

УДК 523.98

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВСПЫШЕК В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

И.Н. Шарькин, А.Б. Струминский, И.В. Зимовец

INVESTIGATION OF EVOLUTION OF POWERFUL IMPULSIVE SOLAR FLARES IN SPACE AND TIME

I.N. Sharykin, A.B. Struminkii, I.V. Zimovetz

Исследуется взаимосвязь поведения источников мягкого и жесткого рентгеновского излучения с эволюцией спектра нетепловых электронов в двух импульсных вспышках 1 января и 13 сентября 2005 г. В этих событиях балла X1.7 нагрев плазмы ускоренными электронами происходил около 10 мин в нескольких эпизодах, которые различались по месту и механизму выделения энергии. Вначале электроны преимущественно взаимодействовали в короне, формируя корональный источник жесткого и мягкого рентгеновского излучения. Далее наблюдалось несколько эпизодов ускорения электронов с более жестким спектром. Показано, что существенную роль в динамике излучения играл как корональный источник, так и петли, заполненные горячей плазмой в результате хромосферного испарения. В некоторые моменты времени наблюдаются всплески жесткого рентгеновского излучения, которые, однако, не приводят к адекватному росту интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Это могло быть обусловлено низкой кинетической мощностью пучка электронов с жестким спектром и большим низкоэнергетическим обрезанием.

A relationship between the behavior of SXR and HXR sources and the evolution of nonthermal electron spectra are studied in two impulsive flares of 2005 January 1 and September 13. In these events of GOES class X1.7 plasma heating by accelerated electrons took place during 10 minutes in several episodes, which differ by location and mechanism of energy release. In the beginning of impulsive phase electrons mostly interacted in corona, forming coronal source of SXR and HXR emission. Later several episodes of electron acceleration with harder spectrum were observed. It is shown that both the coronal sources and magnetic loops filled with the hot plasma after chromospheric evaporation played an important role in dynamics of the radiation. In some moments bursts of the HXR emission have been detected, which have not resulted in adequate increasing of SXR intensity. This might be caused by low kinetic energy of electron beam with hard spectrum and high low energy cutoff.

Введение

Предметом многолетних исследований является нагрев плазмы, излучающей мягкое рентгеновское (SXR) излучение, во время солнечных вспышек и его связь с динамикой нетепловых электронов, однако задача далека от своего окончательного решения. Согласно однопетлевой испарительной модели вспышки, ускорение частиц происходит в некоторой области над петлей; нетепловые электроны инжектируют в петлю, где распространяются без потерь. Электроны теряют энергию и излучают жесткий рентген (HXR) в хромосферных основаниях петли с концентрацией плазмы $>10^{12} \text{ см}^{-3}$ (толстая мишень, [Браун, 1971]). В результате резкого нагрева хромосферы электронами среда становится неустойчивой и происходит «хромосферное испарение» – нагретая плазма быстро заполняет петлю. Плазма охлаждается за счет излучения и теплопроводности, источник SXR-излучения обычно ассоциируется со вспышечной петлей, источник HXR-излучения – с ее основаниями.

С началом работы космических аппаратов (КА) YONKON и RHESSI стали возможны пространственно-разрешенные спектральные наблюдения рентгеновского излучения. Появились первые свидетельства того, что процесс энерговыделения нетепловых электронов затрагивает не только плотную часть атмосферы Солнца, но и корональные области. Например, в работах [Фельдман и др., 1994; Масуда и др., 1994] описываются соответственно источники теплового и нетеплового коронального излучения. А в работе [Лин и др., 2003] приводятся данные о новом типе коронального источника HXR-излучения в событии 23 июля 2002 г. Видно, что отклик корональной плазмы на взаимодействие

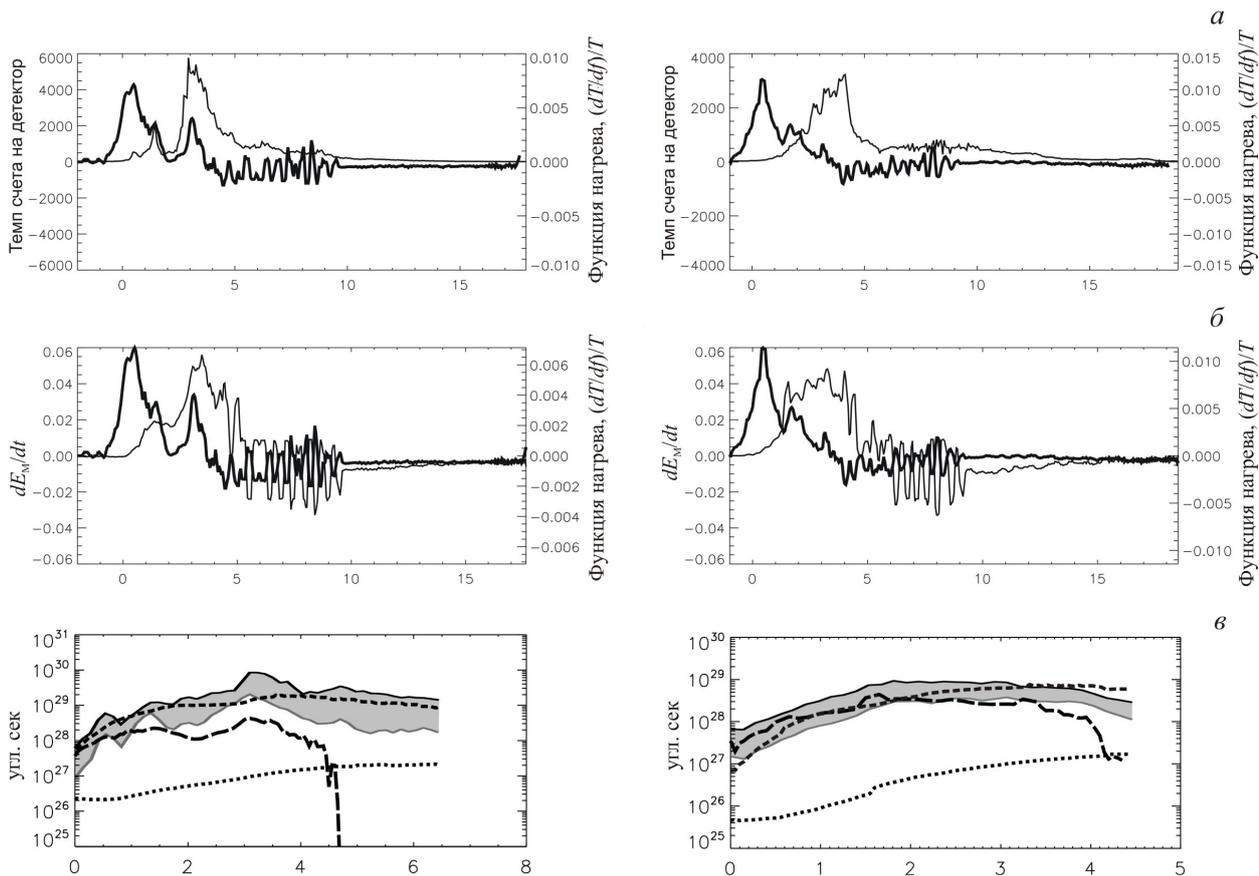
с нетепловыми электронами весьма разнообразен, поэтому существенный интерес представляют исследования относительного вклада различных источников рентгеновского излучения в интегральный поток излучения солнечной вспышки в зависимости от эволюции спектра нетепловых электронов и изменения параметров плазмы.

В работе анализируются мощные импульсные вспышки класса GOES X1.7, произошедшие 1 января и 13 сентября 2005 г. Целью нашей работы является объяснение на количественном уровне сходства и различия временных профилей SXR в этих событиях. Для достижения этой цели мы сравниваем временные профили различных характеристик теплового и нетеплового излучения, строим изображения источников; находим спектры нетепловых электронов и делаем оценки различных видов энергии в разные моменты событий, определяем параметры, необходимые для реализации теплового баланса во вспышечной области. При этом мы предполагаем, что основным источником нагрева плазмы в области вспышки являются нетепловые электроны, которые ускоряются длительное время с переменным спектром.

Анализ наблюдений

В работе использовались интенсивности SXR-излучения, измеренные КА GOES. Для анализа жесткого рентгеновского излучения использовались данные 1, 3–6, 8, 9-го передних сегментов детекторов RHESSI (2-й и 7-й ниже 25 кэВ вносят существенный шум) в диапазоне 3–300 кэВ. Магнитограммы диска Солнца были взяты по данным SOHO/MDI (Michelson Doppler Imager) со скважностью 1 мин.

Анализ потока рентгеновского излучения и функции нагрева $(dT/dt)/T$ (см. рисунок, а) в обоих



Временной профиль потока жесткого рентгеновского излучения в канале 25–50 кэВ (тонкая линия) и функции нагрева $(dT/dt)/T$ (толстая линия) (а). Временной профиль производной меры эмиссии по времени (тонкая линия) и функции нагрева $(dT/dt)/T$ (толстая линия) (б). Временной профиль производной по времени внутренней энергии плазмы (длинные штрихи), кинетической мощности нетепловых электронов (отмечено серой полосой для интервала низкоэнергетических границ 25–35 кэВ для 13 сентября и 20–30 кэВ для 1 января), потери за счет теплопроводности (короткие штрихи) и излучения (точки) (в). По оси X время в минутах после начала вспышки, для левого графика – 13.09.2005 г. в 23:17:00 UT, для правого – 01.01.2005 г. в 00:26:00 UT.

событиях свидетельствует о том, что интенсивность жесткого рентгеновского излучения не коррелирует по амплитуде с нагревом плазмы. Сравнивая функцию нагрева $(dT/dt)/T$ и производную меры эмиссии dE_M/dt (см. рисунок, в), можно судить о связи между потоком нетепловых электронов и динамикой хромосферного испарения, так как предполагается, что мера эмиссии может меняться только за счет изменения концентрации при фиксированном объеме. Показано, что нагрев плазмы во вспышечной области, происшедший в начале событий, не сопровождался ростом концентрации плазмы. Это может свидетельствовать о том, что энерговыделение нетепловых электронов происходило преимущественно в короне, а хромосферное испарение было несущественным либо не происходило.

Изображения рентгеновских источников строились с применением алгоритма CLEAN в каналах 6–12 кэВ и 25–50 кэВ и совмещались с магнитограммами SOHO. Для обоих событий было построено по четыре изображения, три из которых соответствовали пикам функции нагрева, а четвертое соответствовало фазе спада температуры. В событии 13 сентября первые 50 с наблюдались совпадающие между собой SXR- и HXR-источники излучения, располагавшиеся над нейтральной линией, с

характерной для короны концентрацией $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Исходя из этого, мы предполагаем, что HXR-излучение происходило либо в тонкой мишени, либо в промежуточной тонко-толстой мишени. В событии 1 января в течение всего времени четко разделялись парные источники HXR-излучения, а SXR-источник располагался между ними выше в короне. Слабый корональный источник HXR-излучения 1 января не наблюдался на фоне интенсивного излучения хромосферного источника.

Спектры рассчитывались в восьмисекундных интервалах во всей импульсной фазе в диапазоне энергий 3–300 кэВ с помощью пакета OSPEX и аппроксимировались методом наименьших квадратов в рамках модели толстой мишени с одноступенной функцией распределения нетепловых электронов и изотермическим тепловым излучением. Свободными параметрами в методе наименьших квадратов были показатель электронного спектра δ и величина интегрального потока нетепловых электронов. Низкоэнергетическая граница спектра электронов рассчитывалась по концентрации частиц в плазме, определенной из меры эмиссии в начале вспышек, и равнялась 25 кэВ 13 сентября и 20 кэВ 1 января. По результатам спектрального анализа построены временные профили эволюции интегрального потока

нетепловых электронов и их спектрального индекса, а также посчитаны потоки нетепловых электронов в отдельных интервалах энергий: 25–30, 40–45, 55–60 и 100–300 кэВ. Временные профили рассчитанной кинетической мощности нетепловых электронов, тепловой энергии плазмы, потерь за счет излучения и теплопроводности показаны на панели *в*. Из этих расчетов следует, что нетепловые электроны больше всего расходовали энергию на нагрев плазмы, причем тепловая энергия наиболее эффективно диссипировала в импульсной фазе за счет теплопроводности. Из условия энергетического баланса между тепловой и нетепловой энергией следует, что низкоэнергетическая граница должна варьировать в пределах 20–45 кэВ. Необходимо отметить, что в оценку энергий наибольшую неопределенность вносило определение геометрических параметров вспышечной области и величины низкоэнергетической границы для функции распределения нетепловых электронов.

Выводы

1. Нагрев плазмы связан с эволюцией спектров нетепловых электронов с энергией ниже 50 кэВ и с границей низкоэнергетического обрезания.

2. Процесс энерговыделения нетепловых электронов разнесен в пространстве, в фазе роста НХР при мягких спектрах преобладало свечение коронального источника с характерными электронными концентрациями $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, а далее при более жестких спектрах становилось существенным взаимодействие при хромосферных плотностях.

3. Из энергетического баланса между кинетической мощностью нетепловых электронов и тепловой энергией плазмы следует, что низкоэнергетическая граница должна варьировать в пределах 20–45 кэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Brown C. The deduction of energy spectra of hard X-ray bursts // *Solar Phys.* 1971. V. 18. P. 489–502.

Feldman U., Seely J.F., Doschek G.A., et al. The morphology of the 10^7 K plasma in solar flares. 1. Nonimpulsive flares // *Astrophys. J.* 1994. V. 424. P. 444–458.

Lin R.P., Krucker S., Hurford G.I., et al. RHESSI observations of particle acceleration and energy release in an intense solar gamma-ray line flare // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. L69–L76.

Masuda S., Kosugi T., Hara M., et al. A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection // *Nature.* 1994. V. 371. P. 371.

Институт космических исследований РАН, Москва