

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ МЕТОДОМ КОЛЬЦА СТАНЦИЙ

**М.А. Абунина, А.В. Белов, Е.А. Ерошенко, А.А. Абунин, В.Г. Янке**

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия  
abunina@izmiran.ru

## STUDYING FEATURES OF FORBUSH EFFECTS BY THE RING STATION METHOD

**M.A. Abunina, A.V. Belov, E.A. Eroshenko, A.A. Abunin, V.G. Yanke**

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia  
abunina@izmiran.ru

**Аннотация.** Метод кольца станций позволяет получать свойства углового распределения космических лучей без разложения на гармоники и ежечасное долготное распределение интенсивности космических лучей, не прибегая к его моделированию. Использование метода кольца станций наглядно показывает поведение вариаций КЛ на различных станциях, что дает возможность исследовать такие особенности форбуш-эффектов как предвестники, анизотропное начало, необычное поведение вариаций КЛ внутри возмущений солнечного ветра и др.

**Ключевые слова:** космические лучи, форбуш-эффект, межпланетные возмущения

**Abstract.** The ring station method allows us to obtain the properties of the angular distribution of cosmic rays without decomposing into harmonics and the hourly longitude distribution of the intensity of cosmic rays, without resorting to its modeling. The ring station method visually shows the behavior of CR variations at different stations, which makes it possible to investigate such features of Forbush effects as precursors, anisotropic onset, unusual behavior of CR variations inside solar wind disturbances, etc.

**Keywords:** cosmic rays, Forbush effect, interplanetary disturbances

### ВВЕДЕНИЕ

Многолетний мониторинг космических лучей (КЛ) позволяет проводить исследования форбуш-эффектов (ФЭ) как на большом статистическом материале, так и изучать отдельные события совместно с другими регулярно обновляемыми рядами солнечных, межпланетных и геофизических данных.

Основы метода кольца станций были заложены в 1960 г [Parsons, 1960a, б], причем использовались данные всего девяти нейтронных мониторов (НМ). В ИЗМИРАН с этим методом стали работать в 70-х гг. Но для качественного анализа при помощи метода кольца станций необходимо объединять данные 10–20 НМ, что очень затрудняло работу во времена, когда не было персональных компьютеров и Интернета, и обрабатывать ряды данных приходилось вручную. В программном виде метод кольца станций в ИЗМИРАН был разработан в середине 90-х (см. например, [Belov et al., 1995, 2001, 2003]), а в 2000-х в рамках проектов SpaceShip Earth [<http://neutronm.bartol.udel.edu/catch/title.html>] и NMDB [<http://www01.nmdb.eu>] он был реализован для представления данных в реальном времени [Kuwabara et al., 2006; <http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/welcome.html>; Asipenka et al., 2009; <http://cr0.izmiran.ru/AnisotropyCR/main.htm>]. Но в настоящее время эти сервисы работают нерегулярно.

### ДАнные И МЕТОды

Метод кольца станций удобен для исследований вариаций КЛ, он прост и эффективен. Это практически «безмодельный» подход, использующий высокоширотные мониторы в достаточно узком кольце широт. Различия вариаций КЛ, регистрируемых этими мониторами, определяются различиями их долготы, и это позволяет просто и наглядно представлять долготную зависимость вариаций. Сравнивая

вариации КЛ на НМ, можно видеть, как со временем меняется их долготное распределение. Также этот метод можно применять для выделения предвышшений и предпонижений интенсивности КЛ, предшествующих многим форбуш-эффектам [Munakata et al., 2005; Papailiou et al., 2012a, б].

Как было указано выше, не все станции НМ подходят для использования в методе кольца станций. В общем виде, ряд ограничений для выбора станций следующий: жесткость геомагнитного обреза <4 ГВ; высота станции над уровнем моря <1200 м; приемные коэффициенты для северной составляющей векторной анизотропии по абсолютной величине <0.55.

При использовании метода кольца станций важным моментом является выбор базового периода, относительно которого вычисляются вариации скорости счета НМ. Для подходящей базы необходимо отсутствие форбуш-эффектов и значительных изменений анизотропии КЛ и спокойная геомагнитная обстановка.

Мы используем данные скорости счета НМ из базы данных NMDB [<http://www01.nmdb.eu>] и непосредственно с серверов станций, которые не входят в NMDB.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для примера рассмотрим данные нейтронных мониторов в спокойный период, в том виде, в котором метод кольца станций реализован в ИЗМИРАН (рис. 1). На рис. 1, а, б и 2, б показано распределение вариаций КЛ по асимптотической долготе по различным станциям. Асимптотическая долгота отображает среднее направление прихода частиц, регистрируемых данным детектором, в геоцентрических координатах. Она зависит от долготы станции, времени суток и эффективного сноса частиц магнитным полем Земли. По горизонтальной оси показана

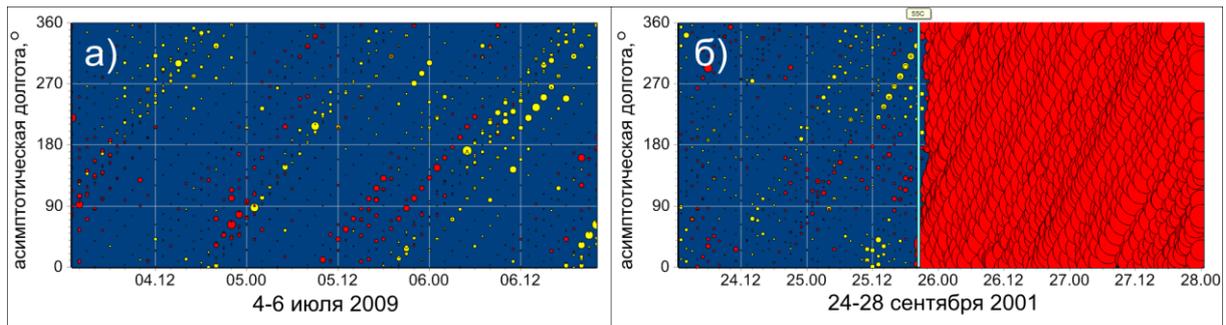


Рис. 1. Представление данных нейтронных мониторов методом кольца станций: спокойный период 4–6 июля 2009 г (а); форбуш-эффект 25 сентября 2001 г. (б)

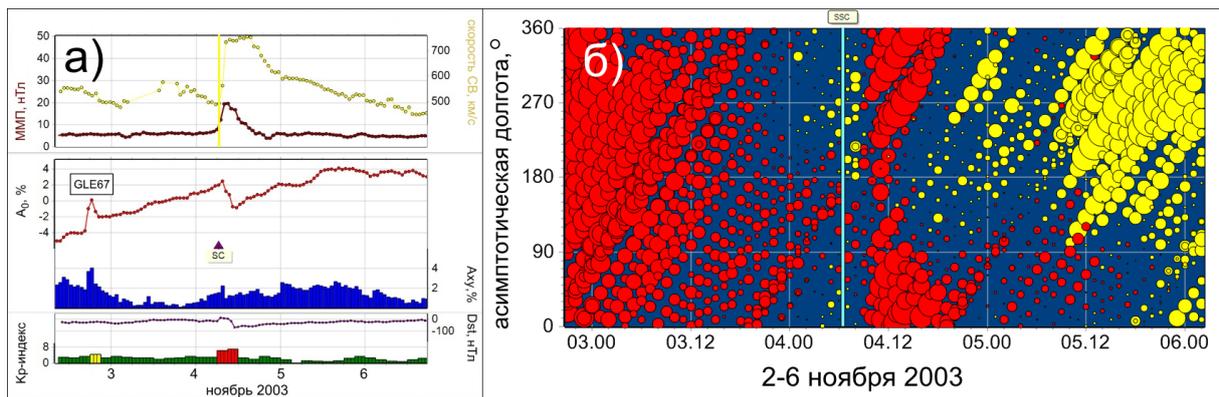


Рис. 2. Форбуш-эффект 4 ноября 2003 г: данные скорости солнечного ветра и ММП, изменение плотности и векторной анизотропии КЛ, геомагнитные данные (а); данные вариаций скорости счета НМ методом кольца станций за период 2–6 ноября 2003 г. (б)

временная шкала в формате DD.HH. Понижение интенсивности потока космических лучей относительно спокойного базового периода показаны красными кружками, увеличение интенсивности космических лучей — желтыми кружками. Размер кружка пропорционален величине вариаций. Каждая наклонная прямая из кружков отображает вариации КЛ одного НМ за одни сутки

Из рис. 1, а видно, что вариации небольшие, на большинстве станций они близки к нулю. В спокойные периоды вариации могут быть и более значительными, важно, чтобы они соответствовали стабильной солнечно-суточной вариации.

Форбуш-эффекты исследуются по-разному. Их основные характеристики получают, используя метод глобальной съемки [Крымский и др., 1966; Григорьев, Стародубцев, 2015; Белов и др., 2018] или данные отдельных детекторов. Можно предположить, что в методе кольца станций ФЭ будут выглядеть как показано на рис. 1, б: после спокойных суточных вариаций происходит резкое понижение интенсивности КЛ на всех НМ. Конечно, подобных ФЭ достаточно много, но очень часто в данных отдельных НМ существуют особенности, которые сложно понять, не привлекая данные других детекторов.

Яркий пример необычного поведения КЛ во время межпланетного возмущения дает ФЭ, зарегистрированный 4 ноября 2003 г.

Описываемое событие стало следствием СМЕ, ассоциированного со вспышкой класса X8.6(S14W56),

произошедшей на Солнце 2 ноября в 17:03 UT. С этими солнечными событиями было связано наземное возрастание солнечных КЛ (GLE67) 2 ноября (рис. 2, а, средняя панель, верхняя кривая). Ударная волна (SSC) на Земле зарегистрирована 4 ноября в 06:25 UT, скорость солнечного ветра достигла 754 км/с, максимальная напряженность ММП равнялась 19.7 нТл (рис. 2, а, верхняя панель). Это межпланетное возмущение сопровождалось короткой магнитной бурей с  $K_p=7$ ,  $Dst=-66$  нТл (рис. 2, а, нижняя панель). Форбуш-эффект, рассчитанный по методу глобальной съемки для частиц 10 ГВ, составил 4 %, а максимальная величина экваториальной составляющей анизотропии КЛ  $A_{xy}=2.66$  % (рис. 2, а, средняя панель).

Этот форбуш-эффект произошел на фоне восстановления плотности КЛ после самого большого ФЭ, зарегистрированного 29 октября 2003г, что видно из рис. 2, а и б. В левой части рис. 2, б больше отрицательных вариаций, а в правой — больше положительных, относительно базового периода, в качестве которого взято 3 ноября. Из рис. 2, а, на котором показаны данные плотности КЛ, рассчитанные методом глобальной съемки, видно, что ФЭ начался после регистрации ударной волны и в вариациях плотности КЛ имел достаточно простую форму. Однако метод кольца станций дает более наглядное представление о поведении КЛ и свидетельствует о весьма сложных вариациях внутри данного межпланетного возмущения (рис. 2, б). Прежде всего, можно заметить признаки предвозрастания и предпониже-

ния до SSC. Хорошо заметно анизотропное начало ФЭ: после прихода ударной волны понижение интенсивности КЛ началось не сразу и не на всех станциях. Также на различных долготах ФП имеет различную продолжительность. На долготах 130–360° понижение закончилось до 20 UT 4 ноября, а на долготах 0–120° оно наблюдалось до 18–20 UT 5 ноября.

## ВЫВОДЫ

Для всестороннего исследования ФЭ необходимо использовать как можно больше методов и подходов. Для более тонкого исследования поведения КЛ и структуры форбуш-эффектов можно рекомендовать метод кольца станций, который наглядно демонстрирует такие особенности ФЭ, как анизотропное начало, предвестники приближающегося межпланетного возмущения и сложности поведения КЛ внутри структур в солнечном ветре.

Метод кольца станций больше подходит для качественного, а не количественного, описания и исследования ФЭ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомagnetизм и аэрoнoмия. 2018. Т. 58. № 3. С. 374–389.

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.

Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И., Скрипин Г.В. Новый метод исследования анизотропии космических лучей. Исследование по геомагнетизму и аэрoнoмии, 1966. М.: Наука, 105 с.

Asipenka A., Belov A.V., Eroshenko E., Mavromihalaki H., Papailiou M., Papaioannou A., Oleneva V., Yanke V.G. Asymptotic longitudinal distribution of cosmic ray variations in real time as the method of interplanetary space diagnostic // Proc. 31st ICRC. 2009. V. 4. P. 3100–3103.

Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Iucci N., Villaresi G., Yanke V.G. Search for Predictors of Forbush Decreases // Proc. 24<sup>th</sup> ICRC. 1995. V. 4. P. 888–891.

Belov A.V., Bieber J.W., Eroshenko E.A., Evenson P., Pyle R., Yanke V.G. Pitch-Angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: neutron monitor observations // Proc. 27<sup>th</sup> ICRC. 2001. V. 9. P. 3507–3510.

Belov A.V., Bieber J.W., Eroshenko E.A., Evenson P., Pyle R., Yanke V.G. Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances // Adv. Space Res. 2003. V. 31. I. 4. P. 919–924.

Kuwabara T., Bieber J. W., Clem J., et al. Real-time cosmic ray monitoring system for space weather // Space Weather. 2006. V. 4. S08001.

Munakata K., Kuwabara T., Yasue S., Kato C., Akahane S., Koyama M., Ohashi Y., Okada A., Aoki T., Mitsui K., Kojima H., Bieber J.W. 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.

Papailiou M., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. Precursor effects in different cases of Forbush decreases // Solar Phys. 2012a. V. 276. I. 1-2. P. 337–350.

Papailiou M., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. The asymptotic longitudinal cosmic ray intensity distribution as a precursor of Forbush decreases // Solar Phys. 2012b. V. 280. I. 2. P. 641–650.

Parsons N. R. Phase Changes in the Daily Variation of the Cosmic Ray Nucleonic Component // Tellus. 1960a. V. 12. I. 4. P. 450–462.

Parsons N. Effects of short-term world-wide modulation of the primary cosmic radiation on observed daily intensity variations // J. Geophys. Res. 1960b. V. 65, N 10. P. 3159–3161.

URL: <http://neutronm.bartol.udel.edu/catch/title.html>.

URL: <http://www01.nmdb.eu>.

URL: <http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/welcome.html>.

URL: <http://cr0.izmiran.ru/AnisotropyCR/main.htm>.