

УДК 524.1

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ЗЕМЛЕ, С КОРОНАЛЬНЫМИ ДЫРАМИ НА СОЛНЦЕ

© 2021 г. Н. В. Осетрова¹ *, И. И. Астапов¹, Н. С. Барбашина¹,
А. Ю. Коновалова¹, В. В. Шутенко¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: nvosetrova@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

В годы пониженной солнечной активности высокоскоростной солнечный ветер является одной из главных причин возмущений межпланетного магнитного поля, которые приводят к модуляциям потоков космических лучей, пронизывающих магнитосферу Земли. Представлены результаты анализа деформаций углового распределения космических лучей в GSE системе, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН во время геомагнитных возмущений в периоды минимумов солнечной активности 2009–2010 и 2018–2019 гг.

DOI: 10.31857/S0367676521110284

ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры на Солнце являются областями с пониженной светимостью. Именно в них формируется высокоскоростной солнечный ветер [1]. В годы низкой солнечной активности, ввиду отсутствия более мощных источников, он является основной причиной возмущений межпланетного магнитного поля. Такие возмущения модулируют поток космических лучей (КЛ), пронизывающих магнитосферу Земли, и возмущают ее, порождая магнитные бури. Достигая земной поверхности, мюонная компонента КЛ регистрируется в режиме реального времени мюонным годоскопом УРАГАН [2], входящим в состав уникальной научной установки НЕВОД (НИЯУ МИФИ). Таким образом, используя данные мюонного годоскопа, возможно изучение пространственно-временных вариаций потока мюонов, несущих информацию о гелиосферных возмущениях.

ФОРМАТ ДАННЫХ МЮОННОГО ГОДОСКОПА УРАГАН

Мюонография — это часовая матрица параметров треков, нормированная на количество событий, сглаженная относительно медленных трендов и суточных колебаний интенсивности потока мюонов, а также скорректированная на форму углового распределения потока мюонов [3]. Последовательность таких матриц дает возможность изучать временное изменение угловых распределений потока мюонов [4]. Для получения мюоно-

графий вычисляются относительные отклонения интенсивностей регистрируемого потока мюонов в единицах статистических погрешностей. Используя асимптотические направления, мюонографии из лабораторной системы координат преобразуются в угловое распределение родительских протонов на границе магнитопаузы в системе координат GSE (geocentric solar ecliptic system). Как в лабораторной системе, так и в GSE-отображении, мюонографии показывают области изменения потока вторичных и первичных космических лучей, а именно, размер областей (в стерадианах) и величину отклонения потока КЛ от среднего за предыдущие сутки (в единицах среднеквадратичного отклонения) [5]. Временные последовательности таких отклонений формируются в GSE-карты, удобные для анализа отклика мюонного годоскопа на гелиосферные события.

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Рассмотрены магнитные бури [6], произошедшие в результате воздействия высокоскоростного солнечного ветра, порожденного корональными дырами [7], на магнитосферу Земли. Всего рассмотрено 81 событие, произошедшее в течение четырех лет: в конце 23 солнечного цикла—начале 24: 2009 (15 бурь), 2010 (25 бурь) и в конце 24 солнечного цикла — 2018 (30 бурь) и 2019 (14 бурь).

С 27 августа 2019 года на видимом диске Солнца находились две корональные дыры. Одна из

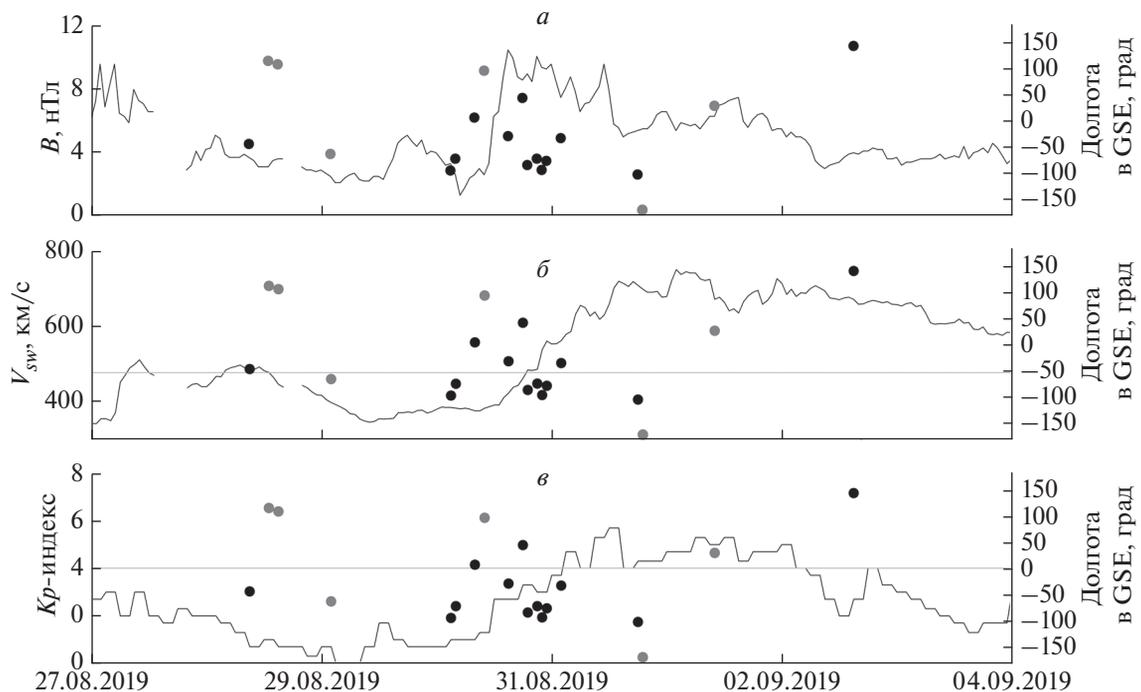


Рис. 1. Временные ряды индукции межпланетного магнитного поля (*a*), скорости солнечного ветра (*б*), индекса геомагнитной активности K_p (*в*). Серые точки – области повышения потока КЛ на 4σ и более, черные точки – области понижения потока КЛ на 4σ и более.

них – контрастная, положительной полярности, пересекла центральный меридиан 28 августа. Возмущение геомагнитного поля Земли от нее было зарегистрировано с 31 августа по 02 сентября на всех широтах, а также 30 августа и 03 сентября в отдельные часы суток на средних широтах и в течение суток в высоких широтах [8]. Эта дыра являлась источником высокоскоростного солнечного ветра, ставшего причиной возмущения в межпланетном пространстве и магнитосфере Земли. На рис. 1 приведены изменения индукции межпланетного магнитного поля B , скорости солнечного ветра V_{sw} и индекса геомагнитной активности K_p в конце августа – начале сентября 2019 г. Из графика (рис. 1*a*) видно, что возмущение индукции межпланетного поля B началось утром 30 августа (в 05:00 и в 02:00 UTC соответственно), после вхождения корональной дыры в геоэффективные долготы. Начало возмущения скорости солнечного ветра зарегистрировано 30 августа в 20:00 (рис. 1*a*). Магнитная буря ($K_p > 4$) на Земле началась 31.08.2019 в 02:00 UTC. Максимального значения индекс геомагнитной активности достиг 31.08.2019 в 13:00 UTC. Серые и черные области на графиках – это области повышения и понижения потока КЛ в соответствии с полученными мюнограммами. Черными точками на графиках отмечены области понижения потока КЛ, серыми – повышение на 4σ . Долгота, на которой были зарегистрированы данные возмущения указана на левой вертикальной оси. Первое

понижение потока КЛ было зарегистрировано 30.08.2019 в 03:00. Повышение потока КЛ зарегистрировано 30.08.2019 в 10:00. На протяжении двух последующих суток в потоке КЛ, зарегистрированных мюонным годоскопом, присутствовали области повышения и понижения интенсивности потока на 3σ . Первая область понижения потока была зарегистрирована за 23 ч до начала магнитной бури. Аналогичным образом были проанализированы все бури. Найдено, что в среднем отклик МГ УРАГАН на возмущения, порожденные корональными дырами, наблюдается на 17 ± 2 ч раньше, чем начало магнитной бури. Первая зарегистрированная область понижения потока КЛ соответствовала питч-углу 50° , а первая зарегистрированная область повышения потока КЛ соответствовала питч-углу 105° . Область с максимальным отклонением была зарегистрирована 30.08.2019 в 22:00 UTC, отклонение составило – 5.3σ , и соответствовала питч-углу 73° .

На рис. 2 представлены распределения областей деформаций и питч-углов для изменений (и повышений, и понижений) потока КЛ на 5σ и более.

На рис. 2*a* представлено распределение размеров областей за 4 рассмотренных года с низкой активностью Солнца. В этот период наблюдались области деформации размером от 0.1 до 0.8 стерадиан. Наиболее часто были зарегистрированы области размером 0.4 стерадиана в независимости от года.

На рис. 2*б* представлены распределения питч-углов в рассмотренные годы. Получено, что в

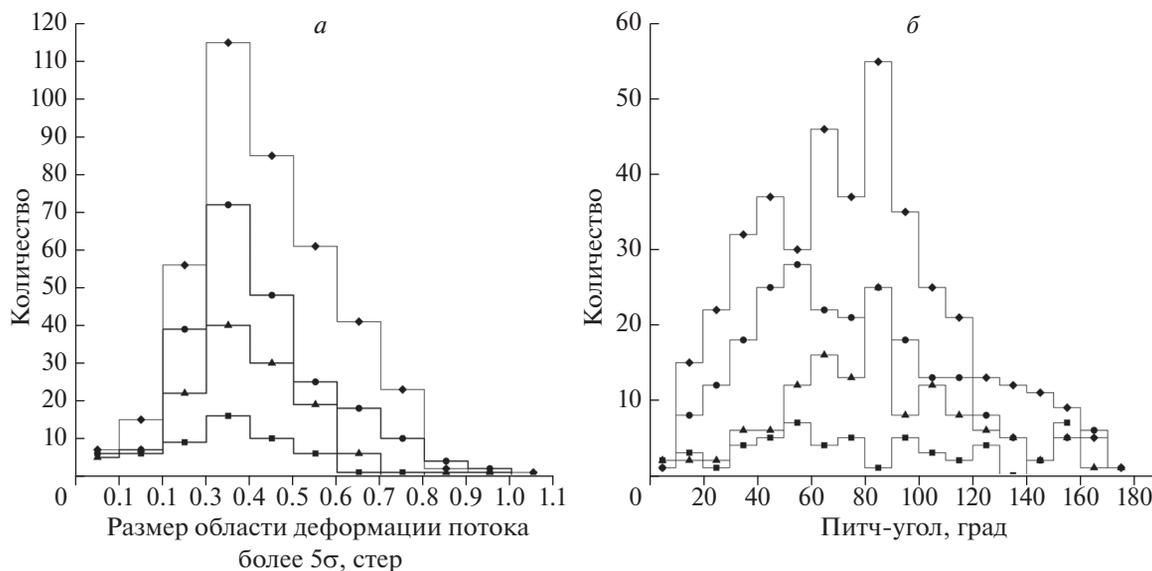


Рис. 2. Распределения размера областей изменения потока космических лучей (а) и питч-углов изменений потока КЛ, зарегистрированных в годы пониженной активности Солнца (б). Линиями с квадратами обозначены распределения 2009 г., с ромбами – 2010, круглыми точками – 2018 и треугольниками – 2019.

2009 г. наиболее часто частицы, зарегистрированные годоскопом, влетали в магнитосферу Земли с питч-углом 50° , в 2010 г. с углом 90° , в 2018 – 50° и в 2019 – 80° . Не влетали в магнитосферу частицы с питч-углами 180° и 0° (направленные вдоль и против силовой линии магнитного поля).

Аналогично были проанализированы остальные события. Установлена связь между 81 корональной дырой, магнитной бурей и изменением потока космических лучей на поверхности Земли и при влете первичных частиц в магнитопаузу. Найдено, что отклик МГ УРАГАН проявляется на 17 ± 2 ч раньше, чем начинается магнитная буря в средних широтах. Установлены наиболее частые питч-углы влета первичных частиц в магнитопаузу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ GSE-карт подтверждает влияние корональных дыр на поток космических лучей, регистрируемых на Земле в годы минимума солнечной активности, а также показывает возможность про-

гнозирования геомагнитных возмущений, вызванных высокоскоростным солнечным ветром.

Работа выполнена на уникальной научной установке НЕВОД при поддержке гранта Президента Российской Федерации (проект МК-2203.2019.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Richardson I.G. // Space Sci. Rev. 2004. V. 111. P. 267.
2. Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Adv. Space Res. 2015. V. 56. No. 12. P. 2693.
3. Барбашина Н.С. Методика исследования форбуш-эффектов в потоке мюонов космических лучей, регистрируемых в годоскопическом режиме. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. 133 с.
4. Астапов И.И., Барбашина Н.С., Борог В.В. Способ обнаружения гелиосферных возмущений. Патент РФ № 2446495, 2012.
5. Шутенко В.В., Барбашина Н.С., Компаниец К.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 364; Shutenko V.V., Barbashina N.S., Kompaniets K.G. et al. // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 3. P. 347.
6. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.
7. https://www.solen.info/solar/coronal_holes.html.
8. <http://ipg.geospace.ru/space-weather-review>.

Investigation of the relationship between the parameters of cosmic ray variations registered on the Earth and coronal holes on the Sun

N. V. Osetrova^{a, *}, I. I. Astapov^a, N. S. Barbashina^a, A. Yu. Konovalova^a, V. V. Shutenko^a

^aNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: nvosetrova@mephi.ru

In years of low solar activity, high-speed solar wind is one of the main reasons of disturbances in the interplanetary magnetic field. These disturbances lead to modulations of cosmic ray fluxes that penetrate the Earth's magnetosphere. This paper presents the results of analysis of deformations of the angular distribution of cosmic rays in the GSE system registered by the URAGAN muon hodoscope in years of geomagnetic disturbances during minimums of solar activity in 2009–2010 and 2018–2019.