

---

---

# ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

---

УДК 53.01

DOI 10.25587/SVFU.2022.81.41.004

*А. С. Зверев, П. Ю. Гололобов, В. Г. Григорьев, С. А. Стародубцев*

## **Флуктуации интенсивности галактических космических лучей перед геомагнитной бурей 25–26 августа 2018 года**

Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,

г. Якутск, Россия,

E-mail: ZverevAS@ikfia.ysn.ru

E-mail: gpeter@ikfia.ysn.ru

E-mail: grig@ikfia.ysn.ru

E-mail: starodub@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** В данной работе с целью создания методов прогноза негативных проявлений космической погоды исследуется динамика флуктуаций интенсивности галактических космических лучей во время сильной геомагнитной бури 25–26 августа 2018 года. Флуктуации интенсивности космических лучей – это квазипериодические вариации с периодами менее 3-х часов, которые эпизодически возникают в межпланетном пространстве во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Эти возмущения обусловлены распространением межпланетных ударных волн, выбросов корональной массы, высокоскоростных потоков, которые во многом и определяют космическую погоду. Для анализа привлекались 1-минутные исправленные на давление данные измерений нейтронных мониторов станций космических лучей Бухта Тикси и Якутск, а также 1-минутные данные прямых измерений межпланетного магнитного поля, плотности и скорости солнечного ветра на космическом аппарате WIND. В результате установлено, что перед началом бури на инерционном участке спектров турбулентности солнечного ветра в области частот  $\sim 10^{-4} \div 8.33 \cdot 10^{-3}$  Гц наблюдались быстрые магнитозвуковые волны значительной амплитуды. Предполагается, что эти волны были сгенерированы в области взаимодействия медленного и быстрого потоков солнечного ветра, вызвавшего эту геомагнитную бурю. При этом поток галактических космических лучей был подвержен модуляции со стороны быстрых магнитозвуковых волн. Это проявилось в измерениях нейтронных мониторов как регистрация значимых когерентных флуктуаций интенсивности галактических космических лучей более чем за сутки до начала геомагнитной бури. Полученные результаты указывают на возможность осуществления кратковременного прогноза начала сильных геомагнитных бурь в режиме реального времени на основе использования данных измерений станций космических лучей.

**Ключевые слова:** космические лучи, солнечный ветер, межпланетная ударная волна, высокоскоростной поток, МГД-волны, геомагнитная буря, эффект Форбуша, нейтронный монитор.

*В работе использовались данные измерений станций космических лучей Бухта Тикси и Якутск, входящих в состав уникальной научной установки «Российская национальная наземная*

сеть станций космических лучей». Авторы благодарят мировой центр данных по геомагнетизму в г. Киото (Япония), а также команды ACE и WIND (США) за предоставление данных прямых измерений параметров межпланетной среды в открытом доступе. Работа поддержана грантом РФФ №22-22-20045.

Для цитирования: Флуктуации интенсивности галактических космических лучей перед геомагнитной бурей 25-26 августа 2018 года / А. С. Зверев, П. Ю. Гололобов, В. Г. Григорьев, С. А. Стародубцев // Вестник СВФУ. 2022, №4(90). С. 26–39. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.81.41.004>

*A. S. Zverev, P. Yu. Gololobov, V. G. Grigoryev, S. A. Starodubtsev*

## **Fluctuations in the intensity of galactic cosmic rays before the geomagnetic storm on August 25-26, 2018**

**Abstract.** This paper investigates the dynamics of galactic cosmic ray intensity fluctuations during a strong geomagnetic storm on 25-26 August 2018 in order to establish methods for predicting negative space weather manifestations. Cosmic ray intensity fluctuations are quasi-periodic variations with periods of less than 3 hours, which occur episodically in interplanetary space during large-scale disturbances of the solar wind. These disturbances are due to the propagation in space of interplanetary shock waves, coronal mass ejections and high-speed solar wind flows, which largely determine space weather. The analysis involved 1-minute pressure-corrected measurement data from neutron monitors at the Tiksi Bay and Yakutsk cosmic ray stations, as well as 1-minute data from direct measurements of the interplanetary magnetic field, solar wind density and speed onboard the WIND spacecraft. As a result, it was found that immediately before the start of the storm, fast magnetosonic waves of significant amplitude were observed in the inertial section of the solar wind turbulence spectra in the frequency range  $\sim 10^{-4} \div 8.33 \cdot 10^{-3}$  Hz. It is assumed that these waves were generated in the region of interaction between slow and fast solar wind streams, which caused this geomagnetic storm. At the same time, the galactic cosmic ray flux was subject to modulation by fast magnetosonic waves. This manifested in measurements of neutron monitors as the registration of significant coherent galactic cosmic ray intensity fluctuations more than a day before the onset of a geomagnetic storm. The obtained results indicate the possibility of real-time short-term prediction of the onset of strong geomagnetic storms using data measured by cosmic ray stations.

**Keywords:** cosmic rays, solar wind, interplanetary shock wave, high-velocity flow, MHD waves, geomagnetic storm, Forbush effect, neutron monitor.

*In this work, we used measurement data from cosmic ray stations Tiksi Bay and Yakutsk, which are part of the Unique Scientific Facility Russian National Ground-Based Network of Cosmic Ray Stations. The authors are grateful to the World Geomagnetism Data Center in Kyoto (Japan), as well as the ACE and WIND teams (USA) for making the data of direct measurements of the parameters of the interplanetary medium available in the public domain. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-22-20045.*

For citation: Fluctuations in the intensity of galactic cosmic rays before the geomagnetic storm on August 25-26, 2018 / A. S. Zverev, P. Yu. Gololobov, V. G. Grigoryev, S. A. Starodubtsev // Vestnik of NEFU. 2022, No. 4(90). Pp. 26–39. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.81.41.004>

## Введение

В 1966 г. в Полярной геокосмофизической обсерватории Бухта Тикси был установлен первый в СССР новый разработанный Карлмайклом нейтронный монитор типа NM-64 [1]. Он был специально приобретен в Канаде и имел большую эффективную площадь регистрации ( $18 \text{ м}^2$ ), а также высокую точность измерений по сравнению со старым монитором, разработанным Симпсоном в 1948 г. [2]. С этого времени началось оснащение отечественной сети станций космических лучей (КЛ) стандартными приборами этого типа, но уже советской разработки, которые выпускались заводом «Физприбор». В настоящее время в России функционируют 14 станций КЛ, на которых установлены подобные нейтронные мониторы. Все вместе они представляют собой уникальную научную установку «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536>). В нее входят и две станции КЛ, расположенные на территории Якутии – Бухта Тикси и Якутск.

С 1966 г. и по настоящее время на российской сети станций непрерывно в 5-мин, а с конца 1990-х годов в 1-мин режиме проводится непрерывная регистрация интенсивности КЛ. В результате сейчас накоплен огромный экспериментальный материал, который в основном используется для изучения событий наземных возрастаний солнечных КЛ. Однако за все время, начиная с регистрации первого такого события 28 февраля 1942 г., зарегистрировано всего 73 таких события, причем с начала эры нейтронных мониторов с 1966 г. их произошло 59. При этом нужно отметить, что длительность таких событий составляет величину от нескольких часов до одних суток. Таким образом, весь огромный накопленный почти за 5 солнечных циклов объем информации практически не используется. В связи с этим возникает закономерный вопрос о возможности и необходимости его использования. Ответом на него могут служить результаты проводимых исследований короткопериодных вариаций интенсивности КЛ для целей краткосрочного прогнозирования наземных проявлений космической погоды. Из них самым важным является прогнозирование сильных магнитосферных бурь, которые приводят к значительным возмущениям магнитосферно-ионосферных токовых систем, что ведет, в свою очередь, к наводке больших геомагнитно индуцированных токов в протяженных линейных объектах. К ним относятся линии электропередач, нефте- и газопроводы, на которых во время сильных геомагнитных возмущений часто регистрируются различного рода технологические сбои и аварии. Особенно это относится к объектам, расположенным на широтах авроральной зоны, где, в силу структуры геомагнитного поля негативные проявления космической погоды наиболее сильны [3–5].

## Материалы и методы исследования

Короткопериодные вариации интенсивности КЛ с характерным периодом  $T < 3$  час, которые в научной литературе получили название «флуктуации интенсивности КЛ», возникают эпизодически и связаны с крупномасштабными возмущениями солнечного ветра (СВ), например, межпланетными ударными волнами, выбросами корональной массы, высокоскоростными потоками СВ, которые во многом определяют космическую погоду [6, 7]. Первые систематические исследования флуктуаций КЛ на основе измерений нейтронных мониторов начались в г. Якутске в начале 1970-х годов [8], а уже через несколько лет сотрудником ИКФИА ЯФ СО АН СССР В. И. Козловым был поставлен вопрос о возможности прогноза крупномасштабных возмущений СВ по измерениям флуктуаций КЛ [9]. Это было сделано на «интуитивном» уровне на основе установленной автором динамики спектров мощности флуктуаций КЛ во время эффектов Форбуша, но вскоре изучением флуктуаций КЛ уже начали интенсивно заниматься целые научные группы в СССР, Мексике, Японии, Италии, Финляндии, Словакии и других странах [10]. В результате проведения многочисленных

экспериментов по регистрации флуктуаций КЛ было твердо установлено, что это реальное явление, которое возникает в межпланетной среде на фоне крупномасштабных возмущений СВ и может являться предвестником различных геофизических проявлений космической погоды, например, форбуш-понижений и геомагнитных бурь [9–20].

В 1974 г. Оуэнсом рассматривалась теоретическая задача о модуляции потока галактических КЛ в межпланетном пространстве альфвеновскими волнами. Им была установлена связь между наблюдаемыми спектрами флуктуаций КЛ и межпланетного магнитного поля (ММП) [21]:

$$\frac{P_{KL}(\nu, \mu, V)}{j_0^2} = C(\nu, \mu) \frac{P_B(\nu)}{B_0^2} (\delta_{||})^2 \sim 10^{-6} \frac{P_B(\nu)}{B_0^2} \quad (1)$$

где  $P_{KL}(\nu, \mu, V)$  и  $P_B(\nu)$  – спектры мощности флуктуаций интенсивности КЛ и поперечных компонент ММП,  $j_0$  – интенсивность КЛ,  $\nu$  – частота,  $\mu$  – косинус питч-угла,  $V$  – скорость КЛ,  $C(\nu, \mu, V)$  – функция резонанса,  $B_0$  – значение среднего ММП,  $\delta_{||}$  – продольная составляющая анизотропии КЛ. Однако в последующие годы выяснилось [17, 19], что установленное им соотношение между их спектрами справедливо только для флуктуаций КЛ и ММП с периодами  $T > 3$  час, а для более коротких периодов ( $T < 3$  час) между экспериментом и теорией наблюдались значительные расхождения. Это объясняется тем, что в работе [21] рассматривалась модуляция малой анизотропной части функции распределения КЛ, величина которой меньше 1%. В этом случае коэффициент, стоящий в соотношении (1) перед выражением для спектров флуктуаций поперечных составляющих ММП, которые характерны для альфвеновских волн, составляет по порядку величины  $10^{-6}$ . Это не позволяет правильно описать наблюдаемую мощность спектров флуктуаций КЛ с  $T < 3$  час, соответствующих инерционному диапазону частот спектра турбулентности СВ ( $\sim 10^{-4} < \nu < 10^{-1}$  Гц). Но в 1988 г. в работе [17] изучался альтернативный вопрос о модуляции значительно большей по величине изотропной части функции распределения КЛ другой веткой МГД-волн быстрыми магнитозвуковыми волнами (БМЗВ). В результате авторами была установлена магнитозвуковая природа флуктуаций галактических КЛ и определена связь между наблюдаемыми спектрами флуктуаций КЛ и ММП [17]:

$$\frac{P_{KL}(\nu)}{j_0^2} = \left[ \frac{(\gamma + 2) C_a (C_w + U \sin \phi)}{3\pi \sqrt{2} k_{\perp} \nu} \right]^2 \frac{P_B(\nu)}{B_0^2} \sim (10^{-2} \div 1) \frac{P_B(\nu)}{B_0^2} \quad (1)$$

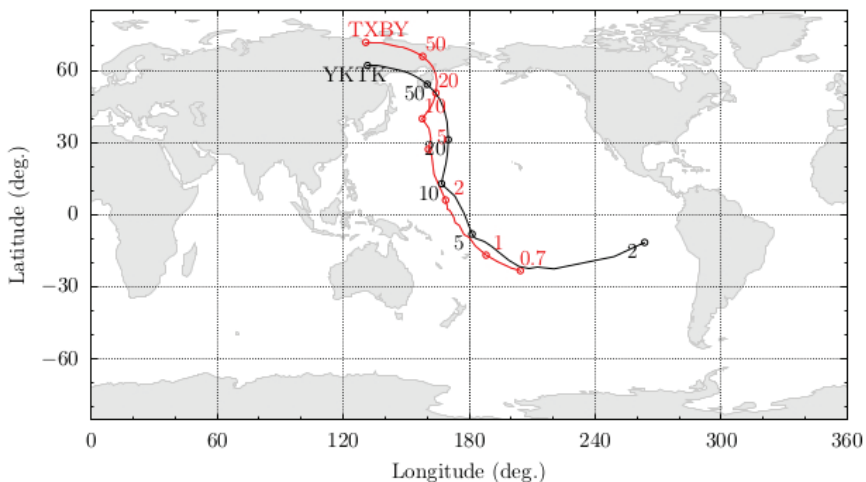
где  $P_{KL}(\nu)$  и  $P_B(\nu)$  – спектры мощности флуктуаций интенсивности КЛ и модуля ММП,  $\gamma = 2.7$  – показатель энергетического спектра КЛ,  $C_a$  – альфвеновская скорость,  $C_w$  – скорость БМЗ волны ( $C_w = \sqrt{C_a^2 + C_s^2}$ ,  $C_s$  – скорость звука, причем в СВ  $C_s \approx C_a$ ),  $U$  – скорость СВ,  $\phi$  – азимутальный угол ММП,  $k_{\perp}$  – поперечный коэффициент диффузии КЛ. При этом важно, что поскольку БМЗВ имеют большой декремент затухания, то они должны генерироваться локально, где-то вблизи окрестности Земли, например, потоками низкоэнергичных КЛ межпланетного или солнечного происхождения [22, 23]. С учетом этого обстоятельства на примере ряда событий прохождения через орбиту Земли межпланетных ударных волн (МУВ), сопровождавшихся потоками штормовых частиц, в работах [17, 18] была показана применимость теоретически установленной связи (2) между наблюдаемыми спектрами мощности флуктуаций КЛ и ММП. С другой стороны, БМЗВ наблюдаются также и в области взаимодействия разноскоростных потоков СВ, в которых также существуют условия для их генерации, и в работе [19] на ряде таких событий также была показана применимость уравнения (2) [24, 25].

Поскольку при достижении Земли как МУВ, так и высокоскоростные потоки СВ часто приводят к значительным геофизическим проявлениям космической погоды,

то основываясь на уже ранее полученных экспериментальных результатах разных авторов [18, 22, 23] и установленной в работах [17–19] природе флуктуаций КЛ, можно предположить, что один из возможных методов кратковременного прогноза сильных геофизических проявлений космической погоды на основе измерений КЛ состоит в регистрации их флуктуаций с помощью нейтронных мониторов за достаточно большой интервал времени. В настоящее время это стало тем более реально, что данные регистрации мировой сети станций КЛ, на которых установлены эти детекторы, с 2007 г. стали доступны для всех заинтересованных пользователей в режиме реального времени по адресу: <http://www.nmdb.eu>.

В данной работе мы использовали 1-минутные исправленные на давление данные регистрации нейтронных мониторов в Якутске (24-NM-64) и Бухте Тикси (18-NM-64). Здесь числа перед указанием типа детектора частиц означают число нейтронных счетчиков СНМ-15 в каждом нейтронном мониторе. Обе эти станции расположены практически на одном 129-м меридиане, но разнесены по широте почти на 1200 км. Станция Бухта Тикси имеет порог геомагнитного обрезания  $R_c < 0.4$  ГВ, т. е. минимальная энергия регистрируемых на ней КЛ определяется только толщиной атмосферы и составляет величину  $E_{\min} \approx 0.5$  ГэВ. Станция Якутск имеет больший порог  $R_c \approx 1.65$  ГВ и, соответственно, способна регистрировать КЛ нескольких больших энергий  $E_{\min} \approx 2$  ГэВ. При этом на обе станции КЛ приходят практически из одного направления. Это иллюстрирует рис. 1, на котором показаны их приемные конуса. Нужно отметить, что данные регистрации КЛ на этих станциях в режиме реального времени передаются на сервер базы данных в г. Якутске и находятся в открытом доступе по адресу: <http://www.ysn.ru/ipm>.

В качестве прямых измерений параметров межпланетной среды мы использовали 1-час и 1-мин данные, полученные на космических аппаратах (КА) ACE и WIND, которые также находятся в открытом доступе по адресу: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>.



**Рис. 1.** Конусы приема КЛ для станций Бухта Тикси и Якутск. Цифры у кривых означают энергии приходящих КЛ в ГэВ. По оси ординат отложена географическая широта, по оси абсцисс – долгота. Символами TXBY и YKTK обозначены общепринятые аббревиатуры станций КЛ Бухта Тикси и Якутск, соответственно. Цифры около кривых означают энергии КЛ в единицах ГэВ

**Fig. 1.** Cosmic ray reception cones for stations Tiksi Bay and Yakutsk. The numbers next to the curves denote the energies of incoming cosmic rays in GeV. Geographic latitude is plotted along the ordinate axis, longitude is plotted along the abscissa axis. The symbols TXBY and YKTK denote the generally accepted abbreviations for the cosmic ray stations Tiksi Bay and Yakutsk, respectively. The numbers near the curves indicate the energies of cosmic rays in units of GeV

Для оценки интенсивности геомагнитных бурь мы используем 1-час данные Dst-индекса, который показывает уменьшение геомагнитного поля на низких широтах и представлен на сайте мирового центра данных по геомагнетизму в г. Киото (Япония) <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.

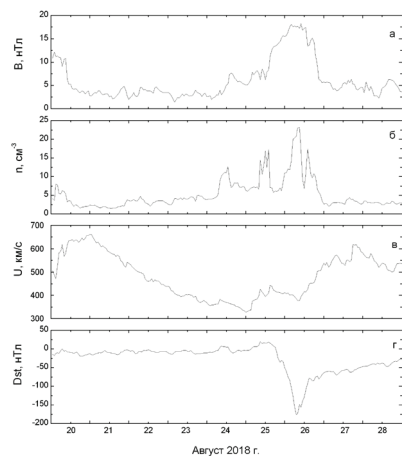
Поскольку флуктуации КЛ, параметров СВ и ММП имеют относительно небольшую амплитуду по сравнению со средними фоновыми значениями, то для их выявления требуется применение специальных методов анализа. Поэтому для определения и исследования характеристик флуктуаций интенсивности КЛ, параметров ММП и СВ мы использовали стандартные методы спектрального анализа, детально описанные в [19].

**Результаты и обсуждение**

Исходя из установленной природы флуктуаций галактических КЛ, можно построить физическую картину их возникновения во время крупномасштабных возмущений СВ, с приходом которых на орбиту Земли часто наблюдаются геомагнитные бури. В зависимости от условий генерации в источнике на Солнце и дальнейшего распространения в межпланетной среде в области предфронта МУВ или в области взаимодействия разноскоростных потоков СВ часто наблюдаются БМЗВ, которые способны модулировать поток галактических КЛ высоких энергий (более 1 ГэВ), приводя к возникновению флуктуаций КЛ. Эти частицы имеют релятивистские скорости и в силу больших пробегов достигают орбиты Земли значительно раньше, чем само возмущение СВ, что и регистрируется наземными детекторами как предвестник геофизических возмущений [9–20].

Такая постановка задачи и является физической основой проводимого нами дальнейшего анализа события сильной геомагнитной бури 25–26 августа 2018 г.

В целом август 2018 г. характеризовался низкой вспышечной и корональной активностью Солнца. Тем не менее, 20 августа 2018 г. в 21:24 UT (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) на Солнце произошел корональный выброс массы, который достиг орбиты Земли 25 августа 2018 г. в 01:02 UT ([https://wind.nasa.gov/ICME\\_catalog/ICME\\_catalog\\_viewer.php](https://wind.nasa.gov/ICME_catalog/ICME_catalog_viewer.php)). В прямых измерениях параметров межпланетной среды он проявился как крупномасштабное возмущение СВ. На рис. 2 эта информация приведена с учетом прихода возмущения СВ от места его наблюдения КА ACE вблизи



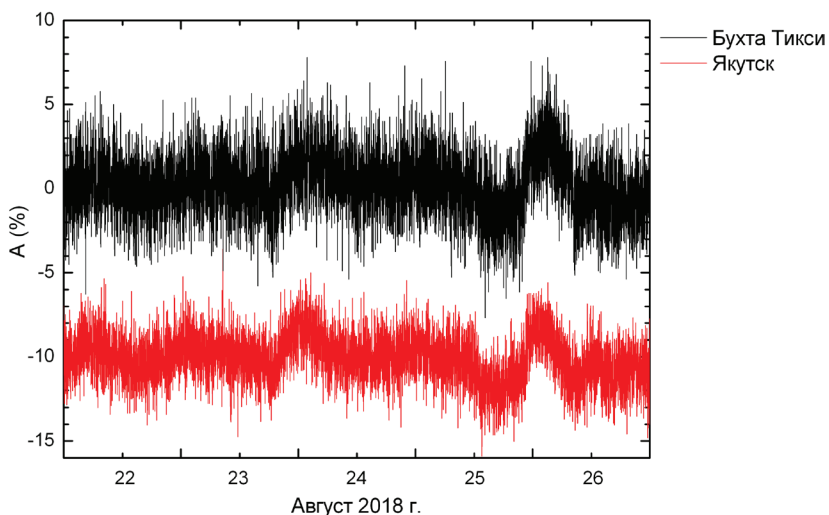
**Рис. 2.** Модуль ММП (а), плотность (б) и скорость (в) солнечного ветра по данным прямых измерений на КА ACE, а также Dst-индекс за 20–28 августа 2018 г.  
**Fig. 2.** Modulus of the interplanetary magnetic field (IMF) (a), density (b) and velocity (c) of the solar wind according to direct measurements onboard the ACE spacecraft, as well as the Dst index for August 20–28, 2018



точки либрации L1 на границу магнитосферы Земли. Нужно заметить, что в это время на КА не было зарегистрировано МУВ, но тем не менее это крупномасштабное возмущение СВ вызвало 25 августа 2018 г. сильную геомагнитную бурю с минимальным значением  $Dst = -175$  нТл без внезапного начала (SSC – Storm Sudden Commencement) (рис. 2г).

Анализ данных измерений КА ACE за длительный интервал времени показывает, что эта буря произошла в период минимума между 2-мя высокоскоростными потоками СВ (рис. 2а-в). Их максимальные скорости отмечались 20 (656 км/с) и 27 августа (619 км/с), соответственно. Причем в рассматриваемый здесь интервал времени 22–26 августа 2018 г. вариации модуля ММП и плотности СВ значительно превышают свои средние значения, достигая значений  $B > 18$  нТл и  $n > 23$  см<sup>3</sup>. Но вместе с тем каких-либо существенных вариаций скорости СВ не отмечается, наблюдается только монотонный спад скорости СВ до 350 км/с с 22 до начала 25 августа и его дальнейший достаточно плавный, без резких изменений рост до 550 км/с. Таким образом, можно заключить, что Земля в это время находилась в области взаимодействия разноскоростных потоков СВ (рис. 2).

В это время каких-либо значительных эффектов в интенсивности галактических КЛ не наблюдалось. На рис. 3 показана амплитуда вариаций интенсивности КЛ, наблюдавшихся в это же время на станциях Бухта Тикси и Якутск. Из него очевидно, что какого-либо значительного понижения в интенсивности КЛ, известного как эффект Форбуша, не зарегистрировано. Можно отметить, что на рис. 3 также не видно каких-либо очевидных флуктуаций интенсивности КЛ перед началом геомагнитной бури. Они имеют небольшую амплитуду и «замыты» на уровне фона. Поэтому для их выделения мы применили методы спектрального анализа [19]. При этом для расчета спектральных характеристик выбиралась реализация исходных данных длиной в 1 сутки, что позволяло станциям, которые имеют разные приемные конуса (рис. 1), полностью «обозреть» доступную им часть небесной сферы.



**Рис. 3.** Амплитуда вариаций интенсивности КЛ по данным станций Бухта Тикси (черная кривая) и Якутск (красная кривая) для 22–26 августа 2018 г. За средний фон принимались измерения за 22 августа 2018 г. Для наглядности из амплитуды вариаций интенсивности КЛ зарегистрированных на станции Якутск вычтено 10%

**Fig. 3.** Amplitude of variations in cosmic ray intensity according to the data of Tiksi Bay (black curve) and Yakutsk (red curve) stations for August 22–26, 2018. Measurements for August 22, 2018 were taken as the average background. For clarity, 10% was subtracted from the amplitude of cosmic ray intensity variations recorded at Yakutsk station

Важно заметить, что для корректной оценки спектральных характеристик данных измерений необходимо провести их специальную подготовку. В данные измерений нейтронных мониторов необходимо внести поправки на давление и перевести из единиц измерений «число импульсов в единицу времени» в «проценты от среднего уровня счета». Эта процедура позволяет корректно сравнивать между собой данные разных станций, на которых установлены детекторы КЛ, имеющие разное число счетчиков, толщину перекрытия над ними, а также географическое положение и высоту над уровнем моря, что приводит к различному темпу счета детекторов. После этого исходные реализации данных с помощью методов цифровой фильтрации подвергаются стандартной процедуре приведения к квазистационарному виду [26]. Это позволяет исключить из данных регистрации тренды и длиннопериодные вариации, которые могут внести значительные искажения в оценки спектральной мощности и изучать полезный сигнал в анализируемой области частот/периодов. И только после этого возможно корректно применять методы спектрального анализа. В нашем случае мы использовали стандартный метод Блэкмена-Тьюки с корреляционным окном Тьюки. На его основе рассчитывались автоспектры для реализаций данных, кросс-спектр, а также функция и коэффициент когерентности с числом степеней свободы  $DoF \approx 27$ .

Нужно заметить, что коэффициент когерентности по определению является положительным значением квадратного корня из функции когерентности, и его нужно понимать не как число, а как функцию от частоты, являющуюся аналогом функции корреляции только не во временной, а в частотной области.

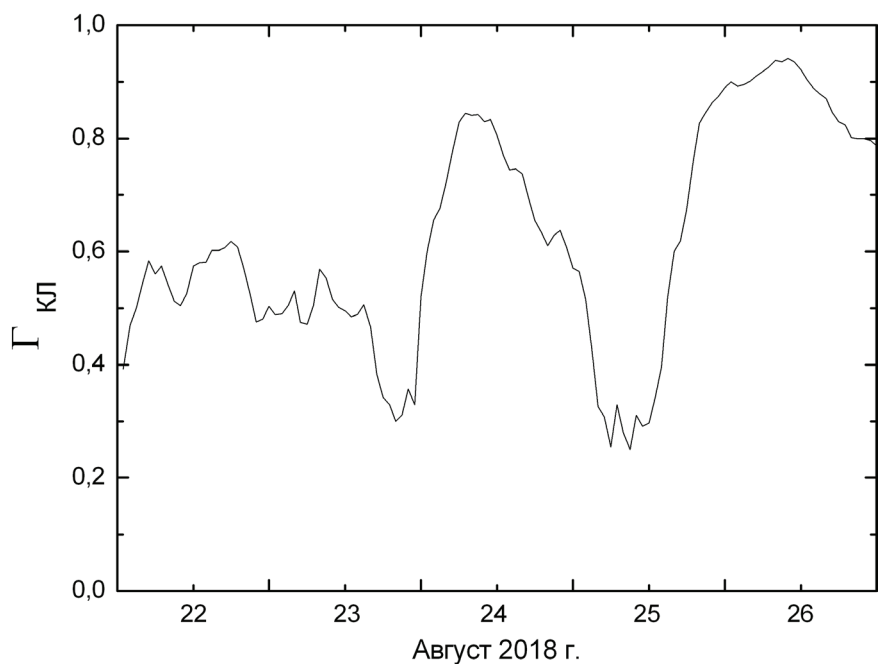
Далее со сдвигом в 1-час процедура вычисления спектральных характеристик повторялась, и в результате был получен достаточно длинный ряд различных спектральных характеристик, который позволил изучать динамику флуктуаций КЛ на всем рассматриваемом интервале времени.

Подобным же образом рассчитывались и спектральные характеристики данных измерений параметров ММП и СВ, измеренные на космическом аппарате WIND, за исключением того, что в начале данные измерений приводились к нулевому среднему.

Нужно заметить, что средняя величина спектральной плотности флуктуаций КЛ испытывает закономерные и весьма значительные изменения в зависимости от уровня солнечной активности. Причем это наблюдается для всех станций КЛ, в зависимости от их порога геомагнитного обрезания [20]. Это обстоятельство весьма неудобно для анализа флуктуаций КЛ, наблюдаемых на разных станциях и при разном уровне солнечной активности. Поэтому от анализа кросс-спектров флуктуаций КЛ мы перешли к изучению коэффициентов когерентности, значения которых по определению изменяются в пределах от 0 до 1, независимо от уровня солнечной активности. Это представляет собой несомненное удобство, поскольку в процессе анализа динамики флуктуаций КЛ отпадает необходимость следить за уровнем возмущенности солнечной активности и параметров СВ. Анализ можно еще более значительно упростить, если отслеживать не динамику коэффициентов когерентности, а их максимальные значения  $\Gamma_{KL}$ . Это показано на рис. 5. Из него видно, что значения  $\Gamma_{KL}$  в течение 2-х суток – 22–23 августа испытывают небольшие колебания в пределах от 0.3 до 0.6, но примерно за 1,5 суток до начала геомагнитной бури начинают достаточно монотонно повышаться до значений более 0.8. Затем они уменьшаются, достигая минимума до примерно 0.3 в конце 24 августа, а затем снова начинают расти до максимальных значений, более чем 0.9 в конце главной фазы бури. Возможно этот минимум обусловлен малым вкладом БМЗВ в общий спектр МГД-турбулентности СВ в это время.

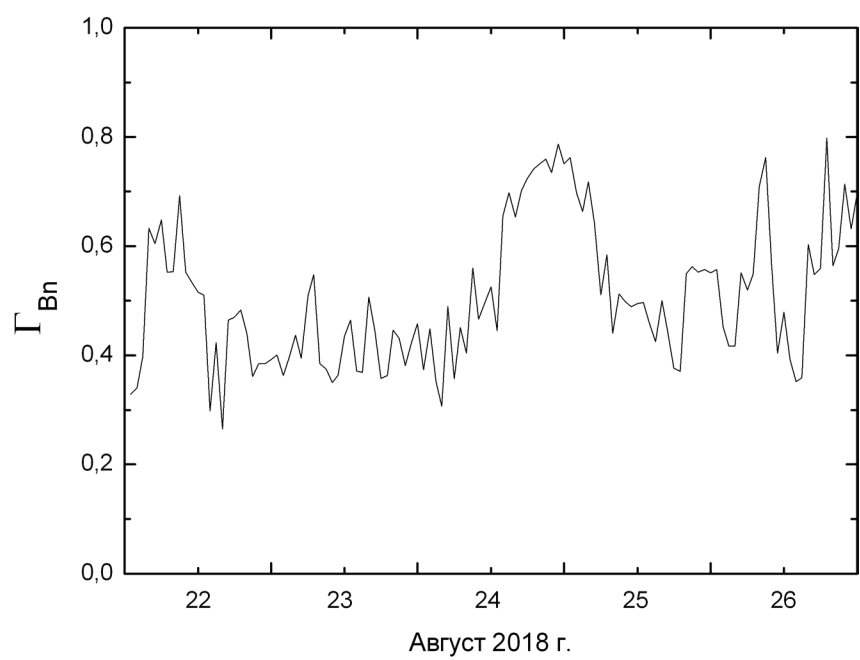
Чтобы установить причину возникновения флуктуаций галактических КЛ еще до начала геофизических проявлений изменений космической погоды, мы провели анализ данных прямых измерений различных параметров межпланетной среды. Согласно результатам работы [19, 24] в области взаимодействия разноскоростных потоков СВ





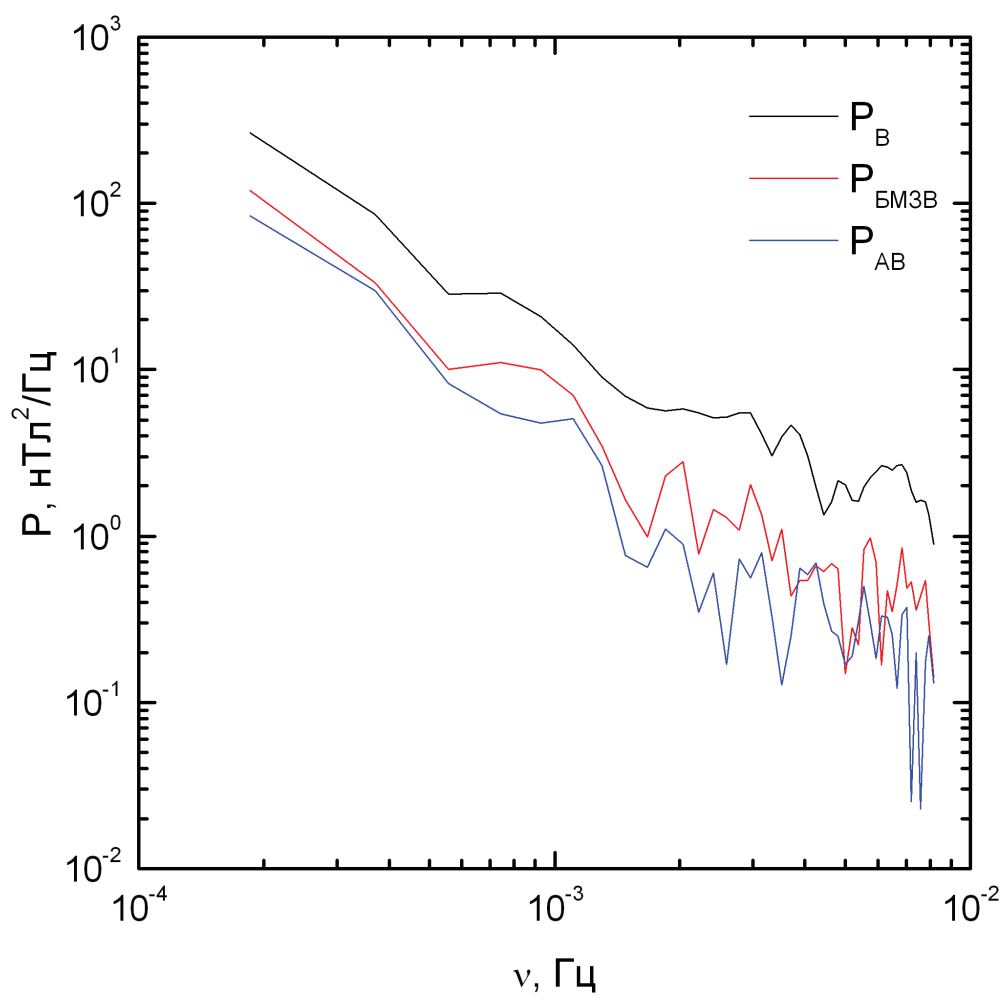
**Рис. 4.** Зависимость максимальных значений коэффициентов когерентности между флуктуациями КЛ, зарегистрированных на станциях Бухта Тикси и Якутск от времени

**Fig. 4.** Dependence of the maximum values of the coherence coefficients between fluctuations of cosmic rays recorded at stations Tiksi Bay and Yakutsk on time



**Рис. 5.** Зависимость максимальных значений коэффициентов когерентности между флуктуациями модуля ММП и плотности СВ, зарегистрированных на КА WIND от времени

**Fig. 5.** Dependence of the maximum values of the coherence coefficients between fluctuations of the modulus of the interplanetary magnetic field and the density of the solar wind, recorded by the WIND spacecraft, on time



**Рис. 6.** Спектры флуктуаций модуля ММП, быстрых магнитозвуковых и альфвеновских волн для периода времени 11:01 UT 23 августа – 11:00UT 24 августа 2018 г. Здесь  $P_B$ ,  $P_{BM3B}$ ,  $P_{AB}$  – спектры модуля ММП, быстрых магнитозвуковых и альфвеновских волн, соответственно

**Fig. 6.** Fluctuation spectra of the interplanetary magnetic field modulus, fast magnetosonic and Alfvénian waves for the time period 11:01 UT 23 August - 11:00UT 24 August 2018. Here  $P_B$ ,  $P_{BM3B}$ ,  $P_{AB}$  are spectra of the interplanetary magnetic field modulus, fast magnetosonic and Alfvénian waves, respectively

(рис. 2в) существуют условия для генерации БМЗВ. В этом случае данный тип МГД-волн может возникать за счет развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в области взаимодействия между медленным и быстрым потоком плазмы СВ и их дальнейшей конверсии в БМЗВ. Тогда можно ожидать, что эти волны должны проявиться в спектрах мощности модуля ММП. А поскольку известно, что разные типы МГД-волн характеризуются значительной корреляцией между собой определенных параметров среды, то не составляет большого труда определить вклад каждого из 3-х типов МГД-волн (альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых) в наблюдаемый спектр флуктуаций модуля ММП.

Проведенные нами расчеты показывают, что в эксперименте по регистрации параметров межпланетной среды на КА WIND 24 августа 2018 г. наблюдается высокая около 80% когерентность между величиной ММП и плотностью плазмы ( $\Gamma_{Bn}$ ), что

является прямым указанием на существование в это время в солнечном ветре быстрых магнитозвуковых волн (рис. 5). Наблюдаемая разница почти в 12 часов между временами наступления максимальных значений коэффициентов когерентности представленных на рис. 4 и 5 объясняется тем фактом, что скорость распространения БМЗВ в СВ сравнительно низкая (меньше 100 км/с относительно скорости СВ), а сами измерения на КА производятся практически в одной точке пространства. С другой стороны, регистрируемые нейтронными мониторами галактические КЛ, характеризующиеся средней энергией  $\sim 10$  ГэВ, распространяются с релятивистской скоростью. Они имеют большие ларморовские радиусы ( $\sim 10^{12}$  см) и пробеги ( $\sim 0.5$  а. е.) [27, 28], поэтому КЛ несут в себе информацию о физических процессах, происходящих в большом объеме пространства. Проведенные для рассматриваемого события оценки скорости распространения БМЗВ (с учетом скорости СВ) и скорости частиц КЛ при установленном сдвиге в 12 часов показывают, что модуляция потока галактических КЛ происходила в области на расстоянии 0.1-0.2 а. е. от Земли по направлению к Солнцу. Отсюда становится ясно, почему максимальные значения  $\Gamma_{КЛ}$  значительно опережают во времени соответствующие значения  $\Gamma_{Вн}$  (рис. 4 и 5), а также и приход самого возмущения СВ на орбиту Земли.

Применение приведенных выше соотношений (1) и (2) к наблюдаемым спектрам флуктуаций интенсивности галактических КЛ и модуля ММП показывает, что возникновение наблюдаемых флуктуаций галактических КЛ обусловлено наличием в это время в межпланетной среде именно БМЗВ и их модулирующим воздействием на изотропную часть функции распределения КЛ. А поскольку эти волны имеют большие декременты затухания, то можно утверждать, что они генерируются локально вблизи орбиты Земли. Здесь нужно заметить, что в спектр ММП вносят существенный вклад и альфвеновские волны, которые практически всегда присутствуют в межпланетной среде. Чтобы установить их спектр, достаточно наблюдаемый спектр модуля ММП домножить на коэффициент когерентности между величиной ММП и скоростью СВ. А для определения спектра БМЗВ наблюдаемый спектр модуля ММП нужно умножить на коэффициент когерентности между величиной ММП и плотностью СВ. Для примера, на рис. 6 приведены спектры флуктуаций модуля ММП, а также спектры быстрых магнитозвуковых и альфвеновских волн за 11:01 UT 23 августа – 11:00 UT 24 августа 2018 г. Однако детальный анализ показывает, что альфвеновские волны не оказывают модулирующего воздействия на флуктуации галактических КЛ и не являются причиной их появления.

### Заключение

1. Установлено, что непосредственно перед приходом на орбиту Земли выброса корональной массы, вызвавшего сильную геомагнитную бурю 25–26 августа 2018 г. на инерционном участке спектров турбулентности солнечного ветра в области частот  $\sim 10^{-4} \div 1.67 \cdot 10^{-3}$  Гц наблюдались быстрые магнитозвуковые волны значительной амплитуды.

2. Эти волны были сгенерированы в области взаимодействия медленного и быстрого потока СВ.

3. Поток галактических КЛ был подвержен модуляции со стороны быстрых магнитозвуковых волн на расстоянии 0.1-0.2 а.е. от Земли, что проявилось как появление и регистрация значимых флуктуаций интенсивности галактических КЛ почти за сутки до начала геомагнитной бури.

4. Полученные результаты указывают на возможность разработки и реализации в режиме реального времени на основе наземных измерений интенсивности КЛ метода краткосрочного (около 1–2 суток) прогноза сильных геофизических проявлений космической погоды.

### Л и т е р а т у р а

1. Carmichael, H. Cosmic Rays / H. Carmichael // IQSY Instruction Manual, – 1964. – № 7.
2. Simpson, J. A. Neutron Monitor / J. A. Simpson // Chicago. – 1955.
3. Авакян, С. В. Роль космических и ионосферных возмущений в глобальных климатических изменениях и коррозии трубопроводов / С. В. Авакян, Н. А. Воронин // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 3. – С. 14-29.
4. Гуревич, В. И. Проблема геомагнитно-индуцированных токов в энергосистемах и её решение / В. И. Гуревич // Энергетика и электрооборудование. – 2015. – № 3. – С. 20–23, № 4. – С. 30 – 32.
5. Кузнецов, В. Д. Необходимость защиты объектов энергоинфраструктуры от магнитных бурь / В. Д. Кузнецов, Н. А. Махутов // Астрокосмический курьер. – 2011. – Т. 1 (73). – С. 66-67.
6. Петрукович, А. А. У природы есть и космическая погода / А. А. Петрукович, Л. М. Зеленый // Наука и жизнь. – 2001. – № 10.
7. The Solar Sources of Geoeffective Structures / D. F. Webb, N. U. Crooker, S. P. Plunkett, O. C. St. Cyr // Space Weather, AGU Monograph 125. – P. 123/ – 2001/
8. Явления в космических лучах в августе 1972 г. / Г. Ф. Крымский, А. И. Кузьмин, В. И. Козлов [и др.] // Изв. АН СССР. Серия Физика. – 1973. – Т. 37. – С. 1205–1210.
9. Козлов, В. И. Возможный метод диагностики состояния межпланетной среды по данным динамического спектра флуктуаций космических лучей / В. И. Козлов // Бюл. НТИ. Проблемы космофизики и аэронавтики. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, январь 1976. – С. 9-11.
10. Дорман, Л. И. Короткопериодические вариации интенсивности космических лучей / Л. И. Дорман, И. Я. Либин // УФН. – 1985. – Т. 145. – С. 403–440.
11. Berezhko, E. G. Cosmic ray intensity micropulsations associated with disturbances of electromagnetic conditions in heliosphere / E. G. Berezhko, V. I. Kozlov, A. I. Kuzmin, N. Tugolukov // Proc. 20-th ICRC. Moscow, USSR, Aug. 2-15. – 1987. – V. 4. – P.99–102.
12. Либин, И. Я. Исследование флуктуаций космических лучей в периоды форбуш-понижений / И. Я. Либин // Космические лучи. – Москва : Радио и связь. 1983. – № 22. – С. 21–43.
13. Kudela, K. Short Periodic Cosmic Ray Fluctuations at High Mountain Neutron Monitor / K. Kudela, M. Gobl // Proc. 21-th ICRC. Adelaide, Australia, Jan. 06-19, 1990. – V. 7. – P. 104-107.
14. Kudela, K. Cosmic-Ray Fluctuations and Interplanetary Magnetic Fields / K. Kudela, M. Slivka, M. Stehlik // Astrophys. and Space Sci. – 1993. – V. 199. – P. 125-132.
15. Вашенюк, Э. В. Коррелированные вариации космических лучей и ММП во время крупного гелиосферного возмущения 19-21 октября 1989 г. / Э. В. Вашенюк, В. С. Смирнов, В. С. Исмаилов // Геомагнетизм и аэронавтика. – 1997. – Т. 37. – № 3. – С. 148–153.
16. Вашенюк, Э. В. Структура крупномасштабного гелиосферного возмущения по данным о флуктуациях космических лучей / Э. В. Вашенюк, В. С. Смирнов, В. С. Исмаилов // Изв. АН СССР. Серия Физика. – 1997. – Т. 41. – № 6. – С. 1088–1093.
17. Бережко, Е. Г. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей / Е. Г. Бережко, С. А. Стародубцев // Изв. АН СССР. Серия Физика. – 1988. – Т. 52. – С. 2361–2363.
18. Флуктуации космических лучей и межпланетного магнитного поля в окрестности фронтов межпланетных ударных волн / С. А. Стародубцев, А. В. Григорьев, В. Г. Григорьев [и др.] // Изв. РАН. Серия Физика. – 2007. – Т. 71. – С. 1022–1024.
19. Флуктуации интенсивности космических лучей и межпланетного магнитного поля в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью / С. А. Стародубцев, И. А. Транский, М. И. Веригин [и др.] // Геомагнетизм и аэронавтика. – 1996. – Т. 36. – С. 134-138.
20. Starodubtsev, S. A. Rapid Cosmic Ray Fluctuations: Evidence for Cyclic Behaviour / S. A. Starodubtsev, I. G. Usosokin, K. Mursula // Solar Phys. – 2004. – V. 224. – P. 335–343.
21. Owens, A. J. Cosmic-ray scintillations.2. General Theory of Interplanetary Scintillations / A. J. Owens // J. Geophys. Res., 1974. – V. 79. – P. 895–906.
22. Бережко, Е. Г. Генерация МГД-волн в межпланетной плазме потоками солнечных космических лучей / Е. Г. Бережко // Письма в Астрон. журн. – 1990. – Т. 16. – С. 1123–1132.

23. Бережко, Е. Г. Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами / Е. Г. Бережко // Письма в Астрон. журн. 1986. – Т. 12. – С. 842–847.
24. Korzhov, N. P. On the role of plasma parameters and the Kelvin–Helmholtz instability in a viscous interaction of solar wind streams / N. P. Korzhov, V. V. Mishin, V. M. Tomozov // Planet. Space Sci. – 1984. – V. 32. – Iss. 9. – P. 1169–1178.
25. Goldstein, M. I. Magnetohydrodynamic turbulence in the solar wind / M. I. Goldstein, D. A. Roberts, W. H. Matthaeus // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1995. – V. 33. – Iss. 1. – P. 283–325.
26. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Энноксон // Москва : Мир, 1982. – 430 с.
27. Proton and electron mean free paths: the Palmer consensus revisited / J. W. Bieber, W. H. Matthaeus, C. W. Smith [et al.] // Astrophys. 1994. – J. 420. – P. 294–306.
28. Palmer, I. D. Transport coefficients of low-energy cosmic rays in interplanetary space / I. D. Palmer // Rev. Geophys., 1982. – 20. – P. 335–351.

### References

1. Carmichael, H. Cosmic Rays / H. Carmichael // IQSY Instruction Manual, – 1964. – No. 7.
2. Simpson, J. A. Neutron Monitor / J. A. Simpson // Chicago. – 1955.
3. Avakyan, S.V. The role of cosmic and ionospheric disturbances in global climate change and corrosion of pipelines / S.V. Avakyan, N.A. Voronin // Research of the Earth from space. – 2011. – No. 3. – P. 14–29.
4. Gurevich, V. I. The problem of geomagnetically induced currents in power systems and its solution / V. I. Gurevich // Power engineering and electrical equipment. – 2015. – No. 3. – P. 20–23, No. 4. – P. 30–32.
5. Kuznetsov, V. D. The need to protect energy infrastructure facilities from magnetic storms / V. D. Kuznetsov, N. A. Makhutov // Astrocosmic Courier. – 2011. – T. 1 (73). – P. 66–67.
6. Petrukovich, A. A. Nature also has space weather / A. A. Petrukovich, L. M. Zeleny // Science and Life. – 2001. – No. 10.
7. The Solar Sources of Geoeffective Structures / D. F. Webb, N. U. Crooker, S. P. Plunkett, O. C. St. Cyr // Space Weather, AGU Monograph 125. – P. 123/ – 2001/
8. Phenomena in cosmic rays in August 1972 / G. F. Krymsky, A. I. Kuzmin, V. I. Kozlov [et al.] // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Series Physics. – 1973. – T. 37. – p. 1205–1210.
9. Kozlov, V. I. A possible method for diagnosing the state of the interplanetary medium according to the data of the dynamic spectrum of fluctuations of cosmic rays / V. I. Kozlov, Byull. NTI. Problems of space physics and aeronomy. – Yakutsk: Yakut Branch of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, January 1976. – P. 9–11.
10. Dorman, L. I., Libin, I. Ya., Short-period variations of cosmic ray intensity, Phys. – 1985. – T. 145. – P. 403–440.
11. Berezhko, E. G. Cosmic ray intensity micropulsations associated with disturbances of electromagnetic conditions in heliosphere / E. G. Berezhko, V. I. Kozlov, A. I. Kuzmin, N. Tugolukov // Proc. 20-th ICRC. Moscow, USSR, Aug. 2-15. – 1987. – V. 4. – P.99–102.
12. Libin, I. Ya. Investigation of fluctuations of cosmic rays during periods of Forbush declines / I. Ya. Libin // Cosmic rays. – Moscow: Radio and communications. 1983. – No. 22. – P. 21–43.
13. Kudela, K. Short Periodic Cosmic Ray Fluctuations at High Mountain Neutron Monitor / K. Kudela, M. Gobl // Proc. 21-th ICRC. Adelaide, Australia, Jan. 06-19, 1990. – V. 7. – P. 104-107.
14. Kudela, K. Cosmic-Ray Fluctuations and Interplanetary Magnetic Fields / K. Kudela, M. Slivka, M. Stehlik // Astrohys. and Space Sci. – 1993. – V. 199. – P. 125-132.
15. Vashenyuk, E. V. Correlated variations of cosmic rays and IMF during a major heliospheric disturbance October 19-21, 1989 / E. V. Vashenyuk, V. S. Smirnov, V. S. Ismagilov // Geomagnetism and Aeronomy. – 1997. – T. 37. – No. 3. – P. 148-153.
16. Vashenyuk, E. V., Smirnov, V. S., and Ismagilov, V. S., “The structure of a large-scale heliospheric disturbance based on data on cosmic ray fluctuations,” Izv. Academy of Sciences of the USSR. Series Physics. – 1997. – T. 41. – No. 6. – p. 1088–1093.

17. E. G. Berezhko and S. A. Starodubtsev, "The nature of the dynamics of the spectrum of cosmic ray fluctuations," Academy of Sciences of the USSR. Series Physics. – 1988. – Т. 52. – p. 2361–2363.
18. Starodubtsev, S. A., Grigor'ev, A. V., Grigoriev, V. G., et al., Fluctuations of cosmic rays and the interplanetary magnetic field in the vicinity of interplanetary shock wave fronts, *Izv. RAN. Series Physics.* – 2007. – Т. 71. – P. 1022–1024.
19. Starodubtsev S. A., Transkiy I. A., Verigin M. I. [et al.] Fluctuations in the intensity of cosmic rays and the interplanetary magnetic field in the region of interaction of solar wind flows with different speeds // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 1996. – Т. 36. – p. 134–138.
20. Starodubtsev, S. A. Rapid Cosmic Ray Fluctuations: Evidence for Cyclic Behaviour / S. A. Starodubtsev, I. G. Usosokin, K. Mursula // *Solar Phys.* – 2004. – V. 224. – P. 335–343.
21. Owens, A. J. Cosmic-ray scintillations.2. General Theory of Interplanetary Scintillations / A. J. Owens // *J. Geophys. Res.*, 1974. – V. 79. – P. 895–906.
22. Berezhko, E. G. Generation of MHD waves in interplanetary plasma by fluxes of solar cosmic rays / E. G. Berezhko // *Letters to Astron. magazine* – 1990. – Т. 16. – P. 1123–1132.
23. E. G. Berezhko, "Instability in a shock wave propagating in a gas with cosmic rays," *E. G. Berezhko, Astron. magazine* 1986. – Т. 12. – P. 842–847.
24. Korzhov, N. P. On the role of plasma parameters and the Kelvin–Helmholtz instability in a viscous interaction of solar wind streams / N. P. Korzhov, V. V. Mishin, V. M. Tomozov // *Planet. Space Sci.* – 1984. – V. 32. – Iss. 9. – P. 1169–1178.
25. Goldstein, M. I. Magnetohydrodynamic turbulence in the solar wind / M. I. Goldstein, D. A. Roberts, W. H. Matthaeus // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1995. – V. 33. – Iss. 1. – P. 283–325.
26. Otnes, R. Applied analysis of time series / R. Otnes, L. Enokson // *Moscow: Mir*, 1982. – 430 p.
27. Proton and electron mean free paths: the Palmer consensus revisited / J. W. Bieber, W. H. Matthaeus, C. W. Smith [et al.] // *Astrophys.* 1994. – J. 420. – P. 294–306.
28. Palmer, I. D. Transport coefficients of low-energy cosmic rays in interplanetary space / I. D. Palmer // *Rev. Geophys.*, 1982. – 20. – P. 335–351.

---

*ЗВЕРЕВ Антон Сергеевич* – аспирант, Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: ZverevAS@ikfia.ysn.ru

*ZVEREV Anton Sergeevich* – postgraduate, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

*ГОЛОЛОБОВ Петр Юрьевич* – м. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: gpeter@ikfia.ysn.ru

*GOLOLOBOV Petr Yurievich* – Junior Researcher, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

*ГРИГОРЬЕВ Владислав Георгиевич* – к. ф.-м. н., с. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: grig@ikfia.ysn.ru

*GRIGORYEV Vladislav Georgievich* – Candidate of Sciences (in Physics and Mathematics), Senior Researcher, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

*СТАРОДУБЦЕВ Сергей Анатольевич* – д. ф.-м. н., директор, Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: starodub@ikfia.ysn.ru

*STARODUBTSEV Sergey Anatolyevich* – Doctor of Science (in Physics and Mathematics), Director, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.