

УДК 524.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ МЮОННЫМ ГОДОСКОПОМ УРАГАН В 2012–2017 гг.

© 2019 г. А. А. Ковыляева<sup>1</sup>\*, И. И. Астапов<sup>1</sup>, Н. С. Барбашина<sup>1</sup>, В. В. Борог<sup>1</sup>,  
А. Н. Дмитриева<sup>1</sup>, К. Г. Компаниец<sup>1</sup>, Ю. Н. Мишутина<sup>1</sup>, А. А. Петрухин<sup>1</sup>,  
В. В. Шутенко<sup>1</sup>, Е. И. Яковлева<sup>1</sup>, И. И. Яшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

\*E-mail: AAKovylyaeva@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Приводятся результаты анализа изменений потока мюонов космических лучей во время форбуш-эффектов, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН в 2012–2017 гг. и сцинтилляционным мюонным годоскопом в период 2016–2017 гг. Анализируются характеристики форбуш-эффектов за этот период. Приведены результаты сопоставления полученных характеристик вариаций потока мюонов с различными параметрами ближней гелиосферы во время форбуш-эффектов для 11-летнего цикла солнечной активности.

DOI: 10.1134/S036767651905017X

### ВВЕДЕНИЕ

Временные вариации интенсивности космических лучей в месте наблюдения могут быть вызваны изменениями параметров источников, включая ускорительные процессы на Солнце и в Галактике, а также различными модуляционными эффектами при распространении космических лучей в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. Одним из ярких примеров нерегулярных вариаций потока космических лучей являются форбуш-эффекты (ФЭ), которые выражаются в резком уменьшении интенсивности космических лучей (КЛ), обусловленном крупномасштабными возмущениями солнечного ветра [1]. В работе проведено изучение форбуш-эффектов и выявление связей между их различными параметрами и характеристиками солнечных, межпланетных и геомагнитных возмущений. Для оценки взаимосвязи солнечной активности и потока мюонов параметры форбуш-эффектов, в частности, их амплитуда, сопоставляются с наблюдаемым числом солнечных пятен, которые наблюдаются как области пониженной светимости на поверхности Солнца. Температура плазмы в центре солнечного пятна понижена до примерно 3700 К по сравнению с температурой 5700 К в окружающей фотосфере Солнца. Солнечные пятна представляют огромный интерес для исследования, поскольку являются областями са-

мых мощных солнечных вспышек, оказывающих наиболее сильное влияние на Землю.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Мюонный годоскоп УРАГАН (МГ УРАГАН) (55.7° N, 37.7° E, 173 м над уровнем моря) регистрирует поток мюонов на поверхности Земли одновременно в широком интервале зенитных (0°–80°) и азимутальных (0°–360°) углов с высоким угловым разрешением (~1°). МГ УРАГАН [2] является координатно-трековым детектором, позволяющим исследовать вариации углового распределения потока мюонов, обусловленные различными атмосферными и внеатмосферными процессами. МГ УРАГАН состоит из четырех независимых супермодулей (СМ). Каждый супермодуль представляет собой сборку из восьми плоскостей стримерных трубок, продуваемых газовой смесью Ar + CO<sub>2</sub> + n-пентан. Рабочая площадь каждого супермодуля ~11 м<sup>2</sup>. Трубки размером 9 × 9 × 3500 мм заключены в пластиковые контейнеры по 8 штук. Каждая плоскость содержит 320 трубок и двухкоординатную систему алюминиевых полосок стрипов. “X”-стрипы (320 штук) располагаются вдоль стримерных трубок с одной стороны, а “Y”-стрипы (288 штук) – поперек с другой стороны. При прохождении заряженной частицы через внут-

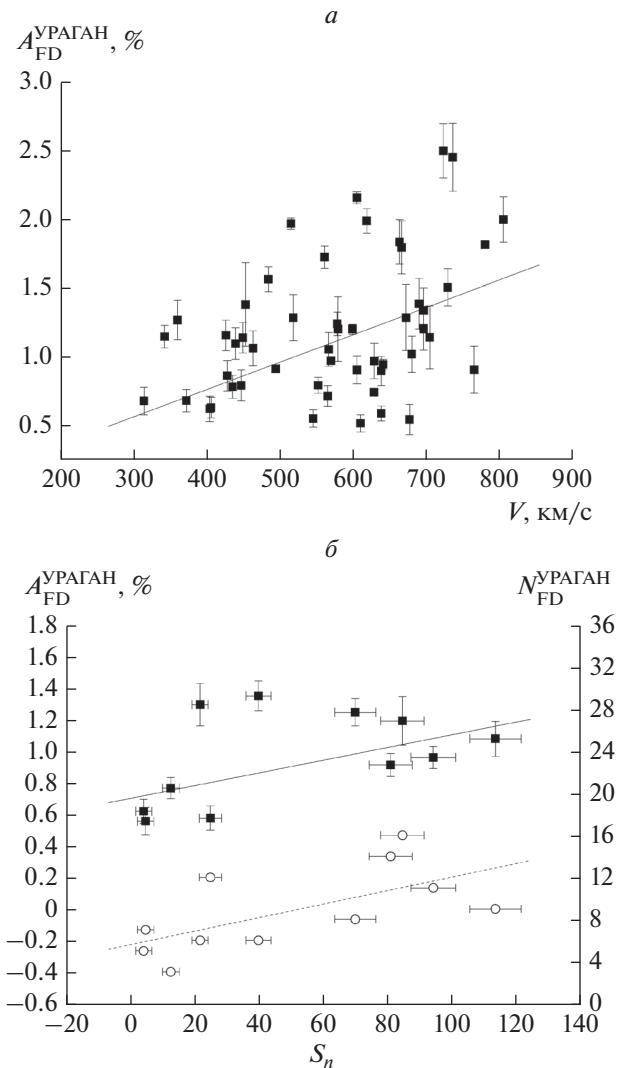
ренный объем трубки вблизи анодной проволоки образуется стример, электромагнитный сигнал от которого по стрипам поступает в регистрирующую систему.

Еще одним мюонным годоскопом, расположенным на территории НИЯУ МИФИ, является сцинтилляционный мюонный годоскоп (СцМГ) [3] – координатно-трековый мюонный детектор, который состоит из двух идентичных независимых супермодулей СМ1 и СМ2. Детектирующая система СМ СцМГ имеет модульный принцип построения и состоит из четырех двухслойных координатных плоскостей, проложенных пенопластом. Модуль является базовым элементом и представляет собой самостоятельную детектирующую систему первого уровня общей иерархической структуры мюонного годоскопа. Основным детектирующим элементом СцМГ является длинная полоска-стрип пластического сцинтиллятора ( $10.6 \times 26.3 \times 3500$  мм) на основе полистирола с добавлением 2% р-терфенила и 0.02% РОРОР. Координатная плоскость (КП) детектора состоит из двух слоев с взаимно-ортогональным расположением стрипов. Каждый слой отвечает за одну координату КП и формируется из двух базовых модулей (БМ). БМ представляет собой сборку из 64 стрипов, объединенных светоизолированным корпусом с одним мультианодным ФЭУ.

Для анализа ФЭ использовались 10-минутные данные МГ УРАГАН и СцМГ. В их скорость счета были введены поправки на барометрический и температурный эффекты.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФЭ С 2012 ПО 2017 гг.

Основными параметрами, характеризующими форбуш-эффект, являются амплитуда падения темпа счета космических лучей ( $A_{FD}$ ) и время падения  $T_{FD}$ . Исследования ФЭ проводились с помощью методики, специально разработанной для анализа ФЭ в потоке мюонов, регистрируемых в годоскопическом режиме [4]. Для анализа по данным МГ УРАГАН за период 2012–2017 гг. было отобрано 56 ФЭ с амплитудой более 0.5% и для них рассчитаны амплитуды и времена падения. Для каждого ФЭ были проанализированы параметры, характеризующие: межпланетное магнитное поле – величина вектора магнитной индукции ( $B$ , нТл) и его проекция на ось  $Z$  ( $B_z$ , нТл), солнечный ветер – скорость ( $V$ , км  $\cdot$  с $^{-1}$ ), плотность ( $P$ , см $^{-3}$ ) и температура ( $T$ , К), а также индекс  $Kp$  (планетарный индекс, вычисляется как среднее значение  $Kp$ -индексов, определенных на 13-ти геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44° и 60° северной и южной геомаг-



**Рис. 1.** Корреляционные зависимости: *a* – между амплитудами ФЭ по данным МГ УРАГАН и скоростью солнечного ветра за период 2012–2017 гг.; *b* – между амплитудами ФЭ по данным МГ УРАГАН и числом пятен на Солнце (квадраты); между среднегодовым числом ФЭ по данным МГ УРАГАН и числом пятен на Солнце (открытые кружки) за период 2007–2017 гг. Прямая и штриховая линии – линейные аппроксимации.

нитных широт) и  $Dst$ -индекс (индекс геомагнитной активности, нТл) из базы данных OMNI.

Получены корреляции между амплитудой падения  $A_{FD}$  и временем падения ФЭ  $T_{FD}$  и параметрами солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, проекцией вектора магнитной индукции на ось  $Z$  ( $B_z$ , нТл). Наилучшие, хотя слабо выраженные корреляции наблюдаются между амплитудой падения  $A_{FD}$  и скоростью солнечного ветра  $V$  ( $R = 0.46$ , линейный фит  $A_{FD}^{УРАГАН} = -0.039 + 0.02 \cdot V$ ) (рис. 1*a*) и проекцией вектора магнитной индукции на ось  $Z$   $B_z$  ( $R = 0.23$ ) и временем падения ФЭ

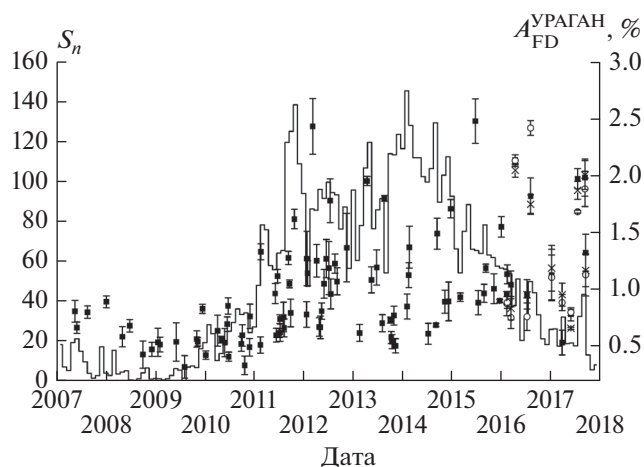


Рис. 2. Зависимость от времени амплитуд падения ФЭ (символы) и числа пятен (гистограмма), наблюдаемых на Солнце за 2007–2017 гг.

$T_{FD}$  и скоростью солнечного ветра  $V$  ( $R = 0.24$ ). Все остальные параметры можно считать независимыми.

### 3. 11-ЛЕТНИЙ ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Результаты исследования характеристик ФЭ за 2007–2011 гг. по данным МГ УРАГАН были опубликованы ранее [5]. Всего за 11-летний период было отобрано 96 событий с амплитудой более 0.5%. Этот период представляет собой практически непрерывную серию измерений пространственно-угловых вариаций потока мюонов на поверхности Земли в 2007–2017 гг. Он охватывает окончание 23-го солнечного цикла в 2007–2008 гг., начало 24 цикла солнечной активности — январь 2009 г., минимум солнечной активности в 2009 году, периоды увеличения активности в 2010–2011 гг., годы максимума солнечной активности 2012–2015 гг. и уменьшение активности 24-го цикла в 2016–2017 гг. Число солнечных пятен является надежным и доступным солнечным параметром, особенно в исследованиях модуляции космических лучей. В работе изучается зависимость между амплитудой ФЭ и солнечной активностью в период с 2007 по 2017 гг.

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды ФЭ по данным МГ УРАГАН (квадраты), по данным СМ1 (открытые кружки), СМ2 СцМГ (крестики) и числа пятен, наблюдаемых ежедневно на Солнце, от времени за период с 2007 по 2017 гг. (черная линия). Коэффициент корреляции меж-

ду среднегодовым числом ФЭ по данным МГ УРАГАН и числом пятен, наблюдаемых на Солнце за 2007–2017 гг., составил  $R = 0.63$  (линейный фит  $N_{FD}^{УРАГАН} = 5.6 + 0.06 \cdot S_n$ ) (рис. 1б). Коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями амплитуды ФЭ по данным МГ УРАГАН и числом пятен равен  $R = 0.57$  (линейный фит  $A_{FD}^{УРАГАН} = 0.7 + 0.004 \cdot S_n$ ) (рис. 1б). Корреляции хорошо выражены.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление характеристик вариаций потока мюонов с различными параметрами околоземного пространства во время ФЭ за 2012–2017 гг. показало, что наилучшие, хотя и слабые, корреляции наблюдаются между амплитудой падения ФЭ  $A_{FD}$  и скоростью солнечного ветра  $V$  ( $R = 0.46$ ) и значением вертикальной составляющей  $B_z$  ( $R = 0.23$ ). Изучение 11-летнего цикла активности Солнца показало, что коэффициент корреляции между среднегодовым числом ФЭ по данным МГ УРАГАН и числом пятен, наблюдаемых на Солнце за 2007–2017 гг., составил  $R = 0.63$ . Полученные результаты указывают на взаимосвязь между появлением событий ФЭ и изменением солнечной активности в течение 11 лет.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Программа повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ, проект 02.а03.21.0005) и Российского научного фонда (РНФ), проект № 17-17-01215 “Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belov A.V.* // Universal Heliophys. Processes Proc. 2008. V. 4. P. 430.
2. *Барбашина Н.С., Коккоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др.* // Приб. и техн. эксп. 2008. № 2. С. 26; *Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. № 2. P. 180.
3. *Ampilogov N.V., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* // Phys. Proc. 2015. V. 74. P. 478.
4. *Барбашина Н.С., Дмитриева А.Н., Компаниец К.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 360; *Barbashina N.S., Dmitrieva A.N., Kompaniets K.G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. № 3. P. 343.
5. *Barbashina N.S., Astapov I.I., Borog V.V. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. Art. no. 012189.