

# Солнечные протонные события и Форбуш-эффекты с одними и теми же источниками

Белов А.В.1, Шлык Н.С.1, Абунина М.А.1, Белова Е.А. 1, Абунин А.А.1, Папаиоанну А.2

1- Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова Российской Академии наук (ИЗМИРАН), Калужское шоссе, 4, 108840 Moscow, Troitsk, Russia, 2 - Institute for Astronomy, Astrophysics, Space Applications and Remote Sensing (IAASARS), National Observatory of Athens, I. Metaxa & Vas. Pavlou St., 15236 Penteli, Greece

Исследуются характеристики Форбуш-эффектов (FD) и солнечных протонных событий (SEP), вызванных одним и тем же солнечным источником, а именно корональным выбросом массы (CME) и связанной с ним солнечной вспышкой. Был выбран диапазон гелиодолгот (E5-W35), в котором большинство солнечных событий приводит как к FD, так и к SEP-событию на Земле. SEP для разных энергий ( $E > 10$  МэВ,  $E > 100$  МэВ) и с разными порогами потоков, а также GLE рассматривались независимо. Полученные результаты сравнивались с контрольной группой событий, имевших солнечные источники в той же долготной зоне, но не приводивших к SEP. Показано, что ускорительная и модулирующая эффективности таких солнечных явлений взаимосвязаны, что, в основном, объясняется высокими скоростями родительских CME.

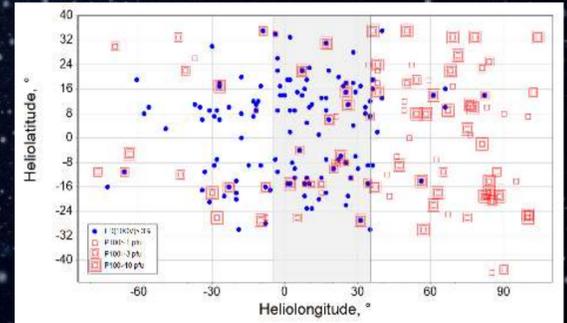
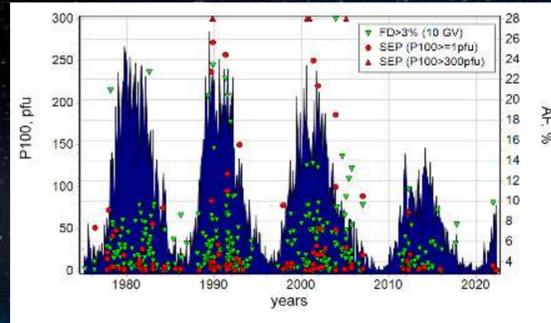


Рис. 1. Распределение по времени и величине больших Форбуш-эффектов (>3%) и протонных событий с максимальным потоком >1 и >300 pfu для протонов с энергиями >100 MeV на фоне количества солнечных пятен

Рис.2. Распределение долгот солнечных источников, связанных с большими ФЭ (>3%) и протонными возрастаниями (для частиц с энергиями >100 MeV) с различными максимальными потоками

	GLE-group	P100-group (P100 ≥ 0.5 pfu)	P10-group (P10 > 1 pfu)	Weak-group (P10 < 1 pfu, P100 не зарегистрировано)	NoSEP-group	
	10 событий	29 событий	39 событий	62 события	9641 события	
Xm, Br>2°	Mean	(2.8 ± 0.5) · 10 <sup>-4</sup>	(1.4 ± 0.2) · 10 <sup>-4</sup>	(9.1 ± 1.8) · 10 <sup>-5</sup>	(4.9 ± 0.8) · 10 <sup>-5</sup>	(5.4 ± 0.1) · 10 <sup>-6</sup>
	Max	5.7 · 10 <sup>-4</sup>	5.0 · 10 <sup>-4</sup>	3.2 · 10 <sup>-4</sup>	4.70 · 10 <sup>-4</sup>	4.70 · 10 <sup>-4</sup>
	Min	1.1 · 10 <sup>-4</sup>	1.9 · 10 <sup>-4</sup>	1.2 · 10 <sup>-4</sup>	2.2 · 10 <sup>-4</sup>	1.0 · 10 <sup>-4</sup>
dt, min	Mean	87.4 ± 25	104.1 ± 17	66.5 ± 8.7	67.3 ± 8.9	25.8 ± 0.3
	Max	240	328	202	318	941
	Min	20	10	1	7	0
dt1, min	Mean	38.7 ± 15	35.4 ± 6.6	23 ± 3.8	17.4 ± 2.68	8.7 ± 0.2
	Max	173	146	116	109	604
	Min	11	3	0	0	0
P10, pfu	Mean	5422 ± 3043	421.14 ± 194	81.45 ± 34.58	0.39 ± 0.03	—
	Max	31700	4500	1300	0.95	—
	Min	55	1.1	1	0.1	—
dP10, min	Mean	10.7 ± 2.8	11.7 ± 1.4	13.90 ± 1.50	9.02 ± 0.8	—
	Max	32	36	39	37	—
	Min	2	2	3	2	—
P100, pfu	Mean	156.3 ± 63.7	1.93 ± 0.33	0.22 ± 0.02	0.01	—
	Max	623	7.33	0.5	0.08	—
	Min	7.48	0.5	0.1	0	—
θ , °	Mean	16.5 ± 3.4	14.2 ± 1.5	12.3 ± 1.2	16.9 ± 1.0	15.5 ± 0.1
	Max	35	38	29	37	67
	Min	2	0	0	0	0
φ, °	Mean	19.9 ± 3.2	16.3 ± 2	18.5 ± 1.8	15.9 ± 1.5	15.1 ± 0
	Max	35	34	34	35	35
	Min	2	-4	-4	-4	-4
V <sub>св</sub> , km/s	Mean	1795 ± 214 (6)	1566 ± 157 (12)	1169 ± 114 (19)	743 ± 87 (14)	566 ± 24 (108)
	Max	2547	2861	2411	1271	1376
	Min	938	785	558	224	136
Xdt	Mean	156 ± 59	50.5 ± 16	16.6 ± 4	10.2 ± 4	0.6 ± 0.04
	Max	657.4	393.8	106	251	218
	Min	12.1	1.9	0.02	0.03	0
V	Mean	1.29 ± 0.16	1.71 ± 0.14	1.92 ± 0.13	1.14 ± 0.07	—
	Max	2.24	3.17	4	1.98	—
	Min	0.81	0.04	0.33	0	—

**GLE-group 10/9**

**P100-group 29/20**

**P10-group 39/26**

**Weak-group 62/55**

**Control group 9641/91**

Из выделенных вспышечных событий мы выбрали те события, которые стали причиной Форбуш-эффектов, зарегистрированных на Земле сетью НМ (для частиц жесткостью 10 ГВ). Мы отобрали только те события, в которых есть уверенная идентификация с солнечным источником!

	GLE-group	P100-group	P10-group	Weak-group	Control group (No SEP)	
Ar, %	Mean	9.77 ± 1.73	4.29 ± 0.67	5.29 ± 0.71	3.16 ± 0.29	1.84 ± 0.18
	Max	20.4	9.8	14.4	9.6	9.4
	Min	4.7	0.9	0.8	0.4	0.3
Asymax, %	Mean	3.89 ± 0.44	2.34 ± 0.20	2.16 ± 0.20	1.73 ± 0.08	1.53 ± 0.07
	Max	5.61	4.17	5.06	4.13	4.32
	Min	1.44	0.9	0.93	0.69	0.62
Kpmax	Mean	7.85 ± 0.43	6.57 ± 0.35	6.53 ± 0.35	5.39 ± 0.22	4.78 ± 0.17
	Max	9	9	9	8+	8+
	Min	5	3-	3	2	1
Apmax	Mean	235.22 ± 39.61	136.00 ± 22.03	136.58 ± 17.86	76.45 ± 7.76	58.00 ± 5.26
	Max	400	400	300	236	236
	Min	48	12	15	7	4
Dstmin, nT	Mean	-220.3 ± 37.5	-114.2 ± 19.1	-119.6 ± 17.1	-78.5 ± 8.0	-57.8 ± 4.8
	Max	-383	-307	-387	-255	-235
	Min	-88	-8	-11	-1	3
Bmax, nT	Mean	35.13 ± 6.33	22.82 ± 3.11	24.63 ± 2.08	18.68 ± 1.21	14.21 ± 0.66
	Max	62	50.1	48.2	39.5	34.1
	Min	17.5	11.1	7.9	6	5.2
Vmax, km/s	Mean	1036.9 ± 151.3	698.9 ± 48.9	644.5 ± 32.1	562.9 ± 16.0	492.9 ± 13.3
	Max	1876	1024	1053	840	922
	Min	669	436	410	367	300

Таблица 2. Средние, максимальные и минимальные значения основных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для исследуемых ФЭ

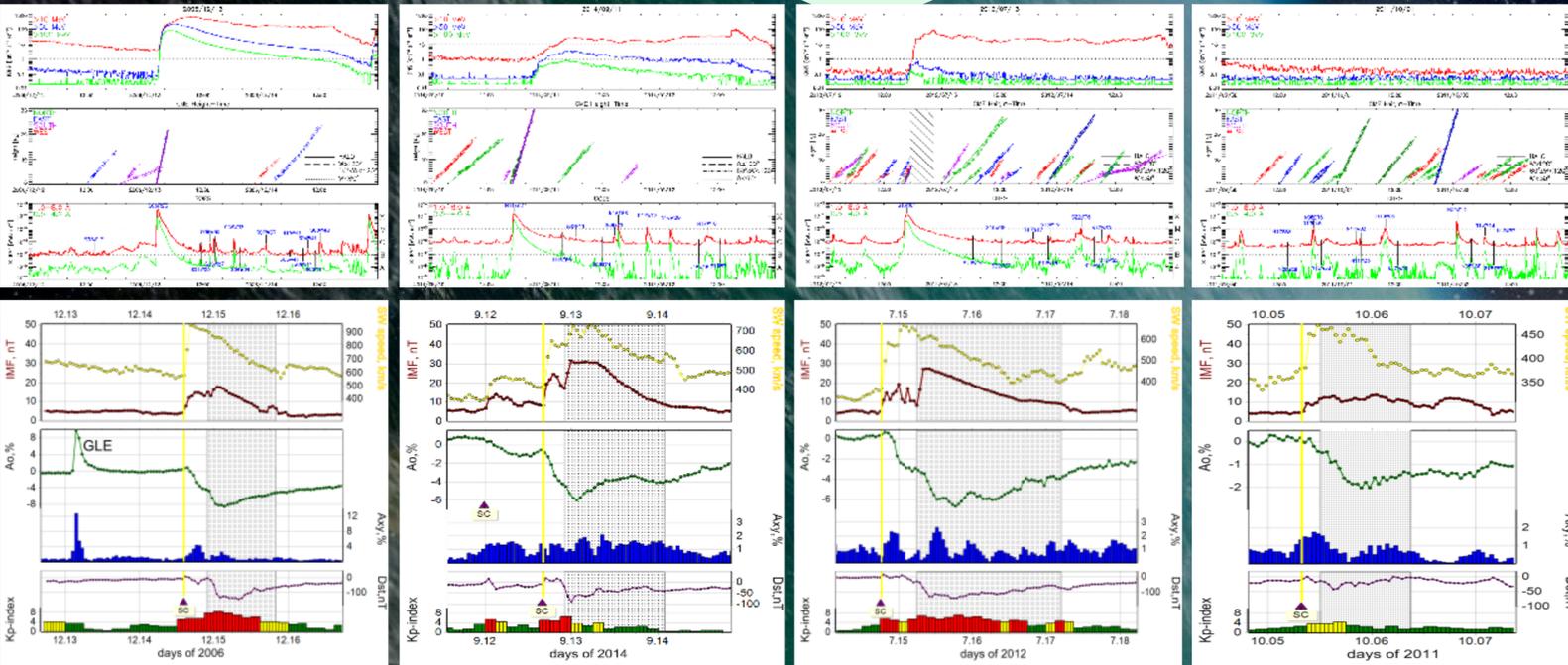


Рис. 3. Пример события из GLE-group 14-15 декабря 2006 года. Рис. 4. Пример события из P100-group 12-14 сентября 2014 года. Рис. 5. Пример события из P10-group 14-17 июля 2012 года. Рис. 6. Пример события из Control group 5-7 октября 2011 года

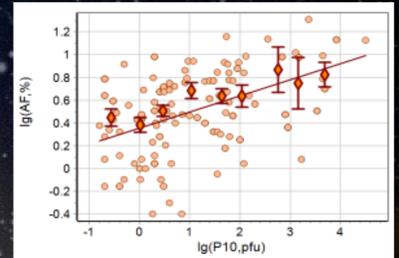


Рис. 7. Связь амплитуды ФЭ (AF) и максимального значения потока протонов с энергией >10 МэВ (P10) в событиях с одним и тем же солнечным источником

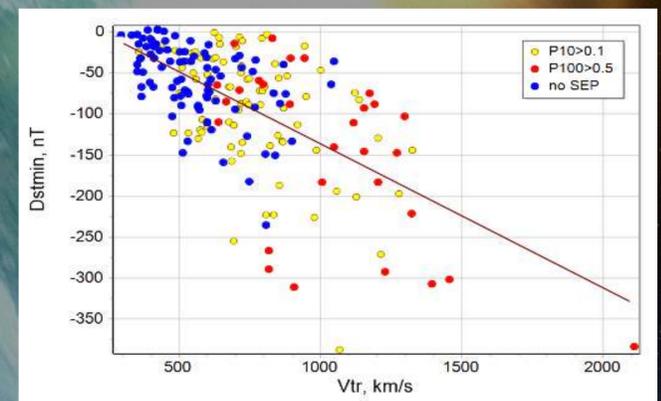
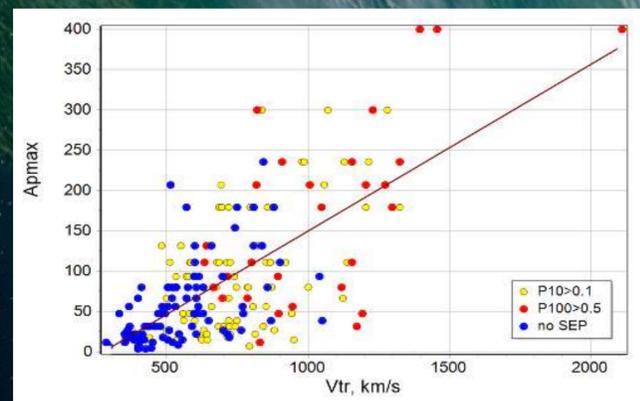
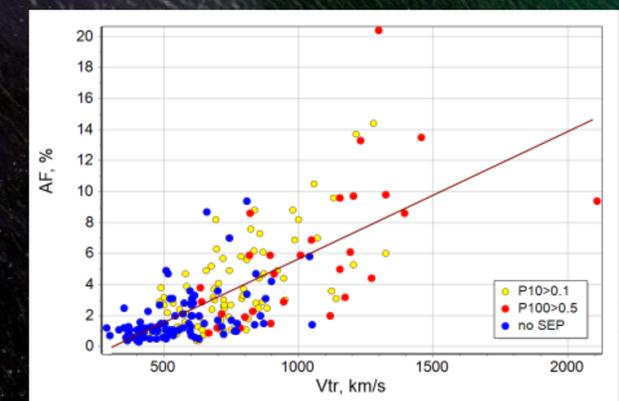


Рис. 8. Связь амплитуды Форбуш-Эффекта с транзитной скоростью соответствующего ICME

Рис. 9. Связь максимального значения Ар-индекса с транзитной скоростью соответствующего ICME

Рис. 10. Связь минимального значения Dst-индекса с транзитной скоростью соответствующего ICME

Параметр	GLE-group	P100-group	P10-group	Weak-group	Control group (No SEP)
Probability, %					
AF < 3%	0	50	30.5	56	82.5
3 ≤ AF < 10%	67	50	58	44	17.5
AF ≥ 10%	33	0	11.5	0	0
Kpmax < 5-	0	10	19.5	32.5	45
Kpmax = 5-...-6+	11	40	19	34.5	41
Kpmax = 7-...-8+	56	40	50	33	14
Kpmax = 9-...-9	33	10	11.5	0	0

Таблица 3. Вероятность регистрации (в %) различных значений амплитуды ФЭ и максимальных геомагнитных индексов после регистрации вспышечных событий с определенными характеристиками

В этой работе получено, что ускоряющая и модулирующая эффективности таких движущихся солнечных явлений хорошо коррелируют. Показано, что имеется довольно тесная связь амплитуды ФЭ и максимального значения потока протонов с энергией >10 МэВ, а также выявлена тесная связь между основными характеристиками вариаций КЛ и ГА с транзитной скоростью соответствующих межпланетных возмущений. Показано, что корональные выбросы массы (CME), следующие за SEP-событием, имеют очень высокую вероятность создания крупного ФЭ на орбите Земли и дальнейшего возникновения геомагнитной бури. При этом можно утверждать, что чем больше зарегистрированный максимальный поток частиц в SEP-событии и скорость соответствующего CME, тем выше эта вероятность. В результате проведенного анализа был получен прогностический инструмент для определения возможной величины ФЭ и изменения уровня геомагнитной активности, в основе которого данные по уже начавшемуся SEP-событию (координаты вспышки, максимальный поток частиц и начальная скорость соответствующего CME).