

МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ И КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

REAL-TIME MONITORING OF COSMIC RAY ANISOTROPY PARAMETERS AND SHORT-TERM FORECASTING OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES

А.С. Зверев

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

В.Г. Григорьев

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

П.Ю. Гололобов

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

С.А. Стародубцев

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

A.S. Zverev

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

V.G. Grigoryev

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

P.Yu. Gololobov

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

S.A. Starodubtsev

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

Аннотация. В ИКФИА СО РАН реализованы непрерывный мониторинг динамики параметров распределения космических лучей с использованием данных международной базы нейтронных мониторов NMDB, доступных в реальном времени, и прогноз геомагнитной возмущенности на основе автоматического анализа полученных результатов. Мониторинг основан на применении метода глобальной съемки, позволяющего рассматривать мировую сеть нейтронных мониторов как единый прибор, ориентированный в каждый момент времени измерения во многих направлениях. Данный метод позволяет получать в реальном времени параметры девяти компонент первых двух угловых моментов функции распределения космических лучей за каждый час наблюдений. В работе рассматриваются методические вопросы, связанные с использованием метода глобальной съемки в реальном времени, и приводятся некоторые результаты прогноза геомагнитных возмущений за 2017–2018 гг.

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

Abstract. SHICRA SB RAS, using data from the NMDB database, has implemented continuous monitoring of the dynamics of cosmic ray (CR) distribution parameters and the automatic forecasting of geomagnetic disturbance. Monitoring is based on the global survey method, which considers the world-wide network of neutron monitors as a single device oriented in different directions at each measured time. This method provides real-time parameters of nine components of the first two angular moments of the CR distribution function for each hour of observation. This paper discusses methodological aspects related to the use of the global survey method and some results of the forecasting of geomagnetic disturbances for 2017–2018.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным направлением современных исследований вариаций интенсивности космических лучей (КЛ) является прогноз геоэффективных возмущений солнечного ветра (СВ). Проведенные ранее различными авторами исследования вариаций жесткого спектра КЛ [Дворников и др., 1988, 1995; Belov et al., 2001; Dorman et al., 2003; Munakata et al., 2005; Григорьев и др., 2006] показали принципиальную возможность прогноза на их

основе геоэффективных возмущений СВ. В настоящее время существуют различные методики прогноза возмущений межпланетной среды на основе анализа анизотропии КЛ в режиме реального времени, например [<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather>]. В ИКФИА СО РАН подобный мониторинг проводится с использованием метода глобальной съемки, при этом вся мировая сеть станций КЛ, оснащенных нейтронными мониторами, рассматривается как единый многонаправленный прибор. Наблюдаемая

каждым детектором интенсивность КЛ в основном определяется приемными характеристиками регистрирующего прибора, отражающими его геометрию, географическое положение и тип наблюдаемых вторичных частиц и объединенными понятием приемного вектора. Заметим, что метод глобальной съемки был разработан в ИКФИА СО РАН в конце 1960-х гг. для исследования распределения КЛ в межпланетном пространстве [Крымский и др., 1981].

С созданием и развитием международной базы данных (БД) нейтронных мониторов NMDB [<http://www01.nmdb.eu>] у нас впервые появилась возможность использования метода глобальной съемки в режиме реального времени [Григорьев, Стародубцев, 2015]. В итоге это привело к созданию методики краткосрочного (от нескольких часов до ~1 сут) прогноза геомагнитных бурь, характеризующихся значением Dst -индекса менее -50 нТл, в режиме реального времени. Результаты прогноза доступны по адресу [http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА

Для использования данных мировой сети нейтронных мониторов в реальном времени необходима их предварительная подготовка. При этом весь риск использования первичных данных регистрации авторы берут на себя. Информация со станций нейтронных мониторов поступает в БД в реальном времени, и ее использование в этом режиме предполагает решение целого ряда методических вопросов. Кроме обычных, вполне устранимых кратковременных аппаратных сбоев наблюдаются изменения уровня счета, линейного тренда и другие эффекты. Подробное изложение всех сбоев, наблюдаемых в данных регистрации КЛ, и проблем, которые требуется решить перед их использованием, весьма объемно, но можно кратко отметить некоторые из них, заодно описав способы их устранения. Кратковременные сбои аппаратуры удаляются на основе критерия Шовене [Тейлор, 1985]. Одной из основных проблем подготовки данных является корректное выделение низкочастотной и высокочастотной частей регистрируемых прибором вариаций интенсивности КЛ. В данном случае высокочастотная часть вариаций интенсивности КЛ на каждой станции за интервал времени 24 ч выделяется как разница между наблюдаемыми вариациями и трендом. Поскольку известно [Отнес, Эноксон, 1982], что процедура фильтрации данных не полностью удаляет линейные тренды, то для их исключения мы используем стандартный метод наименьших квадратов. Кроме того, в эксперименте наблюдается зависимость определяемых параметров распределения КЛ от уровня солнечной активности, что должно учитываться с помощью коэффициентов связи для нейтронных мониторов.

Как показали проведенные нами исследования, основными предикторами в КЛ, активно реагирующими на приближение к Земле геоэффективных возмущений межпланетной среды, являются изме-

нения амплитуд зональных (северо-южных) компонент высокочастотной части изотропной интенсивности КЛ (C_{00}) и первых двух моментов их углового распределения (C_{10} и C_{20}) [Григорьев и др., 2017], которые входят в девять параметров, определяемых методом глобальной съемки [Крымский и др., 1981], и могут принимать относительно плоскости эклиптики как положительное, так и отрицательное значение. Предикторами могут служить также изменения величины и направления вектора первой гармоники и суммы амплитуд зональных компонент, наблюдающиеся до прихода межпланетного возмущения на орбиту Земли. Эмпирически можно определить критические уровни, превышение которых положительными значениями любой из указанных трех компонент или их суммами с большой вероятностью является предвестником резкого понижения Dst -индекса в начале геомагнитной бури [Григорьев и др., 2019]. В то же время существенное понижение отрицательных значений указанных компонент или их сумм ниже определенного критического значения может соответствовать наиболее возмущенной фазе геомагнитной бури.

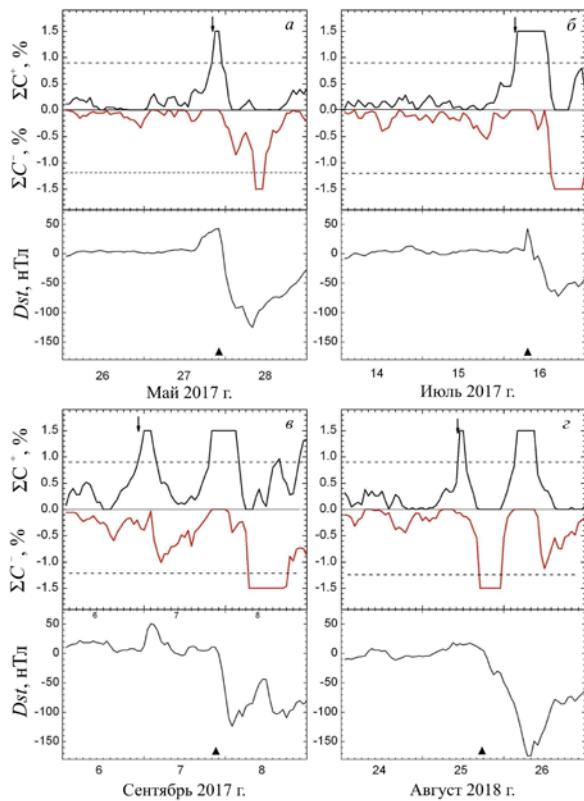
Поведение основных параметров распределения КЛ за три последних дня: изотропной интенсивности I , модуля вектора гармоники \overline{A}_1^1 и сумм положительных и отрицательных значений зональных гармоник, а также значений компонент и векторов первой \overline{A}_1^1 и второй \overline{A}_2^2 гармоник в системе координат GSE представлено на сайте [http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В последние годы на фоне низкой солнечной активности наблюдается очень слабая геомагнитная возмущенность. Тем не менее за период 2017–2019 гг. можно выделить четыре значимые магнитные бури, произошедшие 28 мая ($Dst \approx -125$ нТл), 16 июля ($Dst \approx -72$ нТл) и 7 сентября ($Dst \approx -124$ нТл) 2017 г. и 25 августа 2018 г. ($Dst \approx -174$ нТл) [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. В качестве примера на рисунке приведены суммы положительных $\sum C^+ = C_{00}^+ + C_{10}^+ + C_{20}^+$ и отрицательных $\sum C^- = C_{00}^- + C_{10}^- + C_{20}^-$ величин зональных компонент изотропии КЛ, а также показаны вариации Dst -индекса во время этих геомагнитных бурь. Суммы положительных величин зональных компонент выше 0.9 и отрицательных ниже -1.2 указывают на достижение или превышение ими критических значений, что трактуется нами как моменты появления предикторов начала и главной фазы геомагнитной бури соответственно. Как следует из рисунка, для этих геомагнитных бурь появление предикторов отмечается еще до начала возмущения геомагнитного поля за время от двух часов до суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В режиме реального времени исследованы четыре наиболее сильные магнитные бури, наблюдавшиеся в 2017–2018 гг. Все они имели предикторы



Зависимость от времени сумм положительных (ΣC^+) и отрицательных (ΣC^-) зональных гармоник, а также вариаций Dst -индекса в периоды магнитных бурь 28 мая (а), 16 июля (б), 7 сентября 2017 г. (в) и 25 августа 2018 г. (з). Штриховые линии соответствуют критическим уровням для предикторов геомагнитных бурь, треугольники — началам бурь, стрелки — началам появления предикторов в компонентах распределения КЛ, полученных методом глобальной съемки.

2. Используемый для определения параметров анизотропии КЛ метод глобальной съемки позволяет автоматически осуществлять краткосрочный (от нескольких часов до ~1 сут) прогноз геомагнитных бурь с Dst -индексом ≤ -50 нТл.

3. Необходимо дальнейшее совершенствование проводимого мониторинга, в том числе привлечение данных прямых измерений параметров межпланетной среды.

Работа выполнена с использованием оборудования уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» [<http://ckp-rf.ru/usu/433536>] при поддержке гранта РФФИ № 18-42-140002-р_а. Авторы благодарны NMDB [<http://www01.nmdb.eu>], основанной при поддержке программы Европейского союза FP7 (контракт № 213007), за предоставленные данные.

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. Серия физ. 2017. Т. 81, № 2. С. 219–221. DOI: [10.7868/S0367676517020193](https://doi.org/10.7868/S0367676517020193).

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).

Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Кривошапкин П.А. и др. Анизотропия космических лучей по данным станции Якутск в реальном времени // Труды Всероссийской конференции «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности», 10–15 октября 2005 г., Троицк, ИЗМИРАН. СПб., 2006. С. 79–84.

Дворников В.М., Сергеев А.В., Сдобнов В.Е. Аномальные вариации космических лучей в жестком диапазоне 2–5 ГВ и их связь с гелиосферными возмущениями // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т. 52, № 12. С. 2435–2437.

Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Способ прогноза спорадических геоэффективных возмущений солнечного ветра: патент RU 1769602 С. 1995.

Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.

Отнес Р., Энксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 432 с.

Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.

Belov A.V., Bieber J.W., Eroshenko E.A., Evenson P. Pitch-angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: neutron monitor observations // Proc. 27th International Cosmic Ray Conference. Hamburg, 2001. V. 9. P. 3507–3510.

Dorman L.I., Belov A.V., Eroshenko E.A., et al. Possible cosmic ray using for forecasting of major geomagnetic storms, accompanied by Forbush effects // Proc. 28th International Cosmic Ray Conference. Tsukuba, 2003. V. 6. P. 3553–3556.

Munakata K., Kuwabara T., Yasue S., et al. A “loss cone” precursor of an approaching shock observed by a cosmic ray muon hodoscope on October 28, 2003 // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32, L03S04. DOI: [10.1029/2004GL021469](https://doi.org/10.1029/2004GL021469).

URL: <http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather> (дата обращения 15 июня 2020 г.).

URL: <http://www01.nmdb.eu> (дата обращения 15 июня 2020 г.).

URL: http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html (дата обращения 15 июня 2020 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 15 июня 2020 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 15 июня 2020 г.).

REFERENCES

Belov A.V., Bieber J.W., Eroshenko E.A., Evenson P. Pitch-angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: neutron monitor observations. *Proc. 27th International Cosmic Ray Conference*. Hamburg, 2001, vol. 9, pp. 3507–3510.

Dorman L.I., Belov A.V., Eroshenko E.A., Pustil'nik L.A., Sternlieb A., Yanke V.G., Zukerman I.G. Possible cosmic ray using for forecasting of major geomagnetic storms, accompanied by Forbush effects. *Proc. 28th International Cosmic Ray Conference*. Tsukuba, 2003, vol. 6, pp. 3553–3556.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. *Method for prediction of sporadic geoeffective perturbations of solar wind: Patent RU 1769602 C*. 1995.

Dvornikov V.M., Sergeev A.V., Sdobnov V.E. Abnormal variations of cosmic rays in rigidity range 2–5 GV and their relation to heliospheric disturbances. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences of USSR: Physics]. 1988, vol. 52, no. 12, pp. 2435–2437. (In Russian).

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A. Global survey method in real time and space weather forecasting. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2015, vol. 79, no. 5, pp. 649–653. DOI: [10.3103/S1062873815050226](https://doi.org/10.3103/S1062873815050226).

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Y. Monitoring geomagnetic disturbance predictors using data of ground measurements of cosmic rays. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2017, vol. 81, no. 2, pp. 200–202. DOI: [10.3103/S1062873817020198](https://doi.org/10.3103/S1062873817020198).

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Yu. Monitoring of geomagnetic disturbances using the global survey method in real time. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019, vol. 5, iss. 3, pp. 93–97. DOI: [10.12737/stp-53201911](https://doi.org/10.12737/stp-53201911).

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Krivoshapkin P.A., Prihod'ko A.N., Egorov A.G., Turpanov A.A. Cosmic ray anisotropy according to Yakutsk station data in real time. *Trudy Vserossiiskoi konferentsii "Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya osnov prognozirovaniya geliogeofizicheskoi aktivnosti"* [Proceedings of All-Russian Conference "Experimental and Theoretical Investigation on the Basics of Forecasting of Heliogeophysical Activity". October 10–15, 2005, Troitsk, IZMIRAN]. 2006, pp. 79–84. (In Russian).

Krymsky G.F., Kuzmin A.I., Krivoshapkin P.A., Samsonov I.S., Skripin G.V., Transky I.A., Chirkov N.P. *Kosmicheskie лучи i solnechnyi veter* [Cosmic Rays and Solar Wind]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, 224 p. (In Russian).

Munakata K., Kuwabara T., Yasue S., Kato C., Akahane S., Koyama M. A "loss cone" precursor of an approaching shock observed by a cos-mic ray muon hodoscope on October 28, 2003. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, L03S04. DOI: [10.29/2004GL021469](https://doi.org/10.29/2004GL021469).

Otnes R., Enochson L. *Prikladnoi analiz vremennykh ryadov. Osnovnye metody* [Applied analysis of time series. Basic methods]. Moscow, Mir Publ., 1982, 432 p. (In Russian). (English edition: Otnes R., Enochson L. *Applied Time Series Analysis: Basic Techniques*. Wiley, 1978, 449 p.)

Teilor Dzh. *Vvedenie v teoriyu oshibok* [Introduction to error analysis]. Moscow, Mir Publ., 1985, 272 p. (In Russian). (English edition: Taylor J. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books, 1982, 270 p.)

URL: <http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweathe> (accessed June 15, 2020).

URL: <http://www01.nmdb.eu> (accessed June 15, 2020).

URL:

http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html (accessed June 15, 2020).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed June 15, 2020).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/433536> (accessed June 15, 2020).

Как цитировать эту статью:

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).