ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ И ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 10 СЕНТЯБРЯ 2017 Г. ПО ДАННЫМ RHESSI, SDO

Овчинникова Е.П.¹, Шабалин А.Н.¹, Чариков Ю.Е.¹, Опарин И.Д.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ELECTRON BEAM AND PLASMA AT THE LOOPTOP OF SOLAR FLARE OF SEPTEMBER 10, 2017.

Ovchinnikova E.P.¹, Shabalin A.N.¹, Charikov Yu.E.¹, Oparin I.D.²

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

The solar flare of 2017-09-10 15:52:00UT (GOES X8.2) is investigated. This flare was localized on the west limb of the Sun, lower part of magnetic loops was occulted for observations. The RHESSI spectrometer registered a single coronal source of hard X-rays. GOES time profile has long decreasing form, soft X-ray flux exceeded the flux from C-class flare during 12 hours after peak time. The spectrum of nonthermal bremsstrahlung X-ray extends from energies 7 keV to 200 keV with break energy of 50 keV, spectral indices of the broken power law spectrum at the maximum of HXR flux are 7 and 3 respectively. The spectra of accelerated electrons were reconstructed by Tikhonov's regularization method, and by forward-fitting of a thin target model. The slopes of energy spectra of accelerated electrons obtained by these methods are coincides. The size of a soft X-ray source of ~ 6 arc seconds was estimated by RHESSI images. Using the values of the emission measure and the volume of the emitting source, a plasma density was estimated $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ and plasma temperature was obtained 40 MK. The delay spectrum for the HXR time series of different energies has a decreasing shape that is atypical for the HXR looptop source. The decreasing shape of time delay spectrum does not correspond to a trap plus precipitation model. Therefore, the peculiar magnetic field, the isotropy in the distribution of accelerated electrons, and also the presence of turbulence are expected.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-319-322

В данной работе анализируется мощная лимбовая вспышка SOL2017-09-10T15:52, GOES класс X8.2. Интерес к изучению данного события вызван тем, что спектрометром RHESSI [3] был зарегистрирован единственный корональный локальный источник жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ), а возможные источники в основаниях скрыты лимбом. В ультрафиолетовом излучении SDO AIA [2] на временах порядка часов после максимума вспышки наблюдается последовательность горячих петель, образующих аркаду. В мягком рентгеновском излучении (1–8 Ангстрем) по данным GOES наблюдался длительный плавный спад,

значение потока превышало мощность событий класса C на протяжении 12 часов после максимума вспышки (рис. 1).

Рис. 1. Временной профиль вспышки SOL2017-09-10 по данным GOES.

Также в период длительного спада по данным RHESSI наблюдались локализованные корональные источники рентгеновского излучения, что свидетельствует о дополнительных актах ускорения частиц, продолжающихся в последующие часы после максимума вспышки. В момент времени 19:13:00UT (рис. 2) наблюдается разделение источников, как в жестком, так и в мягком рентгеновском диапазонах. Источники локализируются в вершинах петель, представляющих аркаду и регистрируемых в ультрафиолетовом диапазоне ($171\text{\AA}$). Такая картина, скорее всего, свидетельствует об ускорении частиц в разных петлях аркады в различные моменты времени. Источники в мягком и жестком рентгеновском интервале энергий, смещаются в короне по направлению от лимба Солнца. За первые 20 минут источник сместился на ≈ 20 угловых секунд, максимальная скорость смещения составила ≈ 30 км/с (рис. 3). В целом за 12 часов источник переместился на 100 угловых секунд, на длительной фазе события скорость смещения не менялась и составляла ≈ 2 км/с.

В результате обработки данных были получены энергетические спектры жесткого рентгеновского излучения. Энергетическое распределение рассматривалось в виде двухстепенной функции, для фазы макси-

мума показатели спектра составили $\delta_1 \approx 7$, $\delta_2 \approx 3$, с точкой излома ≈ 50 кэВ. Кроме того, были восстановлены спектры ускоренных электронов методом регуляризации Тихонова [4], а также методом прямого фитирования в двухстепенных моделях тонкой и толстой мишеней. Метод регуляризации Тихонова не требует предположения о форме искомого электронного спектра. Поэтому, полученные с помощью этого метода результаты будем считать образцом для дальнейшего выбора модели обработки спектров.

Рис. 2. Изображение ультрафиолетового излучения 171Å (AIA/SDO). Поверх нанесены контурные линии ЖРИ (7–12, 25–70 кэВ, RHESSI). Момент времени 19:13:00UT (соответствует трем часам после максимума вспышки)

Жесткости энергетических спектров ускоренных электронов, определенные методами регуляризации и прямого фитирования в модели тонкой мишени, совпадают, но не повторяют результаты толстой мишени. Это можно интерпретировать как не применимость модели толстой мишени для рассматриваемого источника.

Помимо спектров были построены изображения источников в мягком рентгеновском диапазоне, получена оценка размера источника жесткого рентгеновского излучения ~ 6 угловых секунд (7–12 кэВ). Используя

значения меры эмиссии и объема излучающего источника, было рассчитано среднее значение концентрации плазмы $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и температуры 40МК.

Рис. 3. Слева: смещение положения SXR (7–12 кэВ) источника во времени.
Справа: скорость смещения источника во времени.

Спектр временных задержек имеет не характерный для вершины вид – спадающий с энергией, не соответствующий модели ловушки с высыпанием [1], что накладывает определенные условия на конфигурацию магнитного поля ($B_{\max}/B_{\min} \leq 7$), на анизотропию в распределении ускоренных электронов (требуется распределение, близкое к изотропному), на энергетический спектр электронов ($\delta_1 \leq 3$), а также указывает на наличие турбулентности.

Литература

1. Yu.E. Charikov et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, №7(55), С. 1000-1007.
2. J.R. Lemen, et al. // Solar Physics, 2012, № 1(275), С. 17-40.
3. Lin R.P. et al. // Solar Physics, 2002, № 1/2 (210), С. 3–32.
4. A.F. Verlan, B.S. Sizikov. Kiev, Naukova Dumka, 1986. С. 235-256.