

УДК 524.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ ВО ВРЕМЯ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ МЮОННОГО ГОДОСКОПА УРАГАН

© 2021 г. А. А. Ковыляева^{1,2, *}, Н. С. Барбашина¹, В. Г. Гетманов^{2,3}, А. Н. Дмитриева^{1,2},
М. Н. Добровольский², Ю. Н. Мишутина¹, А. А. Соловьев^{2,3}, В. Е. Чинкин²,
В. В. Шутенко¹, Е. И. Яковлева¹, И. И. Яшин^{1,2}

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: AAKovylyayeva@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

По данным мюонного годоскопа УРАГАН изучены Форбуш-эффекты, вызванные мощными солнечными вспышками X-класса, за период с 2007 по 2019 гг. Мюонный годоскоп УРАГАН регистрирует поток мюонов космических лучей на поверхности Земли одновременно с различных направлений. Это позволяет изучать энергетические, угловые и пространственно-временные характеристики вариаций потока мюонов космических лучей при Форбуш-эффектах. Проанализирована связь полученных характеристик Форбуш-эффектов с параметрами гелиосферных и геомагнитных возмущений.

DOI: 10.31857/S0367676521030145

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки являются наиболее интенсивными “возмущениями” космической погоды. Во время солнечной вспышки испускаются протоны и электроны высоких энергий, а также интенсивное излучение всех длин волн, которое может влиять не только на верхние слои атмосферы Земли, но и на распространение радиоволн. Повышенный уровень рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения приводит к ионизации ионосферы на солнечной стороне Земли. Интенсивное рентгеновское излучение вызывает поглощение в нижнем слое ионосферы, что приводит к ухудшению или полному поглощению (т.е. отключению радиосигнала) высокочастотных сигналов. Солнечные вспышки классифицируются на основе их пикового излучения в спектральном диапазоне 0.1–0.8 нм (т.е. в рентгеновском диапазоне) и маркируются буквами “А”, “В”, “С”, “М” и “Х”, обозначающими вспышки X-класса как самые интенсивные с эмиссией выше 10^{-4} Вт · м⁻² [1].

Форбуш-эффект (ФЭ) в геофизике — представляет собой резкое понижение интенсивности

космических лучей (КЛ), вызванное отклонением заряженных частиц неоднородностями межпланетного магнитного поля. Такое понижение интенсивности КЛ может быть обусловлено отклонением частиц первичного космического излучения различными крупномасштабными неоднородностями: магнитными полями облаков солнечной плазмы, которые образуются при корональных выбросах масс (КВМ); ударными волнами, которые формируются при движении вращающихся вместе с Солнцем высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр; другими явлениями в гелиосфере. Более того, ФЭ можно наблюдать не только на Земле, но и на космических аппаратах. Физик Скотт Форбуш заметил, что за 11-летний цикл солнечной активности интенсивность космических лучей, достигающих Земли, антикоррелировала с количеством солнечных пятен, так как космических лучей больше в минимуме цикла и меньше в максимуме [2]. При максимальной солнечной активности более сильные магнитные поля выносятся солнечным ветром в межпланетное пространство, и эти поля отклоняют космические лучи.

Таблица 1. Форбуш-эффекты, вызванные мощными солнечными вспышками X-класса, по данным мюонного годоскопа УРАГАН за период с 2007 по 2019 гг.

№	Время начала вспышки, UT	Дата начала ФЭ, UT	Δt , сутки	A_{FD} , %	V_{SW} , км/с	B , нТл	Dst_{min} , нТл	Класс вспышки	Координаты
1.	15.02.2011 01:44	18.02.2011 02:30	3.0	1.3 ± 0.1	691	30.6	-27	X2.2	S20W12
2.	07.09.2011 22:32	10.09.2011 04:40	2.3	1.3 ± 0.1	652	19.9	-64	X1.8	N14W18
3.	24.09.2011 09:21	26.09.2011 13:50	2.2	0.8 ± 0.1	704	34.2	-103	X1.9	N12E60
4.	27.01.2012 17:37	31.01.2012 15:20	3.9	1.1 ± 0.1	427	10.8	-19	X1.7	N27W71
5.	07.03.2012 04:00	08.03.2012 11:20	1.3	2.4 ± 0.2	737	23.1	-145	X5.4	N17E27
6.	12.07.2012 15:37	14.07.2012 18:30	2.1	1.8 ± 0.2	667	27.3	-133	X1.4	S15W01
7.	13.05.2013 15:48	15.05.2013 16:30	2.0	1.1 ± 0.1	440	10.8	-57	X2.8	N11E85
8.	28.10.2013 01:41	29.10.2013 18:40	1.7	0.8 ± 0.1	436	12.1	-50	X1.0	N04W66
9.	10.09.2014 17:21	12.09.2014 11:20	1.7	1.5 ± 0.1	730	31.7	-75	X1.6	N14E02
10.	07.11.2014 16:53	09.11.2014 11:10	1.8	0.9 ± 0.1	606	19.4	-57	X1.6	N14E36
11.	20.12.2014 00:11	23.12.2014 13:10	3.5	1.7 ± 0.1	562	28.7	-38	X1.8	S21W24
12.	06.09.2017 11:53	08.09.2017 00:50	1.5	2.0 ± 0.2	821	27.3	-142	X9.3	S08W33
13.	10.09.2017 15:35	13.09.2017 11:40	2.8	1.3 ± 0.2	622	13.7	-50	X8.2	S09W84

Для регистрации потока космических лучей в настоящее время в основном используется мировая сеть нейтронных мониторов [3] и мюонные телескопы [4]. На территории НИЯУ МИФИ действуют мюонный годоскоп (МГ) большой площади УРАГАН [5]. Отличительной особенностью мюонного годоскопа УРАГАН от других наземных установок является возможность восстанавливать траекторию каждого мюона со всех направлений небесной полусферы.

В статье изучаются ФЭ, зарегистрированные в потоке мюонов космических лучей по данным МГ УРАГАН. Из 103 событий за период с 2007 по 2019 гг. с амплитудой ФЭ $A_{FD} > 0.5\%$ было отобрано 13 ФЭ, которые были вызваны вспышками X-класса. Проанализирована связь полученных характеристик Форбуш-эффектов с параметрами гелиосферных и геомагнитных возмущений. Подробно рассмотрены события 8 марта 2012 года и 8 сентября 2017 года, вызванные вспышками X-класса и сопровождавшиеся максимальным падением значения Dst индекса.

АНАЛИЗ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ МОЩНЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ X-КЛАССА

В табл. 1 приведено время начала вспышки, время начала ФЭ, разница между началом вспышки и началом ФЭ Δt (сутки), амплитуда ФЭ в потоке мюонов (A_{FD} , %), скорость солнечного ветра (V_{SW} , км/с), модуль вектора магнитной индукции (B , нТл), индекс геомагнитной активности (Dst_{min} -индекс, нТл) [6], класс вспышки и ее координаты.

За 2007–2010 гг. и 2018–2019 гг. (в периоды минимума солнечной активности) таких событий не наблюдалось. Начало Форбуш-эффекта определялось по данным МГ УРАГАН с использованием методики определения характеристик ФЭ [7]. Ранее по данным МГ УРАГАН за период 2012–2017 гг. было отобрано 56 ФЭ с амплитудой более 0.5% и получены корреляции с параметрами гелиосферных и геомагнитных возмущений [8].

На рис. 1 приведены корреляционные зависимости амплитуды падения A_{FD} от скорости солнечного ветра V_{SW} (а) – коэффициент корреляции $R = 0.58 \pm 0.04$, вектора магнитной индукции $B - R = 0.3 \pm 0.3$ (б) и Dst_{min} -индекса – $R = -0.64 \pm 0.02$ (в).

Событие 8 марта 2012 года

7 марта 2012 г. в активной области NOAA (AR) 11429, расположенной в северо-восточном квадранте солнечного диска, произошла вспышка класса X5.4. Вспышка была связана с очень быстрым корональным выбросом массы (КВМ) со скоростью около 2700 км/с. Эта вспышка была вторым по величине событием в 24-м солнечном цикле, вызвавшим геомагнитную бурю уровня G3.

На основе зависимости амплитуд форбуш-понижений от среднелогарифмических энергий первичных КЛ, дающих вклад в изменение скорости счета мюонного годоскопа во время ФЭ, рассчитывается показатель спектра амплитуд α . Пяти зенитно-угловым интервалам: $0^\circ - 17^\circ$, $17^\circ - 26^\circ$, $26^\circ - 34^\circ$, $34^\circ - 44^\circ$ и более 44° соответствуют следующие среднелогарифмические энергии (E_{ln}):

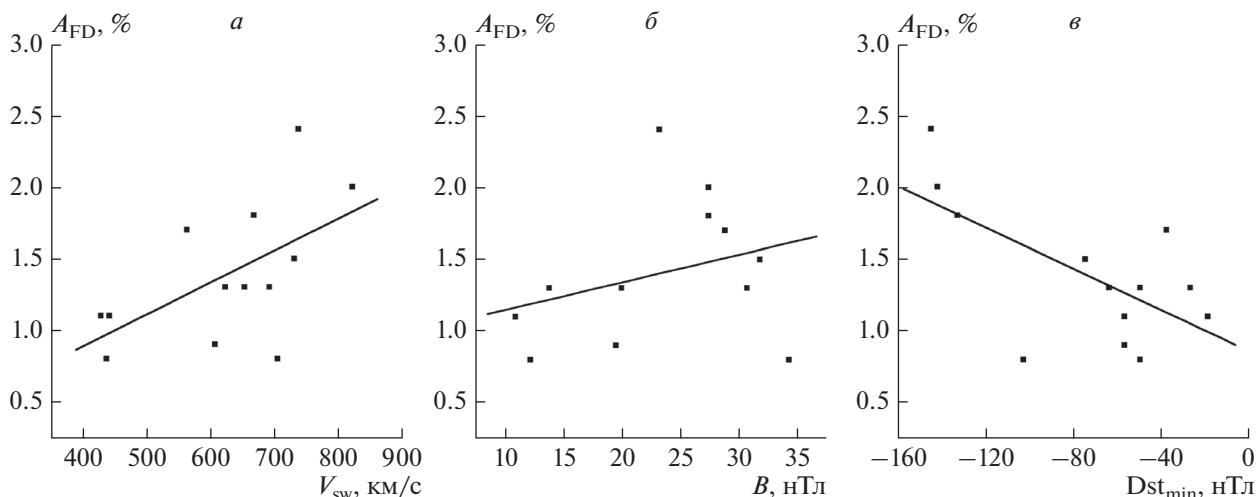


Рис. 1. Корреляционные зависимости амплитуды ФЭ A_{FD} по данным МГ УРАГАН (а) со скоростью солнечного ветра V_{sw} , (б) модулем вектора магнитной индукции B ($R = 0.3 \pm 0.3$) и (в) Dst_{min} -индексом ($R = -0.64 \pm 0.02$) для 13 событий, вызванных вспышками X-класса. Точки – экспериментальные данные, прямая – линейный фит.

14.7, 15.5, 17.5, 19.7 и 25.3 ГэВ. Полученная зависимость фитировалась степенной функцией E^α [9, 10].

Из рис. 2а видно, что эффект проявился в достаточной степени даже в области больших энергий (~24 ГэВ): падение в пятом диапазоне углов составило $2.0 \pm 0.1\%$. Это свидетельствует о том, что влияние гелиосферного возмущения на космические лучи распространялось на энергии выше 24 ГэВ. Показатель спектра амплитуд α составил -1.3 ± 0.2 .

Событие 8 сентября 2017 года

6 сентября 2017 г. произошла вспышка X9.3/2B, координаты S08W33, время максимума 12:02 UT, продолжительность 17 мин. Вспышка сопровождалась выбросом корональной массы (скорость 1100–1200 км/с) с компонентой, направленной в сторону Земли и потоками протонов в широком диапазоне энергий. В начале суток 8 сентября 2017 г. пришел ускоренный поток от КВМ, скорость солнечного ветра резко увеличилась до 847 км/с, усилились флуктуации южной компоненты межпланетного магнитного поля. На рис. 2б показана зависимость амплитуд ФЭ 8 сентября 2017 года от среднелогарифмических энергий первичных КЛ, дающих вклад в изменение скорости счета МГ УРАГАН для пяти зенитно-угловых интервалов, перечисленных выше. Показатель спектра амплитуд α составил -1.4 ± 0.2 . Падение в пятом диапазоне углов составило $1.2 \pm 0.1\%$.

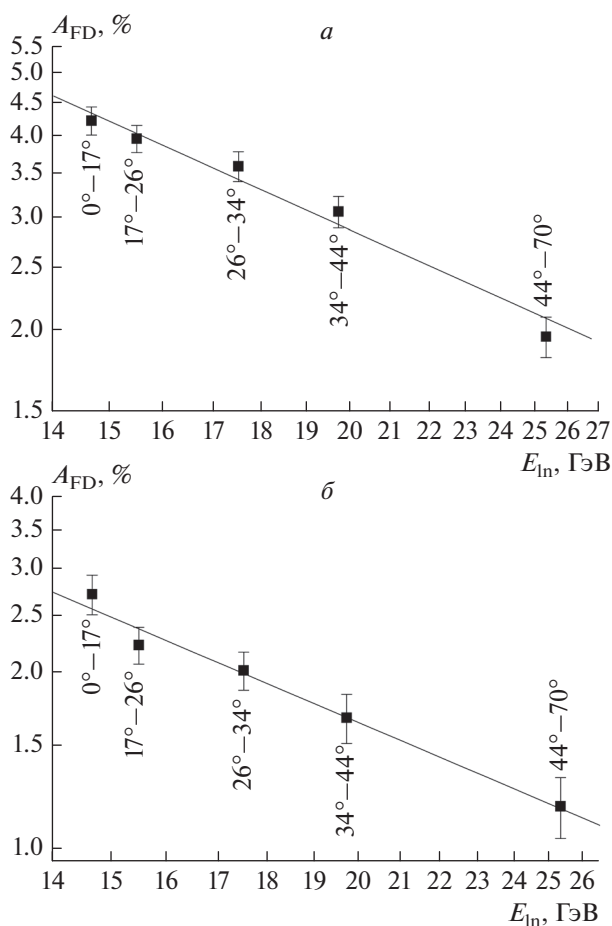


Рис. 2. Зависимость амплитуд ФЭ 8 марта 2012 года (а) и 8 сентября 2017 года (б) от среднелогарифмических энергий первичных КЛ, дающих вклад в изменение скорости счета МГ УРАГАН для пяти зенитно-угловых интервалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За период с 2007 по 2019 гг. отобраны 13 ФЭ, вызванных мощными солнечными вспышками X-класса. Рассмотренный подробно ФЭ 8 марта 2012 года был более мощным по сравнению с событием 8 сентября 2017 года: амплитуда падения в интегральной скорости счета составила $2.4 \pm 0.2\%$ и $2.0 \pm 0.2\%$, соответственно. Для обоих событий влияние гелиосферного возмущения на космические лучи распространялось на энергии выше 24 ГэВ. Коэффициент корреляции между амплитудами ФЭ A_{FD} и скоростью солнечного ветра V_{sw} составил $R = 0.58 \pm 0.04$, со значением модуля вектора магнитной индукции $B - R = 0.3 \pm 0.3$, с индексом геомагнитной активности $Dst_{min} - R = -0.64 \pm 0.02$. Полученные результаты указывают на хорошую взаимосвязь между параметрами гелиосферных и геомагнитных возмущений и амплитудами ФЭ A_{FD} .

Работа выполнена с использованием данных уникальной научной установки НЕВОД при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01215).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A. et al.* // Space Weather. 2018. V. 16. P. 1013.
2. *Forbush S.E.* // J. Geophys. Res. 1954. V. 59. P. 525.
3. *Mavromichalaki H., Papaioannou A., Plainaki C. et al.* // Adv. Space Res. 2011. V. 47. P. 2210.
4. *Rockenbach M., Dal Lago A., Schuch N.J. et al.* // Space Sci. Rev. 2014. V. 182. P. 1.
5. *Барбашина Н.С., Кокоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др.* // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26; *Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. P. 180.
6. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>.
7. *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. No 3. P. 343.
8. *Ковыляева А.А., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 622.; *Kovylyeva A.A., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No 5. P. 563.
9. *Яковлева Е.И., Богданов А.Г., Дмитриева А.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 375; *Yakovleva E.I., Bogdanov A.G., Dmitrieva A.N. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No 3. P. 357.
10. *Barbashina N.S., Astapov I.I., Borog V.V. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. Art. No 012189.

Study of Forbush effects during powerful solar flares by the URAGAN muon hodoscope data

**A. A. Kovylyayeva^{a, b, *}, N. S. Barbashina^a, V. G. Getmanov^{b, c}, A. N. Dmitrieva^{a, b}, M. N. Dobrovolsky^b,
Yu. N. Mishutina^a, A. A. Soloviev^{b, c}, V. E. Chinkin^b, V. V. Shutenko^a, E. I. Yakovleva^a, I. I. Yashin^{a, b}**

^aNational Research Nuclear University MEPHI, Moscow, 115409 Russia

^bGeophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia

^cInstitute of the Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

*e-mail: AAKovylyayeva@mephi.ru

Forbush effects caused by powerful X-class solar flares were studied according to the muon hodoscope URAGAN data for the period from 2007 to 2019. The muon hodoscope URAGAN registers the cosmic ray muon flux on the Earth's surface simultaneously from various directions. This makes it possible to study the energy, angular and space-time characteristics of variations in the cosmic ray muon flux during Forbush effects. The dependence of the obtained Forbush effect characteristics on the parameters of heliospheric and geomagnetic disturbances is analyzed.