ОСОБЕННОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В МОДЕЛИ КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ЛОВУШЕК

Шабалин А.Н.¹, Чариков Ю.Е.¹, Шувалова В.И.²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

SPECIFIC FEATURES OF X-RAY RADIATION OF SOLAR FLARES IN THE COLLAPSING TRAP MODEL

Shabalin A.N.¹, Charikov Yu.E.¹, Shuvalova V.I.²

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

²The Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

Changes in the magnetic field in the magnetic bundle lead to synchronous changes in the plasma density, loop cross-section, and loop length. As the magnetic field in the rope increases, the plasma density and hard X-ray flux of accelerated electrons from the looptop increase, and the geometric dimensions of the emitting region decrease. Thus, such dynamics of the magnetic fields during a flare should lead to a negative correlation between coronal HXR source volume and the HXR flux. To test this hypothesis, we analyzed the events, the coronal source of which is clearly distinguishable in the RHESSI images.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-341-344

Влияние быстрых магнитозвуковых волн на модуляцию распространения ускоренных электронов в магнитной ловушке ранее рассматривалось в работах [2, 4]. При изменении индукции магнитного поля в корональной части петли меняется концентрация плазмы в магнитной трубке, сечение и длина магнитной петли. Следовательно, при увеличении магнитного поля увеличивается концентрация плазмы и растёт поток жесткого рентгеновского (ЖР) излучения ускоренных электронов из источника в вершине петли. Вместе с этим происходит уменьшение геометрических размеров излучающей области. Таким образом, в случае подобной динамики магнитных полей во время вспышки разумно ожидать, что между геометрическими размерами ЖР источников в короне и потоком ЖР излучения из данных областей возникнет отрицательная корреляция. Для проверки данной гипотезы были проанализированы вспышечные события, корональный источник которых четко различим на изображениях RHESSI [3] в течение достаточно длительного времени. Анализировались изображения с экспозицией 4 с методом Clean. Для вычисления площади источника использовались контурные линии 50% потока. Поток ЖР излучения в каналах 6–12, 12–25, 25–50, 50–100, 18–36 кэВ сравнивался с площадью соответствующих источников. Результаты анализа представлены в таблице 1. В третьей колонке даны значения коэффициента корреляции с уровнем значимости 0.05. Обозначения в

скобках r95, r99, w95 означают, что достоверность обнаруженных периодов соответствует уровням красного шума 95 и 99%, белого шума 95%. Одним цветом помечены близкие периоды, обнаруженные как в вариациях площади источника, так и потоке ЖР излучения. Сокращения: GWS – Global Wavelet Spectrum, FFT – Fast Fourier Transform. Методика обработки данных приведена в работе [1].

Таблица 1.

	Канал, кэВ	Кэфф. корреляции	Периоды Площадь ист-ника GWS	Периоды Площадь источника FFT	Периоды (поток ЖР излучения) GWS	Периоды (поток ЖР излучения) FFT
Вспышка 10-09-2017 T15:35	6-12	-	9.8 (w95)	8.1, 8.7, 10.6, 17.5, 21.1, 28.4, 29.2, 30.1, 36.6 (r95), 41 (r99)	16, 27.8	9, 16, 27, 33
	12-25	-0,40	13.9 (r95, w95)	8.8, 18 (r95)	16.5 (r99, w95), 33 (r95)	29.3 (r99)
	25-50	-0,53	27.8 (r95, w95)	8, 16 (r99), 14, 25-27, 33, 35.3, 40.2 (r95)	39.3 (r99, w95)	44.5 (r99), 29.2, 39.4 (r95)
	50-100	-0,15	16.5 (r95, w95), 33.6 (r95)	16.8 (r99), 32 (r95)	27.8 (r95, w95)	24.4 (r99)
Вспышка 15-05-2013 T01:20	12-25	-0.54	49.1 (r99, w95)	42, 45.7 (r99), 50 (r95)	70 (w95)	-
Вспышка 02-03-2015 T15:16	12-25	-0.29	19.7 (r99, w95)	20.5 (r99), 8.3, 8.7, 11.6, 24.7 (r95)	33 (w95)	-
	25-50	-	-	-	33 (r95, w95)	-
Вспышка 16-10-2014	12-25	-0,73	9.8 (w95)	9.8 (r95)	33 (w95)	32 (r95)

T13:01						
	25-50	+0,37	-	-	46.8 (r95, w95)	51.2 (r99)
Вспышка 04-08-2002 T09:30	12-25	-	-	8.1, 9.4, 10.4, 15.7 (r95)	11.7 (w95)	12.5 (r95)
	25-50	-0,71	19.7 (w95)	20.5 (r95)	-	-
Вспышка 13-05-2013 T15:51	12-25	-0,72	19.7 (r99, w95), 47 (r95, w95)	8.8, 19.3, 25, 49 (r95)	47 (r99, w95)	43 (r99) 20.5, 30, 51.2 (r95)
Вспышка 28-08-2002 T18:54	12-25	-	13.9 (r99, w95)	13.8 (r95), 14.4 (r99)	33 (r99, w95)	33 (r99), 37 (r95)
	25-50	-	19.7 (r95, w95)	-	33 (r99, w95)	-
Вспышка 22-10-2003 T20:00	12-25	-0,5	14 (r95, w95), 39 (r95)	27, 37 (r95)	14, 23 (r95, w95)	8.5 (r95)
	25-50	+0,3	9.8 (w95, r95), 23.4 (r95)	9.4, 9.8 (r99), 10.3, 25 (r95)	9.8 (w95), 23 (r95)	9.5, 25 (r95)
Вспышка 06-08-2012 T04:35	18-36	-0,47	-	-	-	-

Результаты анализа

Согласно таблице 1 в восьми из девяти проанализированных событий наблюдалась отрицательная корреляция между геометрическими размерами ЖР источников в короне и потоком ЖР излучения из данных областей хотя бы в одном канале энергии. В двух событиях в разных каналах отличался знак корреляции, отрицательный в диапазоне 12–25 кэВ и положительный в 25–50 кэВ. Сходные по величине периоды в вариациях потока ЖР излучения и площадей источников наблюдались в четырех

событиях из девяти. В остальных событиях либо периодичность в данных не была обнаружена (в потоке и/или площади), либо обнаруженные периоды в потоках и площадях существенно не совпадали. По результатам анализа можно утверждать, что, в рамках представленной выборки событий, отрицательная корреляция между потоком и площадью источника наблюдается относительно часто. Однако, существуют исключения, которые могут быть связаны как с ошибочностью гипотезы в конкретном случае, так и с учетом сложности реальной конфигурации большого числа магнитных структур. “Возгорание” магнитных структур вспышечной аркады происходит не одномоментно, фазы колебаний смешиваются, в результате чего существенный вклад в яркость коронального источника может дать одиночная магнитная структура, активная в данный момент времени, а вклад в площадь источника могут дать магнитные петли, инжекция ускоренных электронов в которые произошла ранее. Косвенную оценку такого “смещения” можно получить при помощи моделирования набора последовательно коллапсирующих магнитных структур. Подобное моделирование было выполнено в работе [4]. Основной вклад в объем (площадь) наблюдаемого источника дает сечение магнитных петель, вариации которого обратно пропорциональны изменению магнитного поля. Вариация магнитного поля в одиночной структуре задавалась на уровне ~6-10% в вершине (после первого сильного “коллапса”). При усреднении по множеству подобных структур, вовлечение которых во вспышку производилось последовательно с интервалом 1с, результирующие вариации магнитного поля после первого коллапса снижались до 2-3%. Изменения площади источника с точностью на уровне 1-5% является сложной и неоднозначной наблюдательной задачей.

Литература

1. Globina V.I. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. Vol. 59, № 7. P. 890–897.
2. Filatov L. V., Melnikov V.F., Gorbikov S.P. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53, № 8. P. 1007–1012.
3. Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al. // *Solar Physics*. 2002. Vol. 210, № 1/2. P. 3–32.
4. Shabalin A.N., Charikov Y.E., Globina V.I. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. Vol. 60, № 8.