

УДК 530.1

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-1-58-69

## Прогноз возмущений солнечного ветра и геомагнитных бурь на основе наземных измерений космических лучей

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

Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН), Якутск, Россия,  
✉ zverevas@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** В данной работе сообщается о разработанных нашей группой в ИКФИА СО РАН методах прогноза негативных проявлений космической погоды на основе наземных измерений космических лучей. Такие проявления регистрируются на Земле в виде понижений галактических космических лучей, известных под названием эффекты Форбуша, различного типа геомагнитных и ионосферных возмущений, а также полярных сияний. Причем последние являются единственным, видимым непосредственно невооруженным глазом человека проявлением космической погоды, а остальные регистрируются только с помощью различных приборов. Все эти явления обусловлены прохождением через орбиту Земли, например, значительных потоков заряженных частиц солнечного и межпланетного происхождения, межпланетных ударных волн, выбросов корональной массы вещества Солнца и высокоскоростных потоков солнечного ветра, которые обусловлены уровнем вспышечной и корональной активности Солнца. Их наличие определяет состояние космической погоды в окрестностях Земли. Для мониторинга состояния околоземного космического пространства мы не только используем данные наземных станций космических лучей, но и привлекаем несколько методов анализа этих измерений. С другой стороны, для верификации событий мы также используем информацию о Dst-индексе состояния геомагнитного поля, а также данные прямых измерений параметров межпланетной среды на космических аппаратах ACE, WIND, SOHO и DSCOVR, находящихся в точке либрации L1. В результате мы создали методы краткосрочного (до 1–3 суток) прогноза наземных проявлений космической погоды. Полученные нами результаты указывают на возможность осуществления в режиме реального времени прогноза начала сильных геомагнитных бурь на основе использования только данных наземных измерений станций космических лучей.

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

*В работе использовались данные измерений станций космических лучей, 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 космических кораблей ACE, WIND, SOHO и DSCOVR за предоставление данных прямых измерений параметров межпланетной среды в открытом доступе. Работа поддержана грантом РНФ №22-22-20045.*

**Для цитирования:** Зверев А. С., Гололобов П. Ю., Григорьев В. Г., Стародубцев С. А. Прогноз возмущений солнечного ветра и геомагнитных бурь на основе наземных измерений космических лучей. Вестник СВФУ. 2024, Т. 21, №1. С. 58–69. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-58-69

## Forecasting solar wind disturbances and geomagnetic storms from ground-based cosmic ray measurements

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

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences (ShICRA SB RAS), Yakutsk, Russia

✉ zverevas@ikfia.ysn.ru

**Abstract.** This work reports on the methods developed by our group at ShICRA SB RAS to forecast negative manifestations of space weather from ground-based measurements of cosmic rays. Such manifestations are registered on the Earth in the form of decreases in galactic cosmic rays known as the Forbush effects, various types of geomagnetic and ionospheric disturbances, as well as auroras. Only the latter are directly visible to the naked eye, while the rest can only be detected with the help of various instruments. These occurrences are all caused by passage through the Earth's orbit, such as the substantial influxes of charged particles from both solar and interplanetary sources, interplanetary shock waves, ejections of solar material and high-speed solar wind streams, all of which are attributed to the level of solar flares and coronal activity. The state of near-Earth space weather is determined by their presence. To monitor this state, we use data collected from ground-based cosmic ray stations and employ multiple methods to analyse these measurements. Additionally, we incorporate data from the Dst-index of the geomagnetic field and measurements of the interplanetary environmental parameters gathered by ACE, WIND, SOHO and DSCOVR spacecraft at the L1 libration point to confirm events. This has led to the development of techniques for predicting terrestrial effects of space weather in the short-term (1-3 days). Our findings suggest that it is feasible to predict the occurrence of severe geomagnetic storms in real-time through the utilisation of solely ground-based measurements from cosmic ray stations.

**Ключевые слова:** cosmic rays, solar wind, interplanetary shock wave, high-velocity flow, geomagnetic storm, Forbush effect, neutron monitor, muon telescope.

*The data of measurements of Russian National Ground Network of Cosmic Ray Stations were used in this work. The authors express their gratitude to the World Data Center for Geomagnetism in Kyoto (Japan), as well as the ACE, WIND, SOHO and DSCOVR spacecraft teams for providing data on direct measurements of interplanetary medium parameters made accessible freely. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-22-20045.*

**For citation:** Zverev A. S., Gololobov P. Yu., Grigoryev V. G., Starodubtsev S. A. Forecasting solar wind disturbances and geomagnetic storms from ground-based cosmic ray measurements. Vestnik of NEFU. 2024, Vol. 21, No. 1. Pp. 58–69. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-58-69

### Введение

В настоящее время в научной среде и в нашей стране, и за ее пределами большое внимание уделяется вопросам прогноза космической погоды. Достаточно сказать, что во многих развитых странах, как минимум с 1995 г., существуют национальные центры прогноза космической погоды. К сожалению, в России подобного единого центра до сих пор нет, и проблемы, связанные с космической погодой, научные институты изучают самостоятельно. Хотя необходимость создания такого координационного центра во многом обусловлена начавшимся в последние годы и бурно развивающимся строительством различных промышленных объектов в Арктической зоне РФ, где, как известно, сосредоточены большие еще не разработанные природные запасы различных углеводородов и минералов.

Для целей прогноза космической погоды в развитых странах мира создают и запускают дорогостоящие спутники, создают центры управления и соответствующую инфраструктуру. Однако, с другой стороны, многие годы существует мировая сеть станций космических лучей (КЛ). Сейчас она значительно сократилась, но тем не менее она включает в себя примерно 40 станций, приемные конуса которых охватывают все небесную сферу. Причем 14 станций (около 30%) из всей мировой сети функционируют в России и объединены в уникальную научную установку «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536>). В нее входят также две станции КЛ, расположенные на территории Республики Саха (Якутия). Это станции КЛ Бухта Тикси и Якутск, данные регистрации которых мы постоянно используем в своей работе. В результате непрерывной работы станций КЛ почти за 6 циклов 11-летней солнечной активности на мировой сети станций КЛ накоплен огромный экспериментальный материал, который практически никем не используется в практических целях прогноза космической погоды. При этом финансовые затраты на поддержание работоспособности всех российских станций в течение года на порядки величин меньше, чем затраты на запуск только одного космического аппарата. В связи с этим возникает закономерный вопрос о возможности и необходимости использования данных измерений станций КЛ. Примером решения этой актуальной задачи могут служить результаты проводимых в ИКФИА СО РАН исследований вариаций интенсивности КЛ, которые с 2006 г. проводятся в режиме реального времени именно для целей краткосрочного прогнозирования наземных проявлений космической погоды. За это время мы пришли к выводу, что наиболее важным из возможных различных наземных проявлений космической погоды является необходимость создания методов прогноза сильных геомагнитных бурь. Именно они приводят к значительным возмущениям магнитосферно-ионосферных токовых систем, что ведет в свою очередь к наводке значительных геомагнитно индуцированных токов в протяженных линейных объектах. К ним, в частности, относятся линии электропередач с электроподстанциями, нефте- и газопроводы, на которых во время сильных геомагнитных возмущений часто регистрируются различного рода технологические сбои и аварии. Такой прогноз особенно важен для Арктической зоны РФ, где в силу структуры геомагнитного поля негативные проявления космической погоды наиболее сильны [1–3].

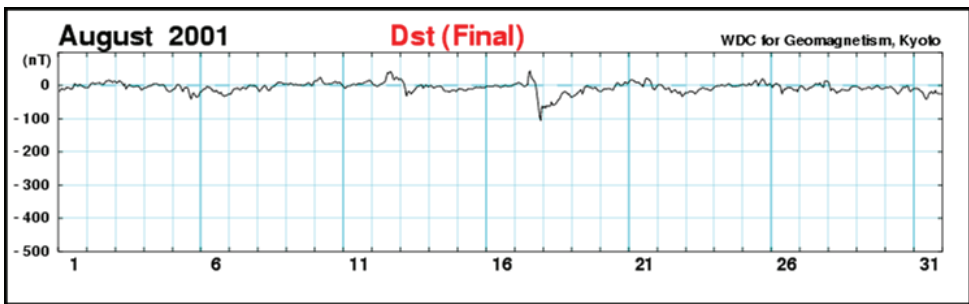
В связи с этим ниже приводятся некоторые полученные нами за последние годы результаты.

### **Материалы и методы исследования**

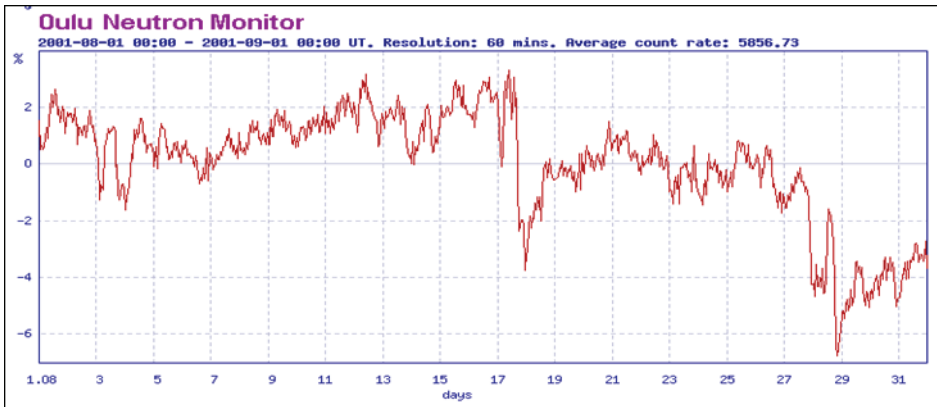
При мониторинге КЛ в режиме реального времени мы используем 1-час данные исправленных на приземное давление измерений нейтронных мониторов на мировой сети станций и находящихся в открытом доступе в международной базе данных NMDB: the Neutron Monitor Database, (<https://www.nmdb.eu>). Также мы привлекаем 5-мин данные измерений нейтронных мониторов станций КЛ Бухта Тикси и Якутск (<http://www.usn.ru/ipm>). Доступ ко всем данным является открытым для всех заинтересованных пользователей, и обращение к базам данных осуществляется автоматически с помощью программы-демона под управлением операционной системы Linux. После автоматической обработки результаты анализа выводятся в виде графической информации на специально разработанные и созданные сайты, которые расположены на сервере ИКФИА СО РАН.

Для научного анализа данных мы используем три метода:

1. разработанный в конце 1960-х годов в ИКФИА СО РАН метод глобальной съемки, который всю мировую сеть станций КЛ представляет как единый и многонаправленный прибор [4]. Среди прочего он позволяет получать параметры 1-й и 2-й сферических гармоник распределения КЛ;
2. хорошо известный и также широко применяемый метод гармонического анализа, который позволяет определять характеристики суточной анизотропии КЛ;



**Рис. 1.** Зависимость от времени Dst-индекса в августе 2001 г.  
(Киото, Япония, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)  
**Fig. 1.** Time dependence of Dst-index in August 2001  
(Kyoto, Japan, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)

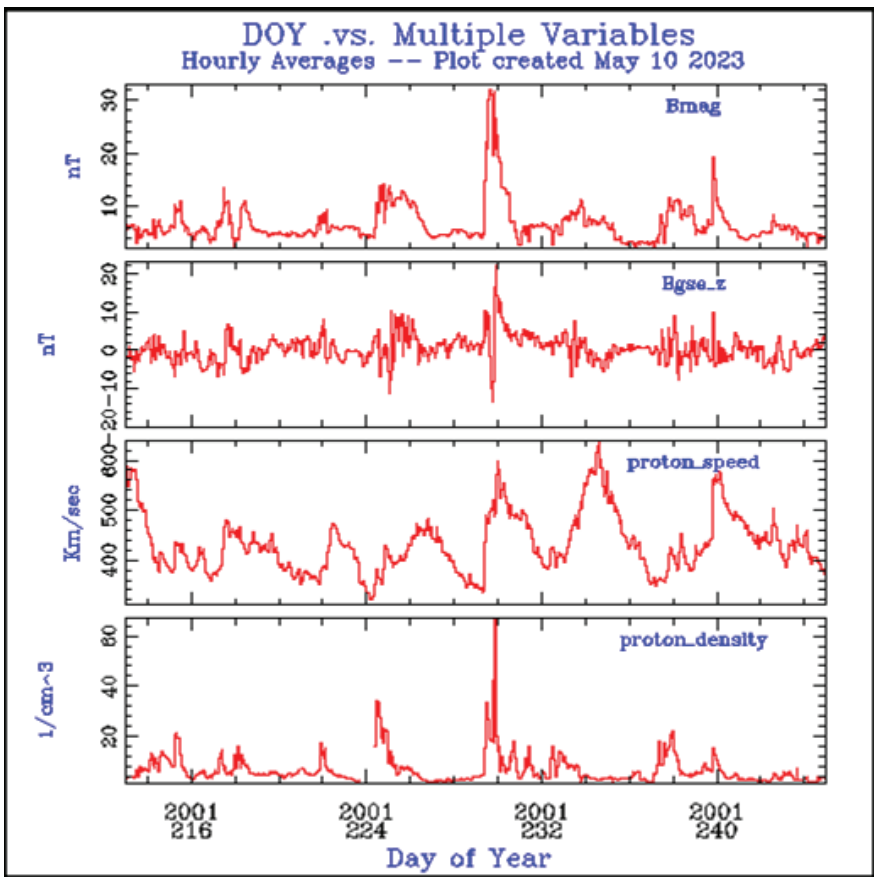


**Рис. 2.** Измерения нейтронного монитора 9-NM-64 на станции КЛ Оулу  
(Финляндия) для того же интервала времени (<https://cosmicrays.oulu.fi>)  
**Fig. 2.** Measurements of neutron monitor 9-NM-64 at CR Oulu station  
(Finland) for the same time interval (<https://cosmicrays.oulu.fi>)

3. методы спектрального анализа [5], с помощью которого мы исследуем динамику спектров флуктуаций КЛ (вариаций с периодами от нескольких минут до менее 3 часов), которые периодически возникают только в окрестности крупномасштабных возмущений СВ и которые, в отличие от 11-летних, 27-дневных и суточных вариаций интенсивности КЛ, невидимы невооруженным глазом [6–10].

**Результаты и обсуждение**

В качестве примера на рис. 1 приведена информация о поведении Dst-индекса, характеризующего изменчивость геомагнитного поля Земли, в августе 2001 г. Из него следует, что 17 августа на Земле была зарегистрирована магнитная буря с Dst около -100 нТл. А на рис. 2 показаны соответствующие этому интервалу времени вариации КЛ на станции Оулу. Сопоставление этих рисунков приводит к выводу, что в КЛ в это же время наблюдался эффект Форбуша с амплитудой около 7% относительно среднего фона. С другой стороны, рис. 2 показывает, что в 20-х числах августа 2001 г. в КЛ также наблюдалось существенное понижение примерно такой же амплитуды. Однако в геомагнитном поле в это время не было зарегистрировано какого-либо значимого возмущения (рис. 1). Такая ситуация говорит о неоднозначности в мониторинге геофизической обстановки. Для того чтобы разобраться в этой ситуации, необходимо

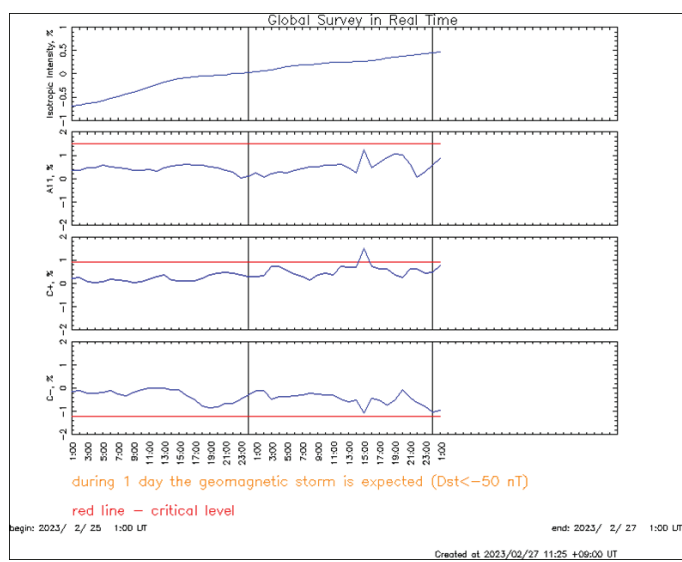


**Рис. 3.** Параметры СВ в августе 2001 г. по измерениям космического аппарата ACE (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/index.html>). Здесь сверху-вниз показаны модуль межпланетного магнитного поля (ММП), его Bz-компонента, скорость и плотность СВ. Даты указаны в стандартных терминах «день-года», где 1 января соответствует 1, а 31 декабря 365 дню года

**Fig. 3.** Parameters of the SW in August 2001 from measurements of the ACE spacecraft (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/index.html>). The interplanetary magnetic field modulus (IMF), its Bz-component, velocity and density of the SW are shown here from top to bottom. The dates are given in standard day-year terms, where 1 January corresponds to 1 and 31 December to 365 days of the year

привлекать данные прямых измерений солнечного ветра (СВ) на космических аппаратах, которые и характеризуют космическую погоду. Они приведены на рис. 3. Из него видно, что в это время межпланетная среда была достаточно возмущена – в эти дни величина межпланетного магнитного поля (ММП) достигала больших значений более 30 и 20 нТл, в скорости СВ были зарегистрированы высокоскоростные потоки величиной до 600 км/с и выше, а его плотность также существенно превышала средние значения 6–8 см<sup>-3</sup>. Но далеко не все они проявились в наземных измерениях геомагнитного поля и интенсивности КЛ.

Отсюда возникает закономерный вопрос: что же нужно прогнозировать? Опыт работы в области изучения космической погоды привел нас к выводу, что из всех ее наземных проявлений наиболее важным является прогноз сильных геомагнитных бурь с Dst<-50 нТл. Это обусловлено тем обстоятельством, что именно они несут в себе наибольшие риски технологических сбоев, аварий и даже катастроф на протяженных линейных объектах, а также заметным образом влияют на здоровье человека на Севере.



**Рис. 4.** Пример прогноза геомагнитной бури с использованием метода глобальной съемки и данных мировой сети станций нейтронных мониторов. Здесь сверху-вниз показаны: изотропная интенсивность КЛ, амплитуда 1-й гармоники распределения КЛ ( $A_{11}$ ), сумма положительных значений зональной компоненты высокочастотной части изотропной составляющей  $C_0$  и зональных компоненты первой  $C_{10}$  и второй  $C_{20}$  сферических гармоник распределения КЛ ( $C_+$ ), сумма отрицательных значений зональной компоненты высокочастотной части изотропной составляющей  $C_0$  и зональных компоненты первой  $C_{10}$  и второй  $C_{20}$  сферических гармоник распределения КЛ ( $C_-$ ). Красными линиями показаны критические уровни для автоматической выработки прогноза

**Fig. 4.** Example of geomagnetic storm forecast using the global survey method and data of the world network of neutron monitor stations. Here from top to bottom are shown: isotropic CR intensity, amplitude of the 1st harmonic of the CR distribution ( $A_{11}$ ), the sum of positive values of the zonal component of the high-frequency part of the isotropic component  $C_0$  and zonal components of the first  $C_{10}$  and second  $C_{20}$  spherical harmonics of the CR distribution ( $C_+$ ), the sum of negative values of the zonal component of the high-frequency part of the isotropic component  $C_0$  and zonal components of the first  $C_{10}$  and second  $C_{20}$  spherical harmonics of the CR distribution ( $C_-$ ). The red lines show the critical levels for automatic forecast generation

На основе метода глобальной съемки и его реализации в режиме реального времени мы разработали и реализовали подход к прогнозу таких событий за время от нескольких часов до 1–2 суток. При этом вероятность прогноза составляет величину около 75%. Рис. 4 является примером такого прогноза, который был дан в 15 UT 26 февраля 2023 г., а рис. 5 подтверждает, что сильная геомагнитная буря действительно была зарегистрирована через 8 часов в 23 UT. Этого времени достаточно для принятия предупреждающих мер, чтобы избежать различных негативных проявлений космической погоды и на различные технологические системы и на здоровье человека.

Результаты прогноза геомагнитных бурь на основе метода глобальной съемки представлены на сайте [http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global\\_survey\\_real\\_time.html](http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html).

Другой подход к прогнозу сильных геомагнитных бурь иллюстрируют рис. 6 и 7. На них представлены результаты по прогнозу другого события на основе применения гармонического анализа данных измерений нейтронного монитора и мюонного телескопа на станции КЛ Якутск. Эти два детектора КЛ расположены в одном месте, но имеют



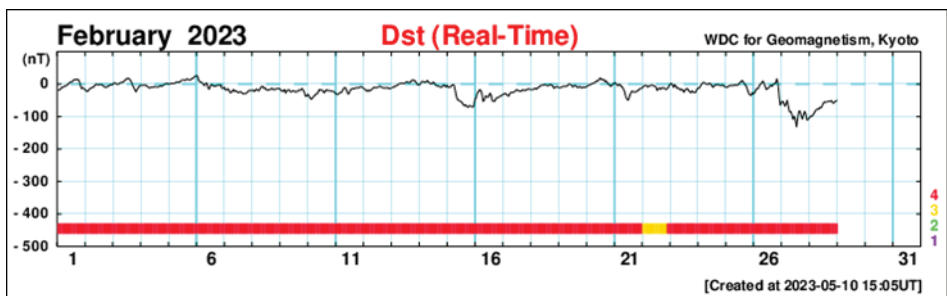


Рис. 5. Зависимость от времени Dst-индекса в феврале 2023 г. (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)

Fig. 5. Time dependence of the Dst-index in February 2023 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)

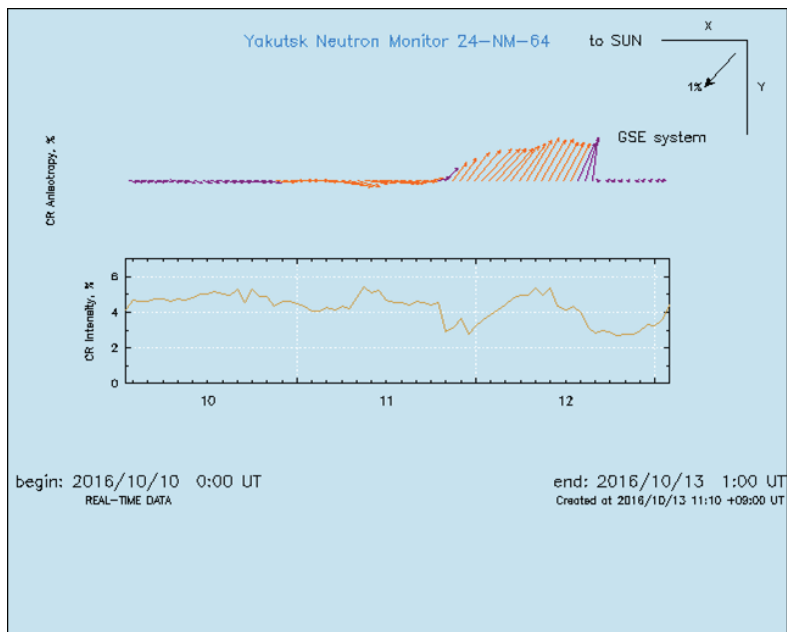


Рис. 6. Зависимость от времени суточной анизотропии и интенсивности КЛ по данным регистрации нейтронного монитора 24-NM-64 в Якутске для периода времени 10–12 октября 2016 г.

Fig. 6. Time dependence of the diurnal anisotropy and CR intensity from the registration data of the neutron monitor 24-NM-64 in Yakutsk for the time period 10–12 October 2016

существенно различные энергетические характеристики. Нейтронные мониторы регистрируют КЛ с медианными энергиями  $E_{\text{мед}}=15.8$  ГэВ, а для мюонных телескопов –  $E_{\text{мед}}=50.8$  ГэВ. На приведенных рисунках сверху показана GSE-система координат в плоскости (XY), где черной стрелкой показана условная анизотропия в 1%. Ниже стрелками показана динамика вектора анизотропии в этой плоскости. Однако, если анизотропия одновременно меняет свое направление на антисолнечное, то стрелки меняют свой цвет с синего на красный, что и служит индикатором приближающегося к Земле крупномасштабного возмущения СВ. В этом случае прогноз был выработан в течение длительного времени с конца 10 до начала 12 октября 2016 г., хотя в интенсивности КЛ не наблюдается какого-либо форбуш-понижения.

Тем не менее рис. 8 подтверждает тот факт, что примерно в 04 UT 13 октября 2016 г. началась сильная геомагнитная буря.

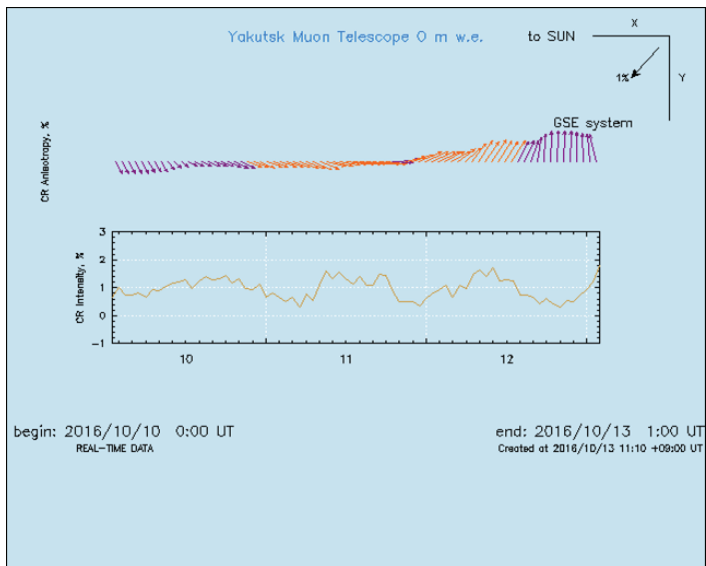


Рис. 7. Зависимость от времени суточной анизотропии и интенсивности КЛ по данным регистрации мюонного телескопа из направления вертикаль в Якутске для того же периода времени

Fig. 7. Time dependence of the diurnal anisotropy and CR intensity from the registration data of the muon telescope from the vertical direction in Yakutsk for the same time period

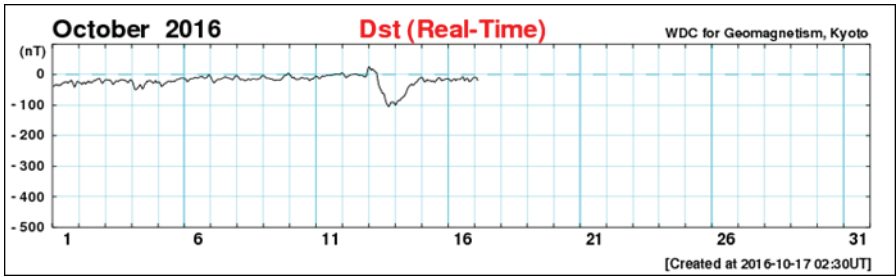


Рис. 8. Зависимость от времени Dst-индекса в октябре 2016 г. (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)

Fig. 8. Time dependence of the Dst-index in October 2016 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)

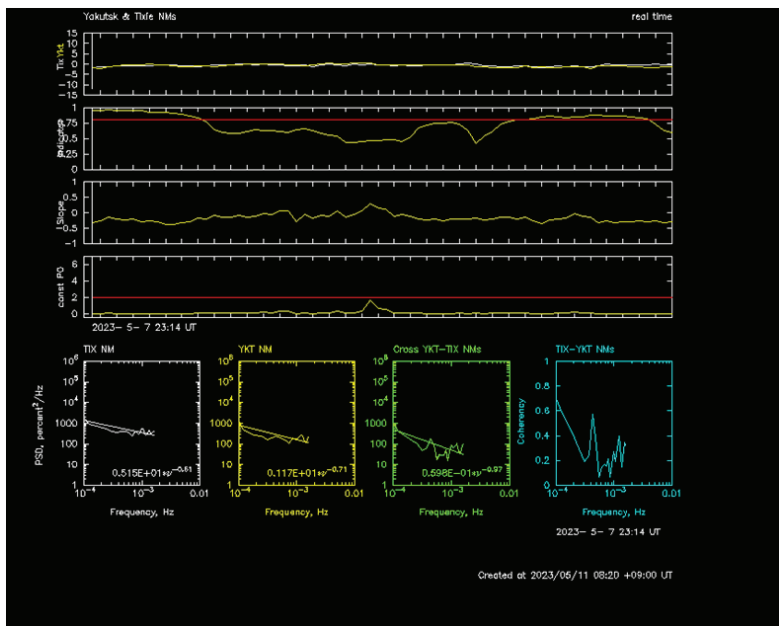
Результаты прогноза геомагнитных бурь на основе метода гармонического анализа данных измерений КЛ в одном пункте находятся в свободном доступе по адресу [http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/currents\\_real\\_time.html](http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/currents_real_time.html).

Отметим, что вероятность предсказания сильных геомагнитных бурь со значением  $Dst < -50$  нТл и с использованием этих двух методов не менее 75%.

С 2022 г. в рамках выполнения гранта РНФ мы начали разрабатывать еще один метод прогноза геомагнитных возмущений. Он основан на измерении флуктуаций интенсивности КЛ значительно разнесенными в пространстве (более чем на 1200 км по прямой) и совершенно независимыми нейтронными мониторами в Якутске и Тикси и применении методов спектрального анализа для их выделения из фона [10].

В качестве примера на рис. 9 показаны результаты прогноза космической погоды в мае 2023 г. На этом рисунке сверху-вниз приведены: интенсивность КЛ (I), регистрируемая нейтронными мониторами в Бухте Тикси (белая кривая) и Якутске (желтая кривая); как предиктор возмущений СВ показано поведение текущего максимального значения





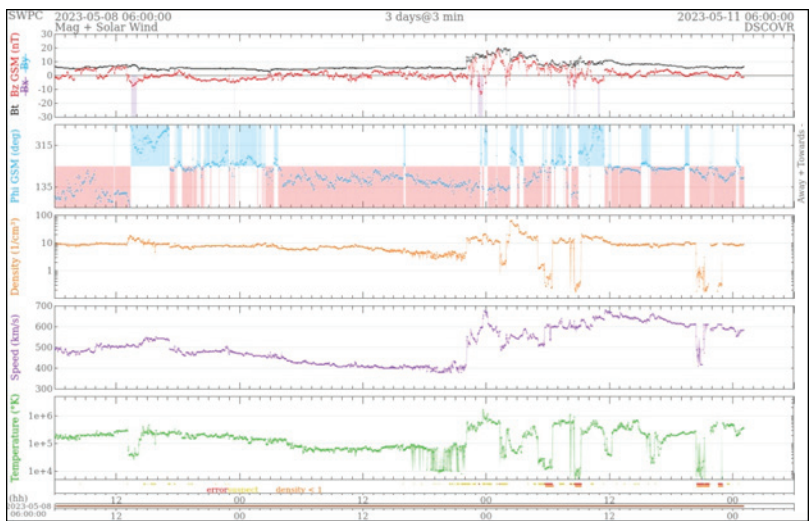
**Рис. 9.** Результаты прогноза геомагнитных бурь на основе измерения флуктуаций КЛ на станциях Бухта Тикси и Якутск

**Fig. 9.** Results of geomagnetic storm forecasting based on measurements of CR fluctuations at the Tiksi Bay and Yakutsk stations

коэффициента когерентности флуктуаций КЛ (Indicator); далее, приведены значения наклона кросс-спектра спектра флуктуаций КЛ (slope); затем график постоянной кросс-спектра спектра флуктуаций КЛ (const P0). Эти величины определяются стандартным методом наименьших квадратов при описании спектров мощности флуктуаций интенсивности КЛ степенной функцией вида:  $P(v)=P_0 \cdot v^{-\alpha}$ , где  $P$  – мощность,  $v$  – частота,  $P_0$  – постоянная спектра и  $\alpha$  – показатель степени. Линии красного цвета на этих рисунках означают эмпирические критические уровни, превышение которых indicator и const P0 являются предикторами приближающего возмущения СВ. Четыре белые вертикальные линии на этих рисунках соответствуют текущему времени. Наконец, четыре нижние панели слева-направо показывают: 1 и 2 текущие значения авто-спектров, 3 – кросс-спектр и 4 – коэффициент когерентности зарегистрированных флуктуаций КЛ на этих двух станциях. В реальности на сайте представлены не статические, а динамические картинки, которые дают более полное представление о процессах, происходящих в околоземном космическом пространстве.

Как видно из этого рисунка, в начале 9 мая 2023 г. один из предвестников – indicator – превысил критический уровень. Это означает, что в течение 1–2 суток ожидается приход на орбиту Земли крупномасштабного возмущения СВ. Действительно, прямые измерения параметров СВ, проводимые в точке либрации L1 космическим аппаратом DSCOVR, подтвердили, что в конце 9 мая 2023 г. им была зарегистрирована межпланетная ударная волна (рис. 10). Это крупномасштабное возмущение СВ не вызвало на Земле значительного возмущения геомагнитного поля, но наша работа еще не закончена и сейчас мы набираем статистику, чтобы прогнозировать проявления космической погоды в виде сильных геомагнитных бурь. А пока проходит этап тестирования алгоритмов и программ в режиме реального времени.

В настоящее время к анализу измерений двух нейтронных мониторов мы добавили информацию, получаемую в Якутске двумя различными мюонными телескопами.



**Рис. 10.** Параметры СВ по измерениям на космическом аппарате DSCOVR в период времени 8–11 мая 2023 г. Сверху-вниз показаны: модуль и Bz-компонента ММП, азимутальный угол направления вектора ММП, плотность, скорость и температура СВ (<https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>)

**Fig. 10.** SW parameters from measurements of DSCOVR during the time period of 8–11 May 2023.

From top to bottom are shown: modulus and Bz-component of the IMF, azimuthal angle of the IMF vector direction, density, velocity and the SW temperature (<https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>)

Конструктивно это совершенно разные приборы, которые установлены на уровне земли на станции КЛ Якутск. Один телескоп МТ0 на газоразрядных счетчиках СГМ-14, другой SMT0 – на сцинтилляционных счетчиках СЦ-301. Они имеют разные площади регистрации – 3.5 м<sup>2</sup> МТ0, а для SMT0 – 8 м<sup>2</sup>. Они также имеют и разный средний статистический счет: примерно 18700 имп/мин для первого телескопа и 24600 имп/мин для второго. В целях нашего анализа мы используем их 5-мин с поправками на приземное давление данные. При этом основная идея состоит в том, что поскольку мюонные телескопы регистрируют КЛ значительно больших энергий, чем нейтронные мониторы, то они должны чувствовать приближающиеся к Земле крупномасштабные возмущения СВ гораздо раньше, чем нейтронные мониторы. Это в принципе дает еще большее время для принятия упреждающих мер от негативных проявлений космической погоды. Проводимые нами эксперименты подтверждают это, и в настоящее время мы набираем статистику событий.

С предварительными результатами прогноза с использованием методов спектрального анализа можно ознакомиться по адресу: <https://www.ysn.ru/~starodub/CosmicRayFluctuations/index.html>.

**Заключение**

Таким образом, на основе проведенной нами работы можно сделать следующие выводы:

1. Очевидно, что необходим прогноз любых серьезных проявлений космической погоды как в околоземном космическом пространстве, так и на Земле, используя при этом все возможные доступные данные наблюдений, включая солнечные и радиотелескопы, а также прямые измерения параметров межпланетной среды на космических аппаратах.
2. Для негативных наземных проявлений космической погоды особенно важен прогноз интенсивных геомагнитных бурь, поскольку именно они несут наибольшие риски аварий и катастроф на протяженных линейных объектах (например, ЛЭП, газо- и нефтепроводы).

И именно с ними из-за больших наведенных геомагнитных токов связаны наибольшие вероятные экономические потери в наземной инфраструктуре активно развивающихся сейчас регионах Арктической зоны Российской Федерации.

3. В создавшихся геополитических условиях требуется обратить самое пристальное внимание на современное состояние инфраструктуры российских научных станций и обсерваторий, а в практических целях прогноза космической погоды необходимо переходить на детальный анализ их данных.

4. Разработанные и реализованные нами на основе наземных измерений интенсивности КЛ методы прогноза космической погоды требуют дальнейшей работы с целью получения более точных оценок прогноза грядущих геомагнитных возмущений в текущем 25-м цикле солнечной активности.

### Л и т е р а т у р а

1. 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.
2. Гуревич, В. И. Проблема геомагнитно-индуцированных токов в энергосистемах и её решение / В. И. Гуревич // Энергетика и электрооборудование. – 2015. – № 3. – С. 20–23 и № 4. – С. 30–32.
3. 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.
4. Космические лучи и солнечный ветер / Г. Ф. Крымский, А. И. Кузьмин, П. А. Кривошапкин [и др.] // Новосибирск : Наука, 1981. – 224 с.
5. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Эноксон // Москва : Мир, 1982. – 430 с.
6. Бережко, Е. Г. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей / Е. Г. Бережко, С. А. Стародубцев // Известия АН СССР, серия Физическая. – 1988. – Т. 52. – С. 2361–2363.
7. Флуктуации космических лучей и межпланетного магнитного поля в окрестности фронтов межпланетных ударных волн / С. А. Стародубцев, А. В. Григорьев, В. Г. Григорьев [и др.] // Известия РАН, серия Физическая. 2007. – Т. 71. – С. 1022–1024.
8. 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 аэрономия. – 1996. – Т. 36. – С. 134–138.
9. Starodubtsev S.A., Usoskin I.G., Mursula K. Rapid Cosmic Ray Fluctuations: Evidence for Cyclic Behaviour. // Solar Phys. 2004. - V. 224. - P. 335-343.
10. 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. – № 4 (90). – 2022. – С. 26–39. DOI:10.25587/SVFU.2022.81.41.004.

### R e f e r e n c e s

1. Avakyan, S.V. and Voronin, N.A. (2011). The role of cosmic and ionospheric disturbances in global climate change and corrosion of pipelines. *Research of the Earth from space*. 3. pp. 14 – 29.
2. Berezhko, E.G. and Starodubcev, S.A. (1988). The nature of the dynamics of the spectrum of cosmic ray fluctuations. *Academy of Sciences of the USSR. Series Physics*. 52. pp. 2361 – 2363.
3. Gurevich, V.I. (2015). The problem of geomagnetically induced currents in power systems and its solutions. *Power engineering and electrical equipment*. 3. pp. 20 – 23. 4. pp. 30 – 32.
4. Kuznetsov, V.D. and Makhutov, N.A. (2011). The need to protect energy infrastructure facilities from magnetic storms. *Astrocsmic Courier*. 1(73). pp. 66 – 67.
5. Krymsky, G.F., Kuzmin, A.I., Krivoshapkin, P.A. et al. (1981). *Cosmic rays and solar wind*. Novosibirsk: Nauka. 224 p.
6. Otnes, R. and Enokson, L. (1982). *Applied analysis of time series*. Moscow: Mir. 430 p.

7. Starodubtsev, S.A., Grigoriev, A.V., Grigoriev, V.G. et al. (2007). Fluctuations of cosmic rays and the interplanetary magnetic field in the vicinity of interplanetary shock wave fronts. *Izv. RAN. Series Physics*. 71. pp. 1022–1024.
8. Starodubtsev, S.A., Transkiy, I.A., Verigin, M.I. et al. (1996). Fluctuations in the intensity of cosmic rays and the interplanetary magnetic field in the region of interaction of solar wind flows with different speed. *Geomagnetism and Aeronomy*. 36. pp. 134–138.
9. Starodubtsev, S. A., Usosokin, I. G., Mursula, K. (2004). Rapid Cosmic Ray Fluctuations: Evidence for Cyclic Behaviour. *Solar Phys*. 224. pp. 335–343.
10. Zverev, A. S., Gololobov, P. Yu., Grigoryev, V. G. and Starodubtsev, S. A. (2022). Fluctuations in the intensity of galactic cosmic rays before the geomagnetic storm on August 25-26, 2018. *Vestnik of NEFU*. 4(90). pp. 26–39. DOI:10.25587/SVFU.2022.81.41.004

---

*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 Physical and Mathematical Sciences, 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 Physical and Mathematical Sciences, Director, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.