

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 119, № 1, 5–10 (2023)

УДК 523.985.3

Предимпульсное вспышечное энерговыделение по данным субтерагерцового и рентгеновского излучения Солнца

*В.В. Смирнова¹, Ю.Т. Цап¹, В.С. Рыжов²*¹ ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
*vsvvid.smirnova@yandex.ru*² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 1, Москва, 105005, Россия
v_ryzhov@mail.ru

Поступила в редакцию 22 октября 2022 г.

Аннотация. В работе изучены временные задержки между профилями рентгеновского и субтерагерцового (суб-ТГц) излучения в начальной фазе вспышек с целью выяснения природы нагрева переходной области и верхней хромосферы Солнца. Анализ ряда событий показывает, что для некоторых событий суб-ТГц излучение в начале вспышек опережает жесткое рентгеновское на 3–6 минут. Электронная теплопроводность корональной плазмы не может обеспечить эффективный нагрев переходной области и плазмы в области хромосферы, что предполагает тепловое вспышечное энерговыделение непосредственно на уровне хромосферы.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, субтерагерцовое радиоизлучение, хромосфера

1 Введение

Изучение предвестников солнечных вспышек в различных волновых диапазонах и на разных временных масштабах всегда вызывало большой интерес (Charikov, 2000; Fleishman et al., 2022). В частности, Harrison et al. (1985) и Tappin (1991) с помощью наблюдений на спутнике Solar Maximum Mission пришли к выводу, что рост мягкого рентгеновского излучения в предимпульсной фазе вспышек характерен приблизительно для половины всех выбранных событий. Между тем информация о пространственном расположении источников излучения длительное время оставалась недоступной из-за низкого разрешения инструментов.

Сравнительно недавно, благодаря космическим наблюдениям с высоким пространственным разрешением на Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) и Solar Dynamics Observatory (SDO), появились веские указания на то, что рентгеновские источники перед импульсной фазой вспышки могут располагаться в основаниях корональных петель, а их температура достигает 10–15 МК (Hudson et al., 2021). Поскольку субтерагерцовое (суб-ТГц) излучение тесно связано с рентгеновским (Smirnova et al., 2021), а за его генерацию может быть ответственна тепловая плазма переходной области и верхней хромосферы (Tsap et al., 2018; Kontar et al., 2018), то следует ожидать наличие тесной связи между субтерагерцовыми и рентгеновскими данными, включая микроволновый диапазон (Altyntsev et al., 2012). Актуальность таких исследований становится особенно очевидной, если принять во внимание важность отождествления источника нагрева хромосферной плазмы в ходе развития вспышки, который может быть связан с ускоренными заряженными частицами, тепловыми потоками и энерговыделением *in situ*.

Цель представленной работы – исследовать временные задержки между профилями рентгеновского и суб-ТГц излучения, наблюдаемого перед импульсной фазой вспышек. Затем, исходя из результатов, попытаться выяснить природу нагрева переходной области и верхней хромосферы Солнца.

2 Наблюдательные данные и выбор вспышечных событий

В настоящей работе были использованы результаты наблюдений суб-ТГц излучения солнечных вспышек, полученные на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана, на котором проводится мониторинг солнечной активности на частотах 93 и 140 ГГц (Tsap et al., 2016). Этот уникальный инструмент позволяет измерять интенсивность радиоизлучения солнечных вспышек с пространственным разрешением 2.5' (93 ГГц) и 1.5' (140 ГГц), с временным разрешением 1 с. Также были привлечены наблюдения на радиотелескопе Solar Submillimeter Telescope (SST) в Аргентине (Kaufmann et al., 2000) и в обсерватории Köln Observatory for Submillimeter and Millimeter Astronomy (KOSMA, Lüthi et al., 2004) в Швейцарии. Данные о рентгеновском излучении вспышек были получены с помощью космических обсерваторий RHESSI, Solar Orbiter (инструмент Spectrometer Telescope for Imaging X-rays, STIX) и Fermi.

Для анализа временных профилей на предмет задержек между суб-ТГц и жестким рентгеновским излучением мы выбрали семь вспышек, четыре из которых наблюдались на РТ-7.5, две – на SST и одна – на KOSMA. Эти события представлены в первом столбце таблицы 1. Во втором столбце указан рентгеновский класс вспышки по данным околоземных спутников Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). События выбирались таким образом, чтобы было максимально хорошее отношение сигнал-шум в суб-ТГц диапазоне, т. е. постоянная шумовая составляющая приемной аппаратуры (за вычетом фона от спокойного Солнца) не превышала 10%. Уровень предвспышечного фона в суб-ТГц и жестком рентгеновском диапазоне оценивался с помощью локального минимума, близкого к импульсной фазе по наблюдениям на частоте 93 ГГц и в канале 25–50 кэВ согласно методике, приведенной в работе Hudson et al. (2021). Ошибка определения начала импульсной фазы зависит, в основном, от отношения сигнал-шум и варьируется приблизительно от 1 до 5 с.

Нами было проведено сравнение временных профилей суб-ТГц и жесткого рентгеновского излучения на предмет задержек перед началом процесса энерговыделения. Длительность задержек в минутах указана в третьем столбце таблицы 1. Частоты, на которых проводились наблюдения, а также публикации, в которых описаны данные события, указаны в четвертом и пятом столбцах соответственно.

Из таблицы 1 видно, что два события класса X и одно событие класса M6.1 не показали видимых задержек, что хорошо согласуется со стандартной моделью солнечных вспышек. В четырех событиях суб-ТГц излучение опережало жесткое рентгеновское перед импульсной фазой, и в одном событии (выделено курсивом в таблице) наблюдалось отставание профиля суб-ТГц излучения от рентгеновского. Таким образом, суб-ТГц излучение опережало жесткое рентгеновское излучение не для всех вспышечных событий (см. таблицу 1). С одной стороны, это свидетельствует о важной роли предвестников вспышек в миллиметровом диапазоне длин волн, сопровождаемых нагревом хромосферы, а с другой – предполагает разную феноменологию вспышечного энерговыделения. В связи с этим рассмотрим более детально событие SOL2022-03-28T10:58.

Таблица 1.

Дата/время (UT)	GOES class	Задержки (мин)	Частота	Публикация
SOL2001-04-12T10:28	X2.0	нет	(230 ГГц)	Lüthi et al. (2004)
SOL2006-12-06T18:47	X6.5	нет	(212 ГГц)	Kaufmann et al. (2009)
SOL2012-07-05T11:44	M6.1	нет	(140 ГГц)	Tsap et al. (2018)
<i>SOL2013-02-17T15:50</i>	<i>M1.9</i>	<i>2</i>	<i>(212 GHz)</i>	<i>Fernandes et al. (2017)</i>
SOL2017-04-02T07:50	M5.4	7	(140 GHz)	Morgachev et al. (2018)
SOL2022-03-28T11:26	M4.0	6	(93 GHz)	–
SOL2022-05-05T13:15	M2.2	3	(93 GHz)	–

Наблюдения на частоте 93 ГГц проводились методом сканирования солнечного диска с временным разрешением 0.25 с. Время построения одной полной карты солнечного диска составляло 6 минут. Максимум потока суб-ТГц излучения вспышки определялся с помощью детального исследования момента прохождения активной области лучом диаграммы направленности антенны приблизительно в течение 30 с. При этом на сканах активной области в интервале фиксировалось усиление

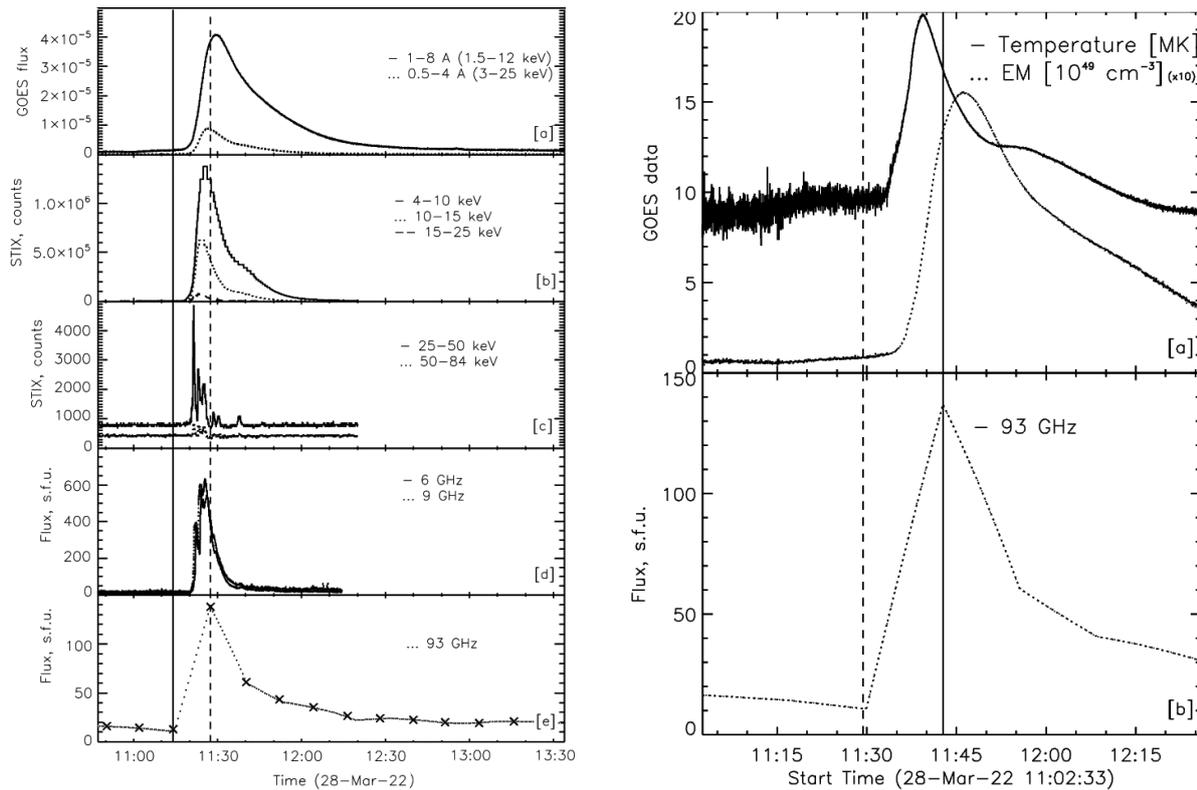


Рис. 1. Слева: временные профили излучения вспышки SOL2022-03-28T10:58: мягкий рентген в каналах 1.5–12 кэВ (GOES) и 4–25 кэВ (STIX) [a–b]; жесткий рентген в каналах 25–50 и 50–84 кэВ (STIX) [c]; радиоизлучение на частотах 6 и 9 ГГц [d], и на частоте 93 ГГц [e]. Справа: профили распределения температуры и меры эмиссии по данным GOES [a] и временной профиль на частоте 93 ГГц [b]

потока, что позволяло уменьшить погрешность определения момента излучения наступления максимума вспышки до 30 с.

На временном профиле (рис. 1, слева, панель [e]) звездочками указаны моменты, для которых были получены потоки излучения в исследуемой активной области. В частности, видно, что в 11:14 UT с точностью до ± 30 с поток суб-ТГц излучения от области вспышки уже достигает $\sim 10\text{--}20$ с.е.п., тогда как в жестком рентгеновском и микроволновом диапазонах значительного усиления потока не происходит.

На профилях мягкого рентгеновского излучения фаза роста вспышки, как и на суб-ТГц временном профиле, наблюдается приблизительно в течение 20 минут (рис. 1 слева, панель [a]), что является довольно распространенным явлением (Smirnova et al., 2021). Это дополнительно свидетельствует в пользу корректной оценки момента максимума суб-ТГц излучения.

Важно отметить, что при обработке карт учитывался поток от спокойного Солнца и шум, связанный с распространением радиоволн через земную атмосферу. Погрешность измерения потока радиоизлучения составила при этом $\sim 25\%$, т.е. ослабление сигнала не могло оказать существенного влияния на полученные результаты.

На рис. 1 представлен пример временных профилей вспышки SOL2022-03-28T10:58 GOES класса M4.0, произошедшей 28.03.2022 в активной области 12975. Профили мягкого и жесткого рентгеновского излучения в каналах от 1.5 до 84 кэВ были получены по данным GOES [a] и STIX [b, c]. На панели [d] представлены временные профили микроволнового радиоизлучения вспышки на частотах 6 и 9 ГГц, зарегистрированные на телескопах Кисловодской горной станции ГАО РАН. Временной профиль радиоизлучения на частоте 93 ГГц изображен на панели [e]. Сплошная вертикальная линия показывает момент времени до начала импульсной фазы вспышки. Штриховой линией обозначен момент максимума вспышки по наблюдениям на 93 ГГц. Видно, что в максимуме импульсной фазы суб-ТГц излучение запаздывает относительно жесткого рентгеновского на 7 минут. Однако перед на-

чалом импульсной фазы вспышки профиль жесткого рентгеновского излучения отстает от суб-ТГц приблизительно на 6 минут.

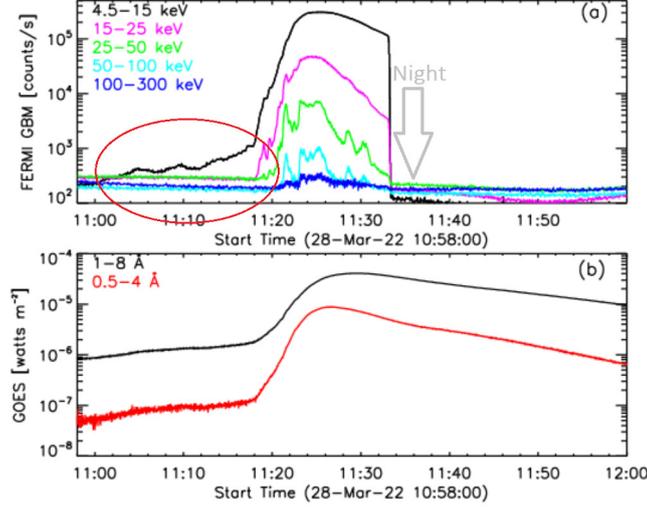


Рис. 2. Временные профили рентгеновского излучения вспышки по данным Fermi (a) и GOES (b)

На рис. 2 показано сравнение профилей рентгеновского излучения по данным Fermi и GOES. Видно, что перед началом импульсной фазы вспышки в мягком рентгеновском излучении, в канале 4.5–15 кэВ, происходит рост излучения, в то время как в жестких каналах оно остается на уровне шумов.

Можно предположить, что наблюдаемое поведение профилей можно объяснить в рамках стандартной модели солнечной вспышки тем, что перенос тепла из вершины вспышечной петли в ее основания происходил посредством теплопроводности, что приводило к нагреву хромосферы, излучающей в суб-ТГц диапазоне. В этом случае время нагрева плазмы хромосферы должно быть сравнимо с задержками между суб-ТГц и рентгеновским излучением вспышки и составлять ~ 6 мин. В связи с этим сделаем некоторые оценки.

Мощность энерговыделения в хромосфере из-за электронной теплопроводности оценим следующим образом (Priest, 1982):

$$q = \kappa \frac{d}{ds} \left(T^{5/2} \frac{dT}{ds} \right) = \kappa \frac{2}{7} \frac{d}{ds} \left(\frac{dT^{7/2}}{ds} \right) = \kappa \frac{2}{7} \frac{d^2 T^{7/2}}{ds^2} \approx \kappa \frac{2}{7} \frac{T^{7/2}}{s^2},$$

где коэффициент теплопроводности $\kappa = 10^{-6}$ эрг $\text{K}^{-7/2} \text{c}^{-1}$. Отсюда, полагая тепловую энергию переходной области и верхней хромосферы $W_{\text{th}} = 3/2nkT$, где $k = 1.38 \times 10^{-16}$ эрг/К – постоянная Больцмана, для характерного времени нагрева плазмы переходной области и верхней хромосферы толщины $s = 3 \times 10^7$ см при $n = 10^{11} \text{cm}^{-3}$ и $T = 10^5$ К находим

$$\tau_{\text{con}} \approx \frac{W_{\text{th}}}{q} = 21 \frac{kn s^2}{\kappa T^{5/2}} \approx 10^5 \text{ c}.$$

Полученная оценка свидетельствует о незначительном вкладе тепловых потоков плазмы в нагрев нижних слоев атмосферы Солнца. Учитывая отсутствие микроволновых всплесков в предимпульсной фазе, это свидетельствует в пользу важной роли нагрева хромосферной плазмы *in situ*. Вместе с тем не следует исключать существенный вклад “горячей” (10^6 – 10^7 К) и плотной рентгеновской плазмы в суб-ТГц излучение (Tsap et al., 2016).

3 Выводы

Сформулируем основные результаты работы.

1. На основе литературных данных и оригинальных наблюдений проведен анализ ряда субтерагерцовых событий на предмет временных задержек между жестким рентгеновским и суб-ТГц излучением.
2. В трех из семи выбранных событий начало генерации суб-ТГц излучения опережает жесткое рентгеновское излучение. Это свидетельствует о том, что нагрев хромосферной плазмы в этих вспышках не связан с ускоренными электронами.
3. Получены указания в пользу важной роли теплового нагрева хромосферы *in situ* в предимпульсной фазе солнечных вспышек рентгеновского класса М.
4. Электронная теплопроводность корональной плазмы не может обеспечить эффективный нагрев переходной области и хромосферы Солнца в ходе вспышечного энерговыделения.
5. Необходимы дополнительные исследования, поскольку корональная плазма также может вносить существенный вклад в суб-ТГц излучение вспышек.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-52-26006 Чехия_a (В.В. Смирнова), гранта РНФ № 22-12-0030 (Ю.Т. Цап) и Минобрнауки НИР № 1021051101548-7-1.3.8 (Ю.Т. Цап, В.В. Смирнова).

Литература

- Altyntsev A.A., Fleishman G.D., Lesovoi S.V., Meshalkina N.S., 2012. *Astrophys. J.*, vol. 758, no. 2, p. 138.
- Charikov Yu.E., 2000. *Phys. Chem. Earth Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science*, vol. 25, iss. 5–6, p. 407.
- Fernandes L.O.T., Kaufmann P., Correia E., et al., 2017. *Solar Phys.*, vol. 292, no. 1, p. 21.
- Fleishman G.D., Martinez O.H.C., Landi E., Glesener L., 2022. *Front. Astron. Space Sci.*, vol. 9, id. 966444.
- Harrison R.A., Waggett P.W., Bentley R.D., et al., 1985. *Solar Phys.*, vol. 97, iss. 2, pp. 387–400.
- Hudson H.S., Simoes P.J.A., Fletcher L., Hayes L.A., Hannah I.G., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 501, no. 1, pp. 1273–1281.
- Kaufmann P., Trottet G., Giménez de Castro C.G., et al., 2000. *Solar Phys.*, vol. 197, no. 2, pp. 361–374.
- Kaufmann P., Trottet G., Giménez de Castro C.G., et al., 2009. *Solar Phys.*, vol. 255, no. 1, pp.131–142.
- Kontar E.P., Motorina G.G., Jeffrey N.L.S., et al. 2018. *Astron. Astrophys.*, vol. 620, p. A95.
- Lüthi T., Magun A., Miller M., 2004. *Astron. Astrophys.*, vol. 415, pp. 1123–1132.
- Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G., 2018. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 58, no. 8, pp. 1113–1122.
- Priest E.R., 1982. *Solar Magnetohydrodynamics*, Dordrecht: D. Riedel.
- Smirnova V.V., Tsap Yu.T., Morgachev A.S., Motorina G.G., Bárta M., 2021. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 61, no. 7, pp. 993–1000.
- Tappin S.J., 1991. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 87, no. 2, pp. 277–302.
- Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S., et al., 2016. *Adv. Space Res.*, vol. 57, iss. 7, pp. 1449–1455.
- Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G., et al., 2018. *Solar Phys.*, vol. 293, no. 3, p. 50.

Pre-impulsive flare energy release according to sub-terahertz and X-ray solar observations

V.V. Smirnova¹, Yu.T. Tsap¹, V.S. Ryzhov²

¹ Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
vsvid.smirnova@yandex.ru

² Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
v_ryzhov@mail.ru

Abstract. Time delays between the X-ray and sub-terahertz emission at the initial phase of solar flares are studied in order to clarify the nature of heating of the transition region and the upper chromosphere of the Sun. Analysis of a series of events showed that hard X-ray emission is delayed relative to sub-THz radiation at the beginning of flares by 3–6 minutes for some considered events. The electron thermal conductivity of the coronal plasma cannot ensure the effective heating of the transition region and solar chromosphere. This suggests the heating of the chromospheric plasma in situ during the pre-impulsive phase of solar flares.

Key words: Sun, solar flares, sub-terahertz radio emission, chromosphere