

ПРОГНОЗ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В АПРЕЛЕ–НОЯБРЕ 2024 Г. ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

FORECAST OF GEOMAGNETIC STORMS IN APRIL–NOVEMBER 2024 BASED ON COSMIC RAY MONITORING RESULTS

А.С. Зверев 

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, ZverevAS@ikfia.ysn.ru

В.Г. Григорьев 

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, grig@ikfia.ysn.ru

С.А. Стародубцев 

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

П.Ю. Гололобов 

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru

А.С. Zverev

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

В.Г. Grigoryev

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

С.А. Starodubtsev

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

P.Yu. Gololobov

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

Аннотация. В ИКФИА СО РАН с 2013 г. проводится непрерывный мониторинг пространственно-углового распределения космических лучей (КЛ) за каждый час измерений на основе данных международной базы нейтронных мониторов NMDB с использованием метода глобальной съемки в реальном времени. Для этого автоматически рассчитываются девять параметров распределения КЛ, обусловленных первыми двумя угловыми моментами функции пространственного распределения частиц в межпланетном пространстве. Проведенные нами исследования показали, что перед началом большинства геомагнитных бурь с Dst -индексом менее -50 нТл происходит резкое увеличение амплитуд северо-южных компонент распределения КЛ. Это может служить предиктором начала геомагнитных возмущений с заблаговременностью от нескольких часов до 1–2 сут. В данной работе приводятся результаты прогноза геомагнитных бурь с $Dst < -50$ нТл, наблюдавшихся в апреле–ноябре 2024 г., на основе мониторинга КЛ. Показано также, что появление ложных предикторов связано с попаданием Земли в крупномасштабные возмущения солнечного ветра без проявлений геомагнитных эффектов.

Ключевые слова: космические лучи, нейтронный монитор, глобальная съемка, геомагнитные бури, зональные компоненты, предвестники.

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз попадания Земли в интенсивные геоэффективные возмущения солнечного ветра (СВ) является актуальной проблемой при изучении космической погоды. Как было показано ранее (см., например, [Дворников и др., 1988; Munakata et al., 2000;

Abstract. Since 2013, continuous monitoring of spatial-angular distribution of CRs for each hour of measurements has been carried out at SHICRA SB RAS, using data from the international neutron monitor database NMDB and the method of real-time global survey. For this purpose, nine parameters of the CR distribution are automatically calculated which result from the first two angular moments of the spatial distribution function of particles in interplanetary space. Our earlier studies have shown that before the onset of most geomagnetic storms with the amplitude of the geomagnetic activity Dst index lower than -50 nT there is a sharp increase in amplitudes of north-south components of CR distribution. This can serve as a predictor of the onset of geomagnetic disturbances with a lead time from several hours to 1–2 days. This paper presents the results of forecasting of geomagnetic storms with a Dst amplitude <-50 nT, observed in April–November 2024. It is also shown that the appearance of false predictors is associated with Earth's entry into large-scale SW disturbances without geomagnetic effects.

Keywords: cosmic rays, neutron monitor, global survey, geomagnetic storms, zonal components, predictors.

Belov et al., 2001; Dorman et al., 2003]), большинство геомагнитных бурь имеют предвестники в угловом распределении космических лучей (КЛ). С 2013 г. на основе данных мировой сети нейтронных мониторов NMDB [<https://www.nmdb.eu>] с использованием разработанного в ИКФИА СО РАН метода глобаль-

ной съемки [Altukhov et al., 1970] нами в режиме реального времени проводится непрерывный мониторинг пространственно-углового распределения КЛ за каждый час измерений. При этом вся сеть станций КЛ выступает как единый многонаправленный инструмент. Для определения распределения КЛ решается система линейных уравнений [Altukhov et al., 1970], которая в матричном представлении имеет следующий вид:

$$I = MA,$$

где I — матрица наблюдательных данных; M — матрица приемных векторов станций, данные которых используются; A — матрица распределения КЛ. Система уравнений решается методом наименьших квадратов в предположении, что разложение распределения КЛ в ряд по сферическим функциям быстро сходится. В результате рассчитываются девять параметров, обусловленных первыми двумя гармониками пространственного распределения КЛ в межпланетном пространстве. Проведенные нами исследования изменений поведения во времени этих параметров показали, что перед началом большинства геомагнитных бурь с $Dst < -50$ нТл происходит резкое увеличение (выше эмпирически установленных нами критических величин) амплитуд зональных (северо-южных) компонент распределения КЛ [Григорьев, Стародубцев, 2015], что может служить предиктором начала геомагнитных возмущений с заранее известностью от нескольких часов до полутора суток. Предиктором таких возмущений является также аномально большая амплитуда анизотропии КЛ. Появление предикторов перед геомагнитными возмущениями при подобном подходе отмечается не менее чем в 70 % от общего числа рассмотренных нами с 2013 г. случаев. Изучаемый здесь период времени с апреля по ноябрь 2024 г. характеризовался повышенной геомагнитной возмущенностью, что, в свою очередь, привело к различным проявлениям космической погоды на Земле. В работе приводятся результаты использования данных мировой сети нейтронных мониторов при проведении в ИКФИА СО РАН мониторинга КЛ для прогноза интенсивных геомагнитных бурь, наблюдавшихся в период максимума 25-го цикла солнечной активности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Как показано в работах [Григорьев и др., 2017; Зверев и др., 2020], основными параметрами распределения КЛ, которые эффективно реагируют на приближение к Земле крупномасштабных возмущений межпланетной среды, являются изменения амплитуд зональных (северо-южных) компонент высокочастотной части изотропной интенсивности (C_{00}) и первых двух гармоник (C_{10} , C_{20}) пространственно-углового распределения КЛ. Предиктором геомагнитной бури может служить также увеличение амплитуды первой гармоники в распределении КЛ (A_{11}). С учетом многолетнего опыта нами были установлены критические значения анализируемых па-

раметров распределения КЛ [Григорьев и др., 2019]: для северо-южной компоненты высокочастотной части изотропных вариаций C_{00} — 0.4 %; для северо-южной компоненты вектора первой гармоники C_{10} — 0.6 %; для северо-южной компоненты второй гармоники C_{20} — 0.7 %; для суммы положительных величин этих компонент — 0.9 % и для величины векторов суточной анизотропии A_{11} — 1.4 %. Их превышение рассматривалось как появление предиктора геомагнитного возмущения, однако превышение критической величины каким-либо параметром в течение только одного часа за предиктор не принималось. Значение предиктора принималось равным 1.5, если какая-либо компонента превышала соответствующий критический уровень, и равным 0, если ее значение было меньше него.

На рис. 1 и 2 приведены по месяцам: динамика Dst -индекса [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] (прямые линиями указаны уровни -50 нТл), поведение предикторов (Pr) согласно вышеупомянутой методике и вариации интенсивности КЛ (I_{NM}) по данным нейтронного монитора 24-NM-64 на ст. «Якутск» с апреля по ноябрь 2024 г. Как следует из анализа рисунков, из шестнадцати наблюдавшихся геомагнитных возмущений с амплитудой Dst ниже -50 нТл тринадцать бурь имели предикторы. Отмечено десять случаев появления ложных предикторов, связанных с форбуш-понижениями интенсивности КЛ, которые наблюдались в отсутствие значимых геомагнитных эффектов. На рис. 2, в показана динамика Dst -индекса, предикторов и изотропной интенсивности КЛ в октябре 2024 г. Как видно на этом рисунке, 26 и 27 октября наблюдаются ложные предикторы, за которыми не последовало магнитной бури. Их появление обусловлено попаданием Земли в крупномасштабное возмущение СВ, вызвавшее значительное ($> 7\%$) форбуш-понижение изотропной интенсивности КЛ. На рис. 1, 2 можно отметить также шесть ложных предикторов (например, 23 июня и 21 ноября), не связанных с заметными изменениями геомагнитной активности и интенсивности КЛ.

В таблице приведена информация о рассмотренных геомагнитных бурях в 2024 г., дополненная результатами расчетов параметров анизотропии КЛ методом глобальной съемки. В ней указаны дата и время начала возмущения, значение Dst -индекса [нТл], время опережения предиктором начала магнитной бури в часах ($-\Delta t^h$). Знаком «+» в столбцах C_{00} , C_{10} , C_{20} , A_{11} отмечены компоненты распределения КЛ, в которых присутствовал признак предиктора. В столбце \sum^+ знак «+» указывает, что предиктор обусловлен превышением критической величины суммы положительных значений северо-южных компонент. Как видно из таблицы, не наблюдается какой-либо зависимости появления предикторов в тех или иных зональных компонентах от уровня понижения вариаций Dst -индекса. Не отмечается также зависимости времени опережения предиктором начала магнитной бури от Dst -индекса.

Далее проведем анализ появления во времени предикторов и увеличения значений радиальных a_{11} , a_{22}

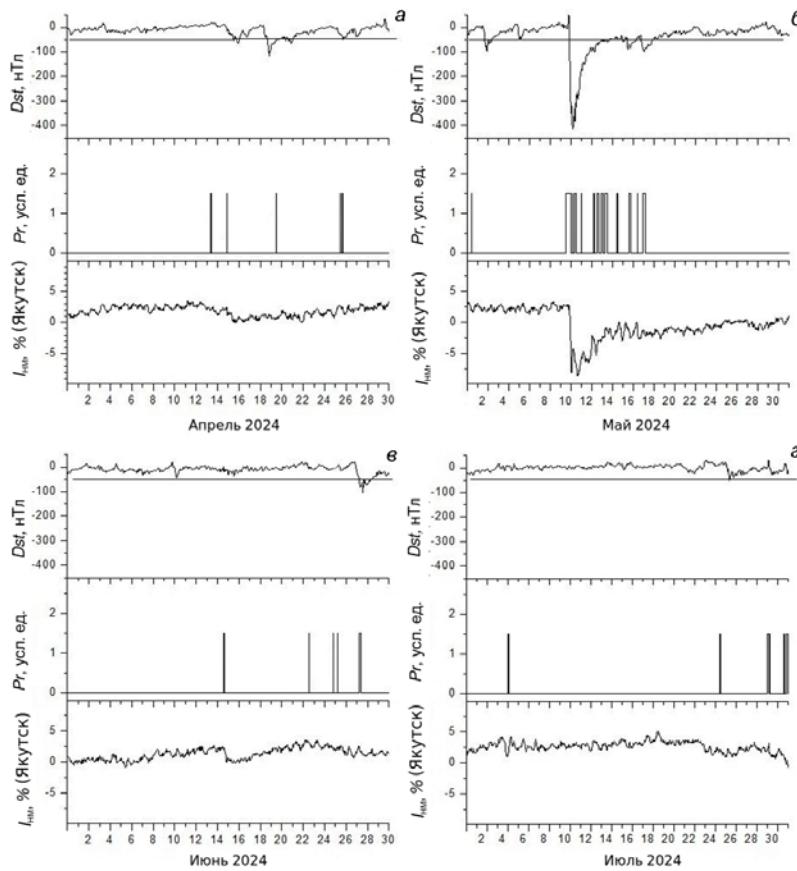


Рис. 1. Поведение Dst-индекса (прямой линией указан уровень -50 нТл) и предикторов (Pr), а также вариации интенсивности КЛ (I_{NM}) по данным нейтронного монитора 24-NM-64 на ст. «Якутск» с апреля по июль 2024 г.

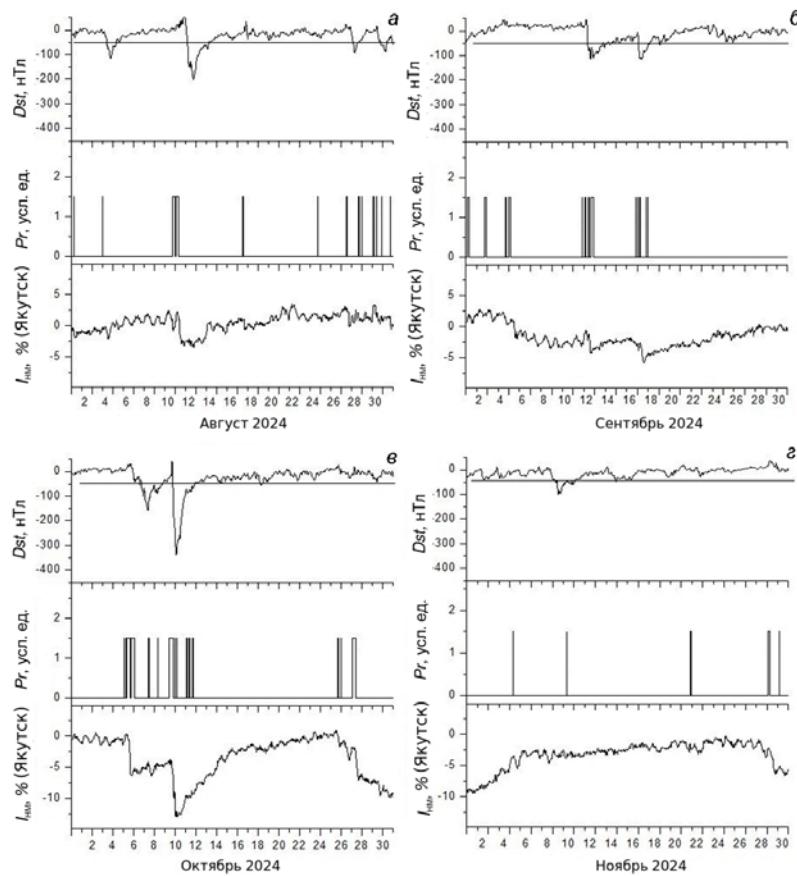


Рис. 2. То же самое, что на рис. 1, для периода с августа по ноябрь 2024 г.

№	Начало возмущения <i>Dst</i> -индекса (UT)	Амплитуда <i>Dst</i> (нТл)	($-\Delta t^h$)	Σ^+	C_{00}	C_{10}	C_{20}	A_{11}
1	2024.04.15/18 ^h	-65	34	-	-	-	+	-
2	2024.04.19/08 ^h	-117	-	-	-	-	-	-
3	2024.04.26/05 ^h	-51	-	-	-	-	-	-
4	2024.05.02/12 ^h	-96	28	-	-	-	+	-
5	2024.05.10/17 ^h	-412	6	-	+	-	+	-
6	2024.06.27/19 ^h	-105	34	-	-	-	+	-
7	2024.07.26/03 ^h	-51	18	+	-	-	-	-
8	2024.08.04/05 ^h	-101	6	-	-	-	+	-
9	2024.08.11/24 ^h	-188	32	-	+	-	-	+
10	2024.08.27/23 ^h	-76	12	+	-	-	+	-
11	2024.08.30/11 ^h	-72	10	-	+	-	-	-
12	2024.09.12/07 ^h	-121	10	-	+	-	-	-
13	2024.09.17/01 ^h	-121	5	-	-	+	-	-
14	2024.10.06/18 ^h	-148	14	-	-	-	-	+
15	2024.10.10/17 ^h	-308	8	+	+	-	-	+
16	2024.11.08/20 ^h	-101	-	-	-	-	-	-

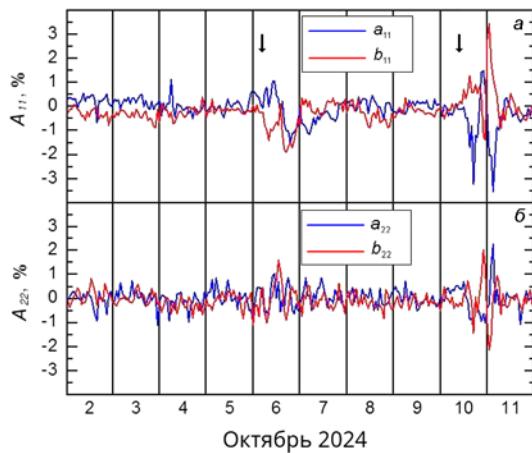


Рис. 3. Вариации компонент первой (a_{11} , b_{11} , панель *a*) и второй (a_{22} , b_{22} , панель *b*) гармоник распределения КЛ в начале октября 2024 г. Стрелками указаны начала появления предикторов

и азимутальных b_{11} , b_{22} компонент первой A_{11} и второй A_{22} гармоник распределения КЛ. Для примера рассмотрим две большие геомагнитные бури, которые начались 6 и 10 октября 2024 г. На рис. 3 представлены результаты расчета параметров анизотропии КЛ для интервала времени с 2 по 11 октября 2024 г. Стрелками указаны времена появления предикторов, определенные на основании анализа поведения северо-южных компонент распределения КЛ. Как видно на рис. 3, *a*, *b*, заметные увеличения амплитуд вариаций обеих гармоник происходят не раньше появления предикторов геомагнитных возмущений. При этом максимум их изменений приходится на главную фазу магнитной бури.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Представлены предвестники геомагнитных возмущений, полученные на основе рассчитанного увеличения значений северо-южных компонент пространственно-углового распределения КЛ.
- Результаты проводимого в ИКФИА СО РАН мониторинга КЛ в целях краткосрочного прогноза

геомагнитных бурь за период апрель–ноябрь 2024 г. показали, что из 16 геомагнитных бурь ($Dst < -50$ нТл) предиктор имели 13, а ложные предикторы составляют примерно 30 %.

3. После начала геомагнитной бури наблюдаются значительные изменения в поведении радиальных и азимутальных компонент первой и второй гармоник распределения КЛ.

4. Появление ложных предикторов, не связанных с последующей магнитной бурей, в основном обусловлено попаданием Земли в области крупномасштабных возмущений солнечного ветра, не сопровождающихся значимыми изменениями геомагнитной активности.

5. Результаты наших исследований показывают, что для максимального исключения ложных предикторов начал геомагнитных бурь требуется развитие методики проводимого мониторинга КЛ с привлечением различных данных прямых измерений параметров СВ на космических аппаратах в режиме реального времени.

6. Результаты прогноза геомагнитных бурь в режиме реального времени доступны по адресу [https://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html].

Авторы выражают благодарность базе данных NMDB [<http://www.nmdb.eu>], созданной в рамках программы Европейского Союза FP7 (контракт № 213007), а также NASA/Goddard Space Flight Center за представление данных, находящихся в открытом доступе.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWRS-2021-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Метод глобальной съемки в режиме реального времени и прогноз космической погоды. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015, т. 79, № 5, с. 703–707. DOI: [10.7868/S0367676515050233](https://doi.org/10.7868/S0367676515050233).
- Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Мониторинг предвестников геомагнитных возмущений

- по данным наземных измерений космических лучей. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017, т. 81, № 2, с. 219–221. DOI: [10.7868/S03676517020193](https://doi.org/10.7868/S03676517020193).
- Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Мониторинг геомагнитных возмущений на основе метода глобальной съемки в реальном времени. *Солнечно-земная физика*. 2019, т. 5, № 3, с. 110–115. DOI: [10.12737/szf-53201911](https://doi.org/10.12737/szf-53201911) / Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Yu. Monitoring of geomagnetic disturbances using the method of global survey in real time. *Sol.-Terr. Phys.* 2019, vol. 5, iss. 3, pp. 93–97. DOI: [10.12737/stp-53201911](https://doi.org/10.12737/stp-53201911).
- Дворников В.М., Сергеев А.В., Сдобнов В.Е. Аномальные вариации космических лучей в жесткостном диапазоне 2–5 ГВ и их связь с гелиосферными возмущениями. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1988, т. 52, № 12, с. 2435–2437.
- Зверев А.С., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А. Мониторинг параметров анизотропии космических лучей в реальном времени и краткосрочный прогноз геомагнитных возмущений. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 4, с. 42–45. DOI: [10.12737/szf-64202005](https://doi.org/10.12737/szf-64202005) / Zverev A.S., Grigoryev V.G., Gololobov P.Yu., Starodubtsev S.A. Real-time monitoring of cosmic ray anisotropy parameters and short-term forecasting of geomagnetic disturbances. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 4, pp. 37–39. DOI: [10.12737/stp-64202005](https://doi.org/10.12737/stp-64202005).
- Altukhov A.M., Krymsky G.F., Kuzmin A.I. The method of “global survey” for investigating cosmic ray modulation. *Acta Physica Acad. Sci. Hung.* 1970, vol. 29: Proc. 11th International Cosmic Ray Conference. Suppl. 4, pp. 457–460.
- Belov A.V., Bieber J.W., Eroshenko E.A., et al. Pitch-angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: Neutron monitor observations. *Proc. 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001)*. 2001, pp. 3507–3510.
- Dorman L.I., Belov A.V., Eroshenko E.A., et al. Possible cosmic ray using for major geomagnetic storms accompanied by Forbush effect. *Proc. 28th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2003)*. 2003, pp. 3553–3556.
- Munakata K., Bieber J.W., Yasue S., et al. Precursor of geomagnetic storms observed by the muon detector network. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, pp. 27457–27468. DOI: [10.1029/2000JA000064](https://doi.org/10.1029/2000JA000064).
- URL: <https://www.nmdb.eu> (дата обращения 3 марта 2025 г.).
- URL: https://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html (дата обращения 3 марта 2025 г.).
- URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 3 марта 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.
- Как цитировать эту статью:
Зверев А.С., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Прогноз геомагнитных бурь в апреле–ноябре 2024 г. по результатам мониторинга космических лучей. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 4, с. 127–131. DOI: [10.12737/szf-114202512](https://doi.org/10.12737/szf-114202512).