

УДК 524.1-352,539-12

ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ В ШЕСТИ ПОСЛЕДНИХ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2019 г. А. А. Мелкумян^{1, *}, А. В. Белов², М. А. Абунина², А. А. Абунин²,
Е. А. Ерошенко², В. А. Оленева², В. Г. Янке²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова, Москва, Россия

*E-mail: amelkumyan6@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

В данной работе мы сравниваем параметры форбуш-понижений (ФП) — величину, скорость понижения, анизотропию, продолжительность основной фазы — в солнечных циклах с 19-го по 24-й, а также в максимумах циклов 23 и 24 и минимуме между этими циклами. База данных форбуш-эффектов и межпланетных неоднородностей, созданная и поддерживаемая в ИЗМИРАН, дает возможность использовать статистические методы анализа данных. Полученные результаты показывают, что связь с солнечной цикличностью проявляется для всех параметров ФП; ФП в максимуме цикла 23 вызваны, в основном, межпланетными неоднородностями, связанными с корональными выбросами массы, а ФП в минимуме между циклами 23 и 24 — высокоскоростными потоками из корональных дыр.

DOI: 10.1134/S0367676519050259

ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-понижением (ФП) называют изменение плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных неоднородностях солнечного ветра [1–4]. ФП могут быть рекуррентные, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр (Coronal Holes — CHs), или спорадические, вызванные межпланетными неоднородностями (Interplanetary Coronal Mass Ejections — ICMEs), связанными с корональными выбросами массы (Coronal Mass Ejections — CMEs). Как правило, во время ФП интенсивность КЛ относительно быстро убывает, а за понижением следует более медленное восстановление (в течение нескольких дней). В настоящей работе мы исследовали изменение ФП в течение длительного времени — с 1957 по 2015 г. Результаты исследований количества и величины ФП на разных интервалах этого периода представлены во многих работах [например, 4–6]. В работе [4] проводилось сравнение количества ФП разной величины (больше 3% и больше 5%) в солнечных циклах 19–23. В частности, было получено, что, хотя максимальное число солнечных пятен в 20 и 23-м циклах примерно одинаково, количество ФП в этих циклах отличается

более чем в 2 раза, причем большие ФП в 23-м цикле появляются чаще, чем в любом другом цикле исследуемого периода. Особый интерес вызывает сравнение количества и величины ФП для различных фаз солнечной активности в двух последних солнечных циклах [7, 8]. Так, в работе [7] было показано, что 31% событий в 23-м цикле и только 17% событий в 24-м цикле имели амплитуду больше 3%. В настоящей работе представлены результаты исследования параметров ФП в солнечных циклах 19–24.

ДАнные О ФП И МЕТОДЫ

Мы использовали параметры ФП из базы данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>, созданной и поддерживаемой сотрудниками ИЗМИРАН. За величину ФП (A_F) принималось максимальное значение вариации плотности КЛ, вычисленной методом глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов для частиц с жесткостью 10 ГВ [9]. В качестве параметров ФП использовались также максимальные (за время события) значения модуля почасового уменьшения плотности КЛ (скорость пони-

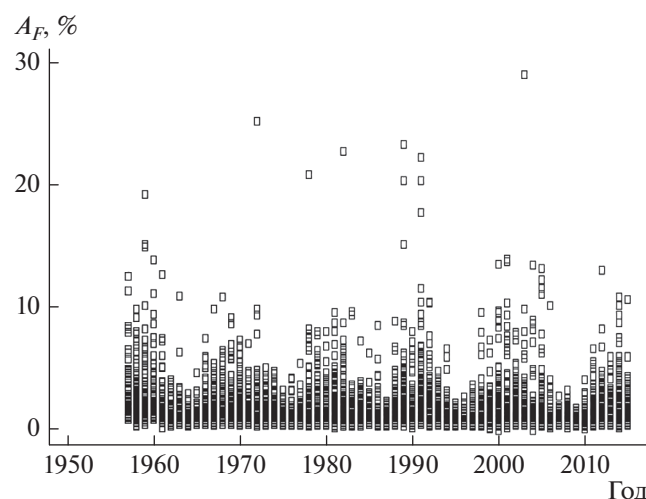


Рис. 1. Величина форбуш-понижений с привязкой по годам для всех событий, 1957–2015 гг. (7021 событие).

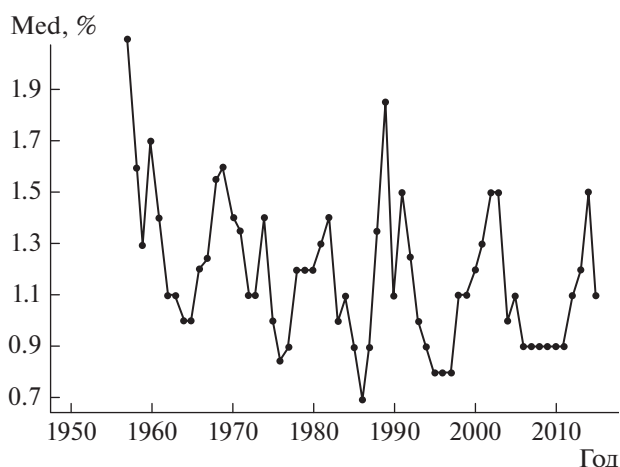


Рис. 2. Ежегодные значения медианы распределения величины форбуш-понижений, 1957–2015 гг.

жения — $|D_{\min}|$) и экваториальной составляющей анизотропии КЛ ($A_{\text{ху}_{\max}}$). Кроме того, использовались параметры, характеризующие временное развитие ФП, а именно, интервалы времени между началом возмущения и максимальным значением: вариации плотности КЛ (продолжительность основной фазы ФП — T_{\min}) и модуля почасового уменьшения плотности КЛ ($T_{D_{\min}}$). Мы рассматривали две группы событий, выбранные из базы данных за период времени 1957–2015 гг.: все ФП (группа Full, 7021 событие) и изолированные, то есть, вызванные только одним источником, ФП (группа Sample, 4692 события). Внутри каждой группы выбирались события в разных солнечных циклах (подгруппы SC 19, ..., SC 24), максимумах (Max 23 и Max 24) и последнем минимуме (Min 23–24) солнечной активности. Большое количество событий (данные приведены в таблице) позволило применять статистические методы анализа и обработки данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны все ФП с 1957 по 2015 г. (7021 событие) с привязкой по годам, а на рис. 2 — ежегодные значения медианы распределения величины ФП за тот же период. На обоих рисунках проявляется связь величины ФП с изменениями солнечной активности. Из рис. 1 следует, что наибольшая изменчивость вариаций КЛ наблюдается в фазах максимума солнечной активности, видны резкие выбросы величины ФП, наблюдавшиеся в эти годы. Особенно интересна эта информация для 19-го цикла, когда еще не было наблюдений СМЕs и данные по солнечному ветру отрывочны и недостаточно надежны, но ФП большой величины уверенно свидетельствуют о

наличии мощных ICMEs. На рис. 2 видно, что медианные значения величины ФП в 1.5–2 раза выше в годы высокой солнечной активности, чем при низкой активности, причем самое большое значение отмечается в максимуме 19-го цикла (2.1%). Кроме того, из рис. 2 видно, что в последнем минимуме величина ФП упала ниже (0.9%), чем во время других минимумов, и это падение держалось дольше. Возможно ФП во время этого минимума вызваны, главным образом, высокоскоростными потоками из корональных дыр [10], и/или пониженное значение величины ФП — следствие уменьшения межпланетного магнитного поля, вызванного аномальным расширением СМЕs [11].

В табл. 1 также представлены средние значения пяти параметров ФП для шести солнечных циклов, двух последних максимумов и минимума, а также рекуррентных (группа СН) и спорадических (группа СМЕ) ФП (данные по двум последним группам взяты из работы [10]). Циклы 19 и 24 представлены не полностью, так как исследуемый период начинается с 1957-го и заканчивается 2015-м годом. Рассчитанное стандартное отклонение параметров в таблице не представлено, но учитывалось при интерпретации данных. Для полных циклов, представленных в таблице, самое большое количество ФП наблюдалось в цикле 23 (1430), самое маленькое — в цикле 20 (1222). Количество ФП в максимумах циклов 23 (513) и 24 (511) больше, чем в минимуме между циклами (425). Полученные результаты согласуются с работами [4, 7]. Результаты, представленные в таблице, показывают, что среднее значение длительности основной фазы ФП значительно меньше в максимумах циклов 23 (16.7 ч) и 24 (13.6 ч), чем в минимуме между циклами (21.2 ч). При этом длительность ФП в минимуме практически совпада-

Таблица 1. Средние значения параметров форбуш-понижений на разных фазах солнечной активности (1957–2015 гг.) и для событий, связанных с СН и СМЕ (1997–2014гг.)

Интервал солнечной активности	Количество ФП		Средние значения параметров				
	Группа Full	Группа Sample	A_F , %	$ D_{min} $, % ч ⁻¹	$A_{\mu max}$, %	T_{min} , ч	$T_{D_{min}}$, ч
SC 19	954	594	2.28	0.53	1.44	18.4	16.2
SC 20	1222	899	1.93	0.35	1.32	21.0	14.9
SC 21	1321	843	1.94	0.31	1.26	17.5	14.4
SC 22	1269	775	2.05	0.34	1.24	18.0	13.9
SC 23	1430	946	1.95	0.32	1.24	18.7	14.9
SC 24	825	635	1.70	0.33	1.21	16.0	13.2
Max 23	513	341	2.41	0.35	1.49	16.7	14.5
Min 23–24	425	370	1.44	0.26	0.95	21.2	15.7
Max 24	511	372	1.96	0.38	1.34	13.9	14.7
Рекуррентные (СН) и спорадические (СМЕ) форбуш-понижения							
СН	–	350	1.15	0.26	1.02	21.8	16.9
СМЕ	–	207	2.14	0.42	1.67	16.1	9.5

ет со значением для рекуррентных ФП (21.8 ч), а в максимуме цикла 23 – для спорадических ФП (16.1 ч). В максимуме цикла 23 величина ФП (2.41%) и скорость понижения (0.35%/ч) значимо больше, чем в последнем минимуме (соответственно, 1.96% и 0.26%/ч), причем скорость понижения в минимуме равна скорости понижения для группы СН. Таким образом, понижение плотности КЛ в событиях максимума цикла 23 и группы СМЕ развивается быстрее, и минимум ФП, более глубокий, достигается раньше, чем в событиях последнего минимума и группы СН. Что касается анизотропии КЛ, то наблюдается постепенное уменьшение средней анизотропии от 19-го цикла (1.44%) к 24-му (1.21%). Максимальное среднее значение анизотропии наблюдалось в максимуме цикла 23 (1.49%), минимальное – в последнем минимуме (0.95%). Полученные результаты подтверждают выдвинутую ранее гипотезу, что в последнем минимуме преобладают рекуррентные ФП, а в максимуме цикла 23 большая часть ФП имеет спорадический характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Связь с солнечной цикличностью проявляется для всех параметров ФП. В фазах максимума солнечной активности наблюдается наибольшая изменчивость и наибольшие медианные значения величины ФП. Анизотропия КЛ постепенно уменьшается от 19-го цикла к 24-му; в максимумах циклов 23 и 24 анизотропия значимо больше, чем в минимуме между циклами. Понижение плотности КЛ в максимумах циклов развивается быстрее и минимум ФП, более глубокий, достигается ран-

ше, чем при низкой солнечной активности. Параметры ФП в максимуме цикла 23 близки к параметрам ФП спорадических событий, в минимуме между циклами 23 и 24 – к параметрам рекуррентных событий.

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>, <http://www.nmdb.eu/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbush S.E.* // Phys. Rev. 1937. V. 51. P. 1108.
2. *Lockwood J.A.* // Space Sci. Rev. 1971. V. 12. P. 685.
3. *Iucci N., Parisi M., Storini M. et al.* // Nuovo Cimento C. 1979. V. 2. P. 1.
4. *Belov A.* // Proc. IAU Symp. 2009. V. 257. P. 119.
5. *Storini M., Massetti S., Antalova A.* // Proc. 25th ICRC. (Durban, 1997). V. 1. P. 409.
6. *Belov A.V., Buetikofer R., Eroshenko E.A. et al.* // Proc. 29th ICRC. (Pune, 2005). P. 375.
7. *Thakur N.* // AGU Fall Meeting Proc. 2015. P. SH23A-2428.
8. *Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A. et al.* // Sol. Phys. 2016. V. 291. P. 1025.
9. *Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke et al.* // Sol. Phys. 2018. V. 293. P. 68.
10. *Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др.* // Геомагн. и аэрон. 2018. Т. 58. С. 163; *Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A. et al.* // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. P. 154.
11. *Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S. et al.* // Proc. 14th IIES (Alexandria, 2015). P. 1.