэффициент корреляции ≈ 0.8).

На рис. 2 приведены зависимости ΔR_c от R_c , полученные методом СГС (сплошная линия) и методом расчета кольцевого тока на разных этапах магнитной бури. Справа на каждой панели указаны радиусы (в радиусах Земли R_3) кольцевого тока (r_{DR}) и тока на магнитопаузе (r_{DCF}), рассчитанный (Dst_{calc}) и наблюдаемый (Dst_{obs}) Dst -индексы. Наблюдаемое и рассчитанное значения Dst , вклады в Dst -индекс кольцевого тока (Dst_{DR}) и тока на магнитопаузе (Dst_{DCF}), а также сила тока (I_{DR} , I_{DCF}) в токовой системе приведены в таблице. Отмечается смещение подсолнечной точки магнитосферы до $(7 \div 8)R_3$ в фазе максимальной модуляции, в течение бури радиус кольцевого тока изменяется от $\sim 4.7R_3$ до $\sim 4.9R_3$, а сила кольцевого тока — от 11.9×10^6 до 25.6×10^6 А.

Вклад токовых систем DR и DCF в развитие магнитной бури в августе 2018 г.

Этап	Dst_{obs} , нТл	Dst_{calc} , нТл	Dst_{DR} , нТл	Dst_{DCF} , нТл	I_{DR} , $\times 10^6$ А	I_{DCF} , $\times 10^6$ А
Начальная фаза (25.08 20:00)	-25	-48	-148	100	11.9	3.19
Фаза макс. модуляции (26.08 08:00)	-174	-196	-477	281	25.6	10.6
Фаза восстановления (26.08 21:00)	-81	-80	-203	123	14.0	4.35

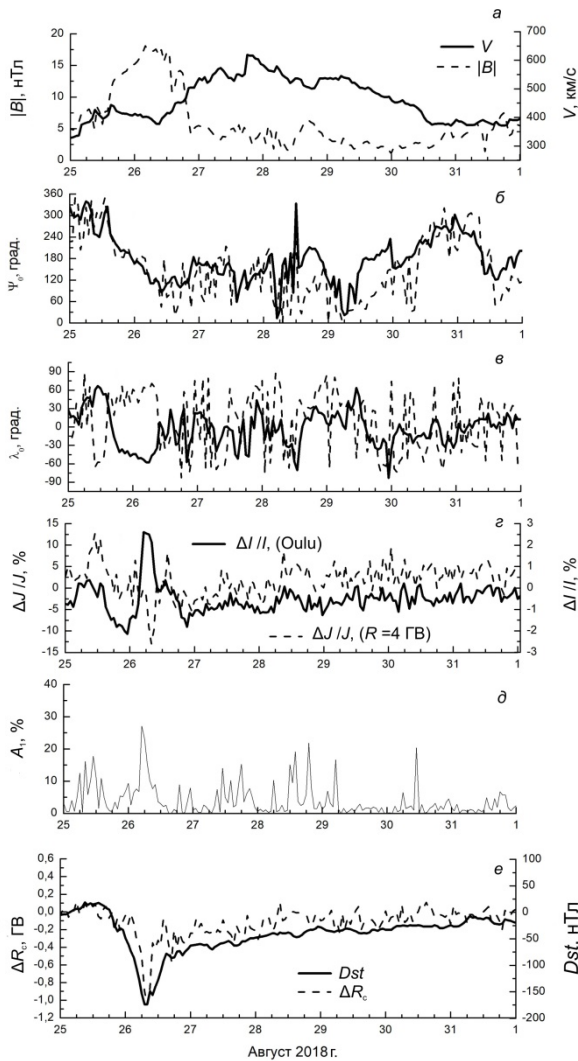


Рис. 1. Изменения модуля ММП $|B|$ и скорости СВ V (а), а также эллиптических долготы ψ_0 (б) и широты λ_0 (в) ориентации ММП; относительные вариации изотропной компоненты $\Delta J/J$ и интенсивности потока частиц $\Delta I/I$ на ст. Oulu (г), а также первой гармоники A_1 питч-угловой анизотропии для частиц с жесткостью 4 ГВ (д); вариации ЖГО в Иркутске ΔR_c и Dst -индекса (е) 25–31 августа 2018 г.

В данной работе для оценки магнитосферных эффектов мы используем простейшую осесимметричную модель ограниченной магнитосферы. Приводимые нами радиусы кольцевого тока и тока на магнитопаузе отражают, по сути, 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. Вклады ряда токовых

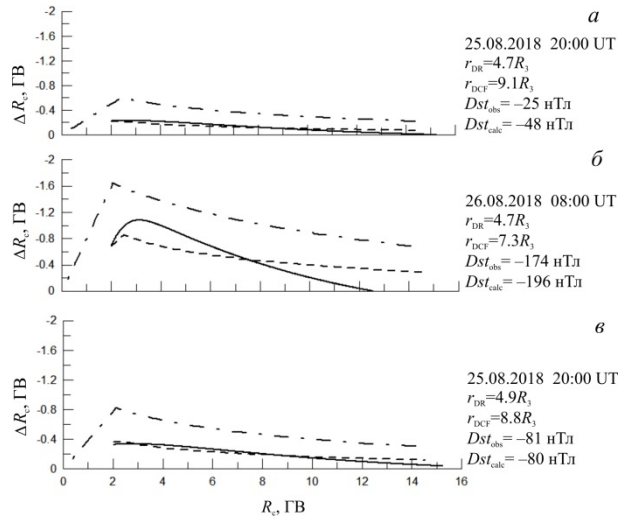


Рис. 2. Зависимость изменения ЖГО от ЖГО в начальной фазе (а), в момент максимальной модуляции (б) и на фазе восстановления (в) во время магнитной бури в августе 2018 г.: сплошная линия — результаты, полученные методом СГС по данным наземных наблюдений КЛ; штриховая линия — результаты расчетов по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы; штрихпунктирная линия — вклад в изменение ЖГО кольцевого тока, рассчитанного по осесимметричной модели магнитосферы. Справа приведены: дата, радиусы кольцевого тока (r_{DR}) и тока на магнитопаузе (r_{DCF}), наблюдаемый (Dst_{obs}) и расчетный (Dst_{calc}) Dst -индексы

систем при этом не учитываются. Тем не менее наблюдается хорошее согласие между рассчитанными и наблюдаемыми значениями Dst -индекса, что позволяет утверждать, что основной вклад в интенсивность магнитных бурь вносят кольцевой ток и токи на магнитопаузе.

ВЫВОДЫ

С помощью метода СГС по данным наземных наблюдений КЛ на мировой сети станций, а также на Якутском комплексе мюонных телескопов и мюонном годоскопе УРАГАН рассчитаны изменения планетарной системы ЖГО в период геомагнитной бури в конце августа 2018 г. Данные о заряженных компонентах использовались без введения температурных поправок. На основе полученных результатов в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы рассчитаны параметры кольцевого тока и токов на магнитопаузе, вклад кольцевого тока в изменения ЖГО, а также оценены вклады кольцевого тока и то-

ков на магнитопаузе в величину Dst -индекса геомагнитной активности на разных фазах события:

- На начальной фазе радиус кольцевого тока достиг (здесь и далее величины оценочные) $4.7R_3$, сила кольцевого тока — 11.9×10^6 А. Расстояние до подсолнечной точки составляло $9.1R_3$, сила тока на магнитопаузе — 3.19×10^6 А. Вклад кольцевого тока в Dst -индекс составил -148 нТл, токов на магнитопаузе — 100 нТл.

- На фазе максимальной модуляции кольцевой ток усилился до 25.6×10^6 А, ток на магнитопаузе — до 10.6×10^6 А, подсолнечная точка сместилась до $7R_3$. Вклад кольцевого тока в Dst -индекс составил -477 нТл, токов на магнитопаузе — 281 нТл.

- На фазе восстановления радиус кольцевого тока достиг $4.9R_3$, расстояние до подсолнечной точки — $8.8R_3$. Силы кольцевого тока и тока на магнитопаузе уменьшились до 14.0×10^6 и 4.35×10^6 А соответственно. Вклад кольцевого тока в Dst -индекс составил -203 нТл, токов на магнитопаузе — 123 нТл.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>], Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (Сеть СКЛ) [<https://ckp-rf.ru/usu/433536/>].

Авторы выражают благодарность А.Н. Дмитриевой (Национальный институт ядерных исследований «МИФИ») за предоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Метод спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций интенсивности космических лучей межпланетного и магнитосферного происхождения. *Вариации космических лучей и исследования космоса*. М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 232–237.

Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Диагностика электромагнитных характеристик межпланетной среды по эффектам в космических лучах. *Геомагнетизм и астрономия*. 2013. Т. 53, № 4. С. 457–468. DOI: [10.7868/S001679401304007X](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 астрономия*. 2017. Т. 57, № 2. С. 149–153. DOI: [10.7868/S0016794017020043](https://doi.org/10.7868/S0016794017020043).

Кравцова М.В., Олемской С.В., Сдобнов В.Е. Космические лучи в период форбуш-эффектов в марте 1989 г. и в марте 1991 г.: спектры вариаций, анизотропия и вариации жесткости геомагнитного обрезания. *Геомагнетизм и астрономия*. 2020. Т. 60, № 4. С. 448–456. DOI: [10.31857/S0016794020040082](https://doi.org/10.31857/S0016794020040082).

Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Chertok I.M. Peculiar solar sources and geospace disturbances on 20–26 August 2018. *Solar Phys.* 2020. Vol. 295, 7. DOI: [10.1007/s11207-019-1574-8](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1574-8).

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).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (дата обращения 19 апреля 2023 г.).

URL: <http://www.ysn.ru/ipm/> (дата обращения 19 апреля 2023 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 19 апреля 2023 г.).

URL: <https://ckp-rf.ru/usu/433536/> (дата обращения 19 апреля 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Ковалев И.И., Олемской С.В., Сдобнов В.Е. Мониторинг параметров магнитосферы по эффектам в космических лучах в августе 2018 г. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 24–27. DOI: [10.12737/szf-93202303](https://doi.org/10.12737/szf-93202303).