ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК: НАБЛЮДЕНИЯ И ФЕНОМЕНОЛОГИЯ

Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н.

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

SOLAR FLARE PRECURSORS: OBSERVATIONS AND PHENOMENOLOGY

Charikov Yu.E., Shabalin A.N.

Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

Preflare activity such as transient brightenings before the main impulsive phase of a flare has long been considered a potential clue to an understanding of the physical conditions in the solar atmosphere that lead to an eruption. Early evidences of discrete SXR precursors were detected approximately 15–30 min before flares. Several studies have found preflare activity such as small X-ray and EUV brightenings at the onset of the filament's slow-rise. The filament activation was first observed beneath one anchored footpoint where a localized preflare X-ray brightening was reported to be temporally and spatially correlated with the onset of the filament slow-rise. It is not widely accepted that nonthermal particles are present in significant amounts prior to the impulsive phase of the flare. We analyzed the data obtained by RHESSI, TRACE, AIA, and Nobeyama observatory for the aim to find the flares in which nonthermal emissions during the preflare phase take place. The various magnetic configurations on the precursor stage are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-333-336

С развитием техники космического эксперимента и наземных наблюдений становится возможным детальное изучение малых потоков электромагнитного излучения с высоким временным и пространственным разрешением. Такая задача возникает при изучении предвспышечной стадии развития процесса, на которой особое место занимает вопрос о предвестниках, регистрируемых перед импульсной фазой вспышки. Актуальность подобного рода исследований определяется возможным влиянием процессов перестройки магнитных конфигураций, причинно связанных с последующим взрывным процессом выделения энергии, ускорением заряженных частиц, генерацией волн, нагрева плазмы, электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн.

Для начала напомним определение предвестника солнечной вспышки, данное нами ранее на основе статистической обработки около 700 вспышек, зарегистрированных на КА серии Прогноз, и приведенное в работе [1]. Предвестник вспышки – это кратковременное повышение электромагнитного излучения на часовой временной шкале перед импульсной фазой, причем величина потока не превышает 0.1 значения в пике импульсной фазы и происходящее в пределах одной активной области. Следует отме-

титель, что диапазон энергий, в котором регистрировались предвестники, простирался от оптического до мягкого рентгеновского излучения. Однако вопрос происхождения предвестников и особо их причинно-следственной связи со вспышками решен не был. В последние два десятилетия в наблюдениях был достигнут существенный прогресс, связанный с возможностью пространственной локализации источника излучения. Особенно это касалось измерений в УФ-диапазоне на спутниках TRACE и SDO/AIA, в рентгеновском диапазоне на спутниках RHESSI и Fermi, наземных наблюдений в радиодиапазоне на Nobeyama Radioheliograph, EOVSA и др.

Предвестники вспышек напрямую связаны с процессом потери устойчивости магнитной предвспышечной конфигурации. Вопрос о природе триггера этого процесса остается неясным, наиболее обсуждаемым в настоящее время. Общий, феноменологический подход заключается во взаимодействии магнитных полей, ранее существующего, глобального и возникающего менее масштабного магнитного поля. Наиболее обсуждаемыми моделями триггера в настоящее время являются модели пересоединения и неустойчивостей. В моделях пересоединения рассматривается *tether cutting* (внутреннее пересоединение) и *breakout* (внешнее) пересоединение, определяемые различной конфигурацией магнитного поля на предвспышечной стадии. В модели *tether cutting* предполагается существование двух биполярных аркад и пересоединение происходит при всплытии нового магнитного потока и пересоединения (внутреннего) с существующей конфигурацией поля. В модели *breakout* постулируется существование комплексной мультиполярной активной области с нулевыми точками, существующими выше замкнутой аркады с широким магнитным полем. Первоначальное пересоединение происходящее в области нулевых точек, приводит к уменьшению натяжения жгута и его движению. В модели *ideal instability* пересоединение в магнитном жгуте отсутствует. В качестве неустойчивостей магнитоплазменной конфигурации рассматриваются неустойчивость тора (*torus instability*) и изгибная (*kink*) неустойчивость, приводящие к эрупции магнитного жгута при достижении определенных критических условий.

Ярким примером триггера внутреннего пересоединения (*tether cutting*) является развитие вспышечной ситуации 22 июня 2015 г., начиная с 16:00 UT [2]. На рис. 1 показана эволюция мягкого рентгеновского излучения по данным GOES и УФ-излучения 94A, 171A, 304A и 1600A по данным SDO/AIA. Вспышка GOES класса M6.6 произошла в 17:35UT, отчетливый пик зарегистрирован на фазе роста до 18:00UT, широкий максимум сменился пологим уменьшением рентгеновского потока в течение нескольких часов. Первый пик P_1 на предвспышечной фазе в УФ диапазоне отсутствовал, в то время как второй пик P_2 отчетливо регистрировался в УФ диапазоне в линиях 171A, 304 и 1600A без смещения во времени и в линии 94A со значительным сдвигом по времени. На фазе спада УФ излучения 171A

видна значительная переменность, что не отмечено в излучении других УФ линий.

Рис. 1. Эволюция УФ и мягкого рентгеновского излучения вспышки 22 июня 2015 г. [2]

Рис. 2. Рентгеновское излучение RHESSI и GOES вспышки 22 июня 2015 г.

Данные измерений RHESSI в диапазоне энергий 3–100 кэВ на временном интервале 16:30–18:35UT приведены на рис. 2 [2]. Особо отметим, что в момент пика P_2 зарегистрировано повышение не только мягкого рентгеновского излучения, но и **жесткого, вплоть до энергий 25 кэВ – 50 кэВ**. То есть, на данной стадии происходил не только предвспышечный нагрев плазмы до нескольких МК, но и имело место ускорение заряженных

частиц. Заметим, что ранее обсуждались в основном предвестники в мягком рентгеновском диапазоне, природа которого квазитепловая.

Рис. 3. УФ излучение в линии 94А и RHESSI контуры в диапазоне 5–10 кэВ (красные), 10–15 кэВ (синие) и 15–20 кэВ (желтые) для пика P_2 вспышки 22 июня 2015 г. [2]

Из рис. 3 следует, что в момент предвестника (пик P_2) рентгеновское излучение вплоть до 25 кэВ происходило из горячего канала, ассоциированного с магнитным жгутом, расположенным вдоль фотосферной нейтральной линии. Подъем магнитного жгута и его пересоединение с низко лежащими магнитными петлями является примером **триггера tether cutting**, что приводит к нагреву плазмы, ускорению частиц и излучению. Дальнейшая перестройка магнитной конфигурации связана с изменением режима всплытия жгута – от медленного на стадии предвестника со скоростью 14 км/с до быстрого с 109 км/с на начальной фазе вспышки.

Работа поддержана Грантом РНФ № 20-72-10158.

Литература

1. *Фарафонов В.Г.*, кандидатская диссертация, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Ленинград, 1983.
2. *Sahu S. et al.* // *ApJ*, 2020, 897, 157S