

Сессия МОД-2. Форбуш-понижения интенсивности ГКЛ.

Исследование форбуш-эффектов во время мощных солнечных вспышек по данным мюонного годоскопа УРАГАН

**А.А. Ковыляева, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, Ю.Н. Мишутина,
В.В. Шутенко, Е.И. Яковлева, И.И. Яшин**

Скайп: [live:cid.8939b0609fd61e31](skype:live:cid.8939b0609fd61e31)

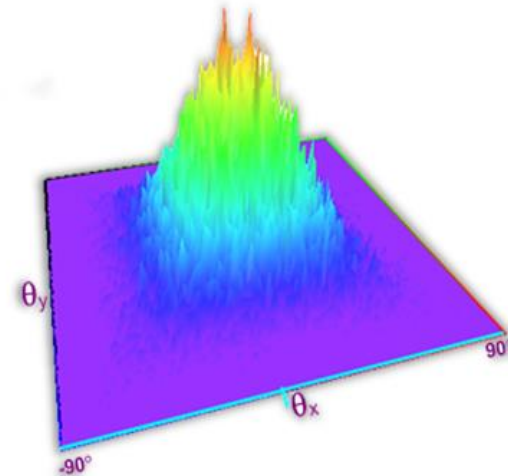
Электронный адрес: aakovulyaeva@mephi.ru

Мюонный годоскоп УРАГАН

Мюонный годоскоп (МГ) УРАГАН - широкоапертурный координатно-трековый детектор, предназначенный для регистрации мюонов космических лучей одновременно со всех сторон верхней полусферы. Используется для исследования характеристик вариаций потока мюонов в зависимости от пространственного угла. УРАГАН состоит из четырех идентичных супермодулей (СМ) общей площадью около 46 м².



Каждый СМ собран из восьми слоев камер стримерных трубок, снабженных двухкоординатной системой внешних считывающих стрипов, и обеспечивает высокую пространственную и угловую точность детектирования треков мюонов (соответственно 1 см и 0.7°) в широкой зенитно-угловой апертуре от 0° до 75°.



Параметры трека (два проекционных угла) восстанавливаются в реальном времени, треки накапливаются в двумерной угловой матрице за один минутный интервал. Такая матрица представляет собой «мюонный снимок» верхней полусферы с минутной экспозицией.

Форбуш-понижение (ФП) представляет собой резкое уменьшение интенсивности космических лучей (КЛ), вызванное возмущением потока заряженных частиц из-за неоднородностей межпланетного магнитного поля, связанных с ударной волной в солнечном ветре. Для анализа ФП используются данные о скорости счета мюонов с поправкой на барометрический и температурный эффекты. Для анализа ФП определяются момент начала падения скорости счета t_1 и момент окончания падения скорости счета t_2 , производится выбор временных рядов до t_1 (I_b) и после t_2 (I_r). С помощью линейной аппроксимации рассчитываются наклоны рядов скорости счета $I_b(t)$ и $I_r(t)$ для i дней ($i = 1, 2, 3$) до ФП (B_b) и для k дней ($k = 1, 2, 3$) после расчета ФП (B_r). Затем с помощью этих коэффициентов рассчитываются ряды скорости счета, скорректированные на наклоны:

$$I_{bs}^{(i)}(t) = I_b(t) - B_b^{(i)} \times (t - t_1)$$

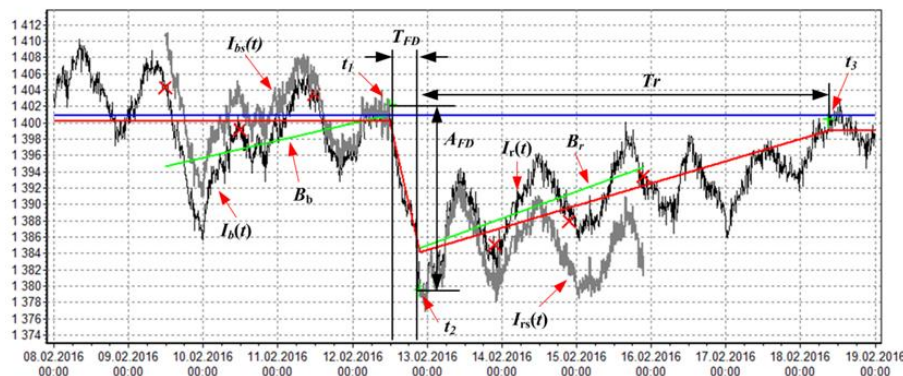
$$I_{rs}^{(k)}(t) = I_r(t) - B_r^{(k)} \times (t - t_2)$$

Затем скорректированная скорость счета усредняется за j дней ($j \leq i$) и за k дней ($k \geq m$), соответственно, что дает усредненные значения до ФП $\langle I_{bs}^{(i,j)} \rangle$ и после ФП $\langle I_{rs}^{(k,m)} \rangle$. В результате получается набор из 36 различных оценок амплитуды:

$$A_{ij}^{k,m} = \left(\langle I_{bs}^{(i,j)} \rangle - \langle I_{rs}^{(k,m)} \rangle \right) / \langle I_{bs}^{(i,j)} \rangle \times 100, \%$$

Средняя величина этих значений принимается за амплитуду форбуш-понижения:

$$A_{FD} = \langle A_{ij}^{km} \rangle$$



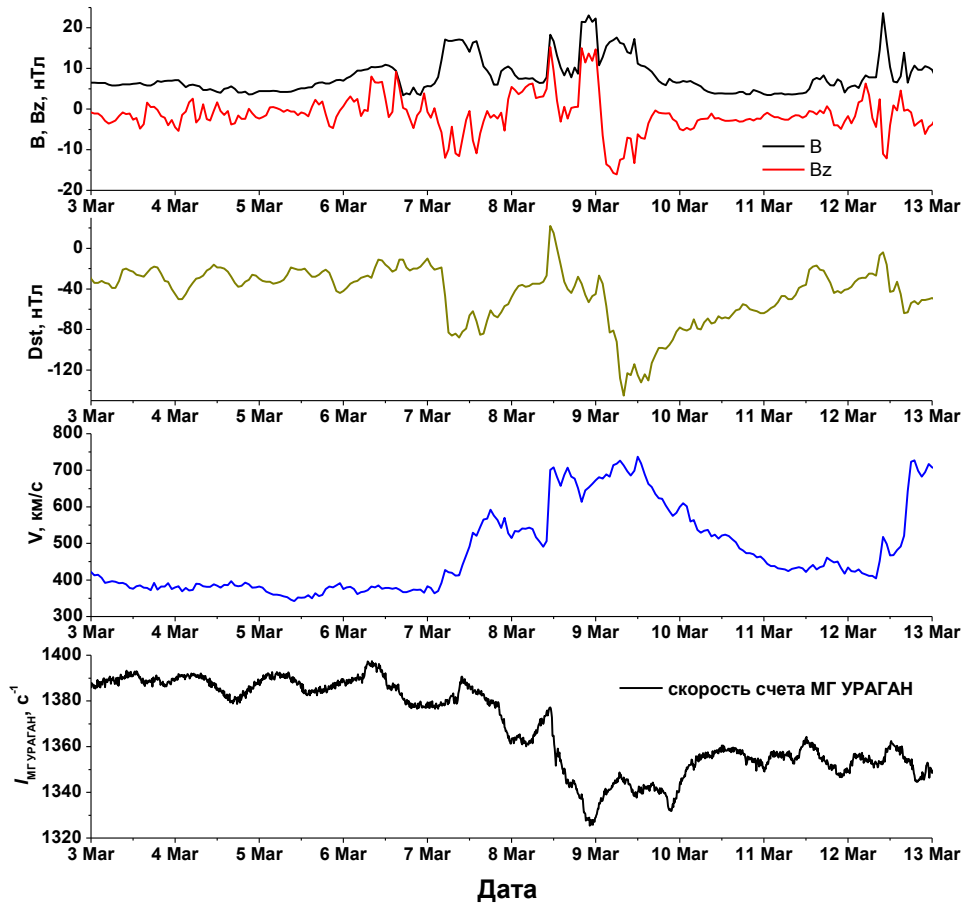
Форбуш-понижения, вызванные мощными солнечными вспышками X-класса, по данным мюонного годоскопа УРАГАН за период с 2007 по 2019 гг.

№	Дата начала события ФП, UT	$A_{FD}, \%$	$V_{SW}, \text{ км/с}$	$B, \text{ нТл}$	$Dst_{min}, \text{ нТл}$	Класс вспышки	Время начала вспышки, UT
1.	18.02.2011 02:30	1.3 ± 0.1	691	30.6	-27	X2.2	15.02.2011 01:44
2.	10.09.2011 04:40	1.3 ± 0.1	652	19.9	-64	X1.8	07.09.2011 22:20
3.	26.09.2011 13:50	0.8 ± 0.1	704	34.2	-103	X1.9	24.09.2011 09:40
6.	31.01.2012 15:20	1.1 ± 0.1	427	10.8	-19	X1.7	27.01.2012 17:37
4.	08.03.2012 11:20	2.4 ± 0.2	737	23.1	-145	X5.4	07.03.2012 04:00
5.	14.07.2012 18:30	1.8 ± 0.2	667	27.3	-133	X1.4	12.07.2012 15:37
8.	15.05.2013 16:30	1.1 ± 0.1	440	10.8	-57	X2.8	13.05.2013 15:48
9.	29.10.2013 18:40	0.8 ± 0.1	436	12.1	-50	X1.0	28.10.2013 01:41
7.	11.11.2013 00:00	0.5 ± 0.1	611	14.1	-81	X1.1	08.11.2013 04:20
10.	12.09.2014 11:20	1.5 ± 0.1	730	31.7	-75	X1.6	10.09.2014 17:21
11.	09.11.2014 11:10	0.9 ± 0.1	606	19.4	-57	X1.6	07.11.2014 16:53
12.	21.12.2014 19:10	1.7 ± 0.1	562	28.7	-38	X1.8	20.12.2014 00:11
13.	08.09.2017 00:50	2.0 ± 0.2	821	27.3	-142	X9.3	06.09.2017 11:53
14.	13.09.2017 11:40	1.3 ± 0.2	622	13.7	-50	X8.2	10.09.2017 15:35

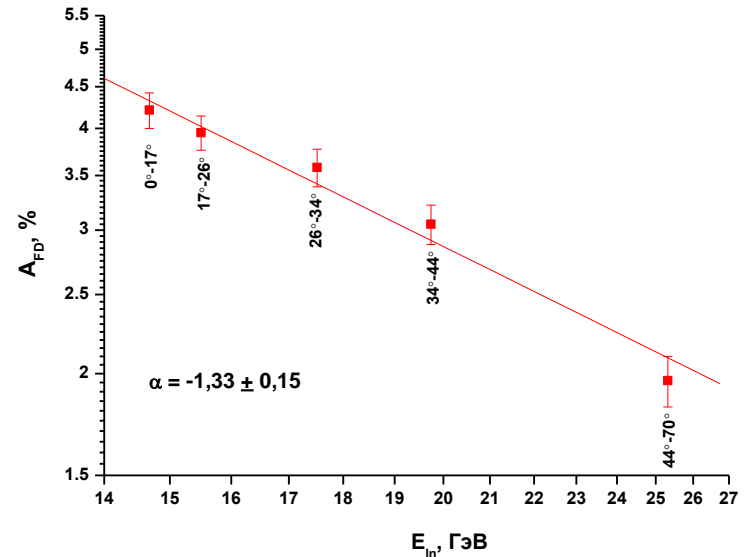
*** За 2007-2010 гг. и 2018-2019 гг. не наблюдались события ФП, вызванные вспышками X-класса**

Событие 8 марта 2012 г.

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 КВМ со скоростью около 2700 км/с. Эта вспышка была вторым по величине событием в 24-м солнечном цикле, вызвавшим геомагнитную бурю уровня G3.



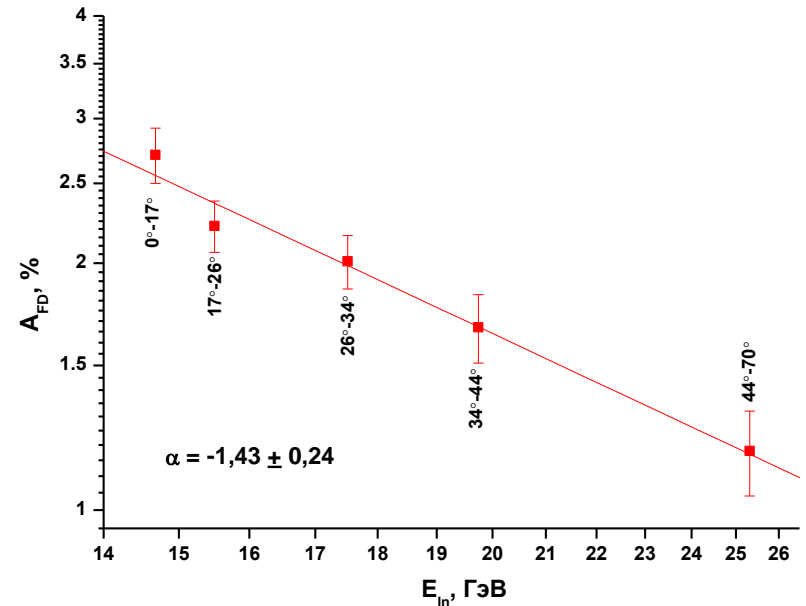
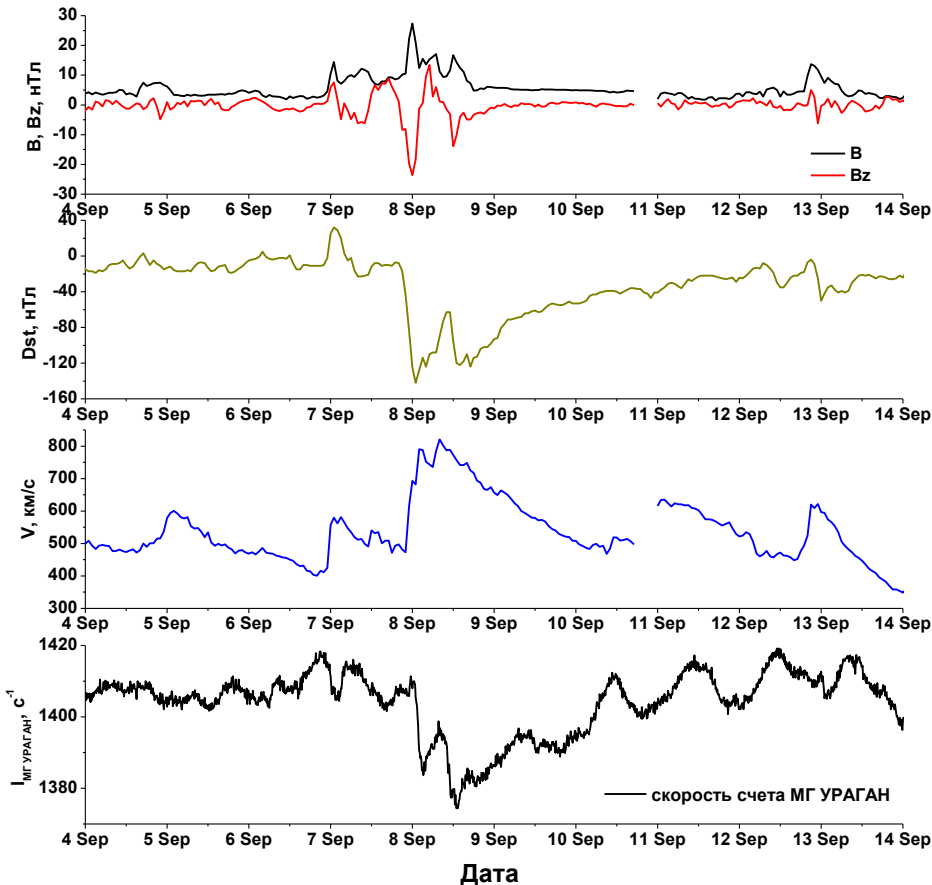
Показатель спектра амплитуд α рассчитывается на основе зависимости амплитуд форбуш-понижений от среднелогарифмических энергий первичных КЛ, дающих вклад в изменение скорости счета мюонного годоскопа во время ФП. Пяти zenith-угловым интервалам: 0° – 17° , 17° – 26° , 26° – 34° , 34° – 44° и более 44° соответствуют следующие среднелогарифмические энергии (E_{in}): 14.7, 15.5, 17.5, 19.7 и 25.3 ГэВ. Полученная зависимость фитировалась степенной функцией E^α .



Из рисунка видно, что эффект проявился в достаточной степени даже в области больших энергий (~ 24 ГэВ): падение в пятом диапазоне углов составило $1.96 \pm 0.14\%$. Это свидетельствует о том, что влияние гелиосферного возмущения на космические лучи распространялось на энергии выше 24 ГэВ.

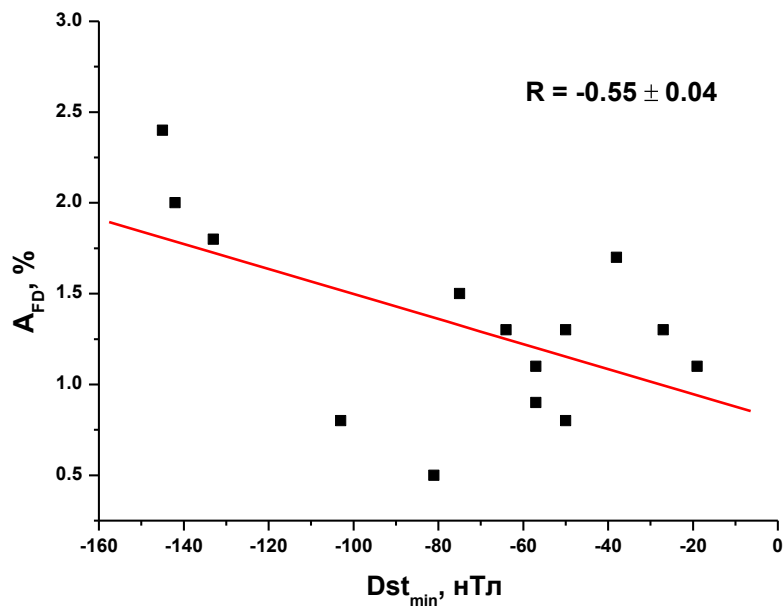
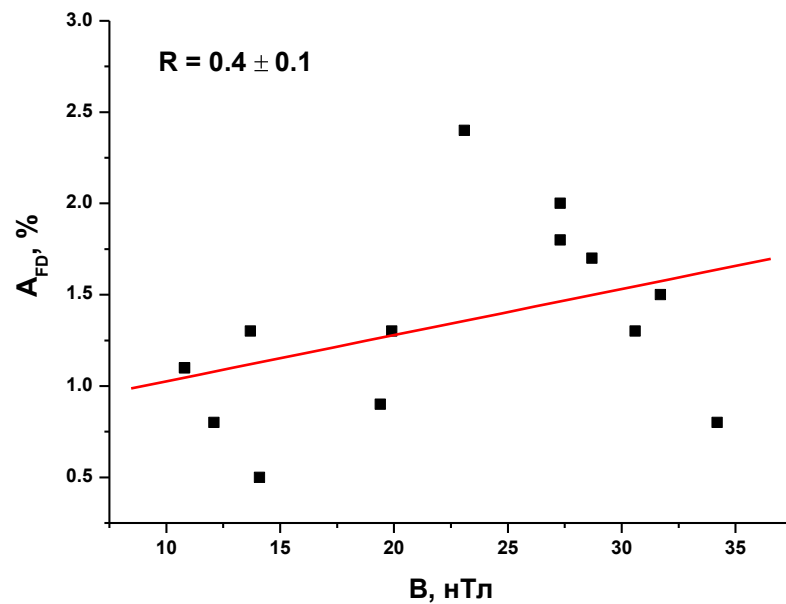
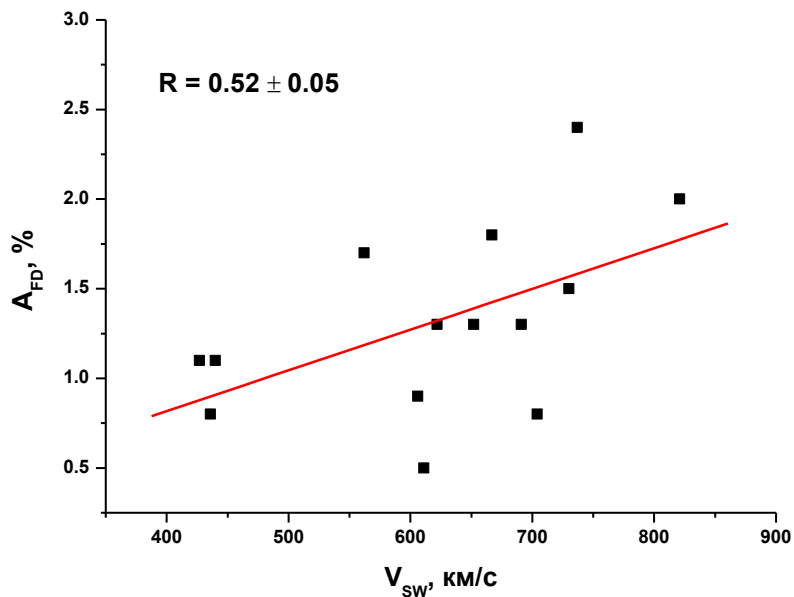
Событие 8 сентября 2017 г.

6 сентября 2017 г. произошла вспышка X9.3/2B, координаты S08W33, время максимума 12:02 UT, продолжительность 17 минут. Вспышка сопровождалась выбросом корональной массы ($V=1100-1200$ 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 выброса корональной массы, скорость солнечного ветра резко увеличилась до 847 км/с, усилились флуктуации южной компоненты ММП.



Падение в пятом диапазоне углов составило $1.18 \pm 0.14\%$.

Корреляционные зависимости амплитуды падения ФП по данным МГ УРАГАН с параметрами гелиосферных и геомагнитных возмущений



Заключение

- За период с 2007 по 2019 гг. отобраны 14 ФП, вызванных мощными солнечными вспышками X-класса.
- Подробно проанализированы события 8 марта 2012 г. и 8 сентября 2017 г., вызванные вспышками X-класса и сопровождавшиеся максимальным падением значения Dst_{min} . Следует отметить, что ФП 8 марта 2012 года было более мощным по сравнению с 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 ФП A_{FD} и скоростью солнечного ветра V составил $R = 0.52 \pm 0.05$, со значением вектора магнитной индукции $B - R = 0.40 \pm 0.01$, с индексом геомагнитной активности $D_{st} - R = -0.55 \pm 0.04$.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 17-17-01215 «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа».