О ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖКАХ МЕЖДУ СУБ-ТЕРАГЕЦОВЫМ И МЯГКИМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Смирнова В.В.¹, Цап Ю.Т.¹, Моторина Г.Г.^{2,3}, Моргачев А.С.⁴

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Крым, Россия*

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

³*Astronomical Institute ASCR, 251 65 Ondrejov, Czech Republic*

⁴*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия*

ON THE TIME DELAYS BETWEEN SUB-TERAHERTZ AND SOFT X-RAY EMISSION FROM SOLAR FLARES

Smirnova V.V.¹, Tsap Y.T.¹, Motorina G.G.^{2,3}, Morgachev A.S.⁴

¹*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia*

²*Pulkovo Observatory of RAS, St. Petersburg, Russia*

³*Astronomical Institute ASCR, 251 65 Ondrejov, Czech Republic*

⁴*Radiophysical Research Institute of Lobachevsky University, Nizhny Novgorod, Russia*

The time delays between peaks of sub-THz and soft X-ray emissions from solar flares have been considered. It has been shown that two types of sub-THz events exist depending on the time delays. This can be caused by different mechanisms of solar chromospheric heating during the flare energy release.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-269-272

Введение

Несмотря на то, что после обнаружения возрастающего с частотой потока излучения солнечных вспышек в суб-ТГц диапазоне (10^2 – 10^3 Гц, 0.3–3.0 мм) прошло уже около 20 лет [1], тем не менее, вопрос о природе этого явления все еще остается открытым. За указанный период времени было предложено с десятков различных механизмов (моделей), способных объяснить положительный наклон спектра. Среди них: гиросинхротронный [2, 3], обратный комптоновский [2], тепловой тормозной [4, 5], гибридный [6], черенковский [7] и плазменный механизмы [8]. Однако перечисленные модели встречаются с теми или иными трудностями [6, 8, 9]. В частности, черенковский механизм предполагает, что диэлектрическая проницаемость солнечной хромосферы должна быть больше 1, что представляется довольно сомнительным [9]. Для реализации гиросинхротронного механизма требуются магнитные поля в несколько тысяч гаусс [3], тогда как для плазменного необходима концентрация тепловых электронов, не менее 10^{14} см⁻³, что может быть достигнуто в нижней атмосфере Солнца при условии эффективной ионизации атомов водорода.

Сравнительно недавно с целью выяснения природы суб-ТГц излучения солнечных вспышек с положительным наклоном спектра авторы рабо-

ты [5] провели детальный статистический анализ известных вспышечных событий (15 событий). Было показано, что как наблюдаемые потоки, так и суб-секундные пульсации суб-ТГц излучения можно объяснить, исходя из предположения об определяющем вкладе теплового тормозного механизма, генерируемого на уровне хромосферы и переходной области в результате термализации ускоренных в короне электронов. Однако площадь источников излучения в работе [5] находилась по засвеченным изображениям. Другим важным недостатком этой работы является отсутствие анализа поведения временных профилей теплового и нетеплового излучения вспышек. Между тем следует ожидать, что в рамках рассматриваемой модели должен наблюдаться эффект Нойперта, который сводится в простейшем случае к наступлению максимума суб-ТГц излучения на несколько минут раньше мягкого рентгеновского (см. также [10]).

Цель настоящей работы – на основе известных вспышечных событий провести детальный анализ временных задержек между суб-ТГц и мягким рентгеновским излучением.

Обработка данных наблюдений и ее результаты

Исходя из работы [5], а также из других работах (например: [11–13]), мы выбрали ряд суб-ТГц событий с положительным спектром и сравнили временные профили радио- и мягкого рентгеновского излучения на предмет наличия временных задержек между ними. Для мягкого рентгеновского излучения (1-8, 0.5-4 Å) использовались наблюдения космических аппаратов серии GOES [14], тогда как для суб-терагерцового – радиотелескопов SST, KOSMA, BEMRAK и РТ-7,5 МГТУ, на частотах 93, 140, 210, 230, 345, 405 ГГц. Всего было выделено 11 событий (таблица 1). Временные задержки, превышающие 30 с, определялись между максимумами потоков суб-ТГц и мягкого рентгеновского излучения (в противном случае, они во внимание не принимались).

Таблица 1.

№	Тип	Дата и время	GOES-класс вспышки	Задержки (минуты)	Публикация
1	I	06.12.2006 (18:44 UT)	X6.5	3	Kaufmann et al. (2009)
2	I	12.04.2001 (10:17 UT)	X2.0	9	Luthi et al. (2004)
3	I	27.10.2014 (14:22 UT)	X2.0	6	Fernandes et al. (2017)
4	I	2.11.2003 (17:07 UT)	X8.3	2,5	Silva et al. (2007)
5	I	30.10.2004 (11:40 UT)	X1.2	2	Cristiani et al. (2007)
6	II	05.07.2012 (11:44 UT)	M6.2	-	Tsap et al. (2018)
7	II	04.07.2012 (09:54 UT)	M5.3	-	Tsap et al. (2016)
8	II	02.04.2017 (07:50 UT)	M5.4	-	Morgachev et al. (2018)
9	II	27.10.2003 (12:27 UT)	M6.7	-	Trottet et al. (2011)
10	II	08.02.2010 (13:30 UT)	M2	-	Kaufmann et al. (2011)
11	I, II	17.02.2013 (15:40 UT)	M1.9	*	Fernandes et al. (2017)

Символом (*) обозначена вспышка, попадающая под оба типа.

Полученные результаты позволяют разделить суб-ТГц события на два типа:

- I. вспышки, для которых появление максимума потока радиоизлучения опережает по времени появление максимума мягкого рентгеновского излучения от 2 до 9 минут;
- II. вспышки, для которых максимумы потоков суб-ТГц и мягкого рентгеновского излучения совпадают с точностью до 30 с, по результатам кросс-корреляционного анализа.

Типичные примеры временных профилей вспышек типа I и типа II представлены на рис. 1. В первом случае (рис.1 а), задержка между профилями суб-ТГц и мягкого рентгеновского излучения составила 3 мин, во втором случае (рис. 1 b, c) максимумы совпадают, однако на рис.1 b видно, что в суб-ТГц диапазоне наблюдается небольшой импульс в начале вспышки.

Следует подчеркнуть, что к типу I относилось 5 событий класса X, а ко второму – 5 вспышек класса M.

Рис. 1. Временные профили вспышек типа I (a) и типа II (b, c).

Обсуждение результатов и выводы

Полученные нами результаты, по меньшей мере, свидетельствуют о том, что для суб-ТГц событий с положительным наклоном спектра, предположение, сделанное в работе [5] о доминирующем механизме нагрева переходной области и хромосферы Солнца быстрыми электронами, не согласуется, по крайней мере, с некоторыми наблюдениями. В этом случае должны были бы доминировать вспышки типа I, что несколько противоречит полученным нами результатам. По нашему мнению, с учетом малого вклада горячей корональной плазмы в суб-ТГц излучение для вспышек рентгеновского класса M, это можно объяснить процессами теплового энерговыделения in situ на уровне хромосферы. Однако не следует также

исключать определенный вклад и нетепловых процессов в нижней атмосфере Солнца. Данный вывод находится в хорошем согласии с результатами работы [15], согласно которой, по крайней мере, для некоторых событий в основаниях корональных петель наблюдается горячий > 10 МК источник мягкого рентгеновского излучения, который никак не связан с последующей импульсной фазой вспышки.

Вместе с тем важную роль могут также играть процессы распространения тепловых потоков из корональной части вспыхивающей петли в основаниях петель [16]. Для того чтобы выяснить причину отсутствия временных задержек между мягким рентгеновским и суб-ТГц излучением требуются дополнительные исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки НИР № 0831-2019-0006 (Смирнова В.В., Цап Ю.Т.), и гранта РНФ 20-72-10158 (Моторина Г.Г.).

Литература

1. Trottet, G., Raulin, J.-P., Kaufmann, P., et al. // A&A, 2002, 381, 694.
2. Kaufmann, P., Correia, E., Costa, J.E.R., Zodi Vaz, A.M. // A&A, 1986, 157, 11.
3. Silva, A.V.R., Share, G.H., Murphy, R.J., et al. // Sol. Phys., 2007, 245, 311.
4. Tsap, Y.T., Smirnova, V.V., Morgachev, A.S., et al. // Adv. Space Res., 2016, 57, 1449.
5. Kontar, E.P., Motorina, G.G., and Jeffrey, N.L.S., et al. // A&A, 2018, vol. 620, id A95.
6. Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S., et al. // Sol. Phys., 2018, vol. 293, № 3, id 50.
7. Fleishman, G.D., Kontar, E.P. // Astrophys. J. Lett., 2010, 709, L127.
8. Zaitsev, V.V., Stepanov, A.V., Melnikov, V.F. // Astron. Lett., 2013, 39, 650.
9. Krucker, S., Giménez de Castro, C.G., Hudson, H.S. et al. // A&A, Rev., 2013, 21, 58.
10. Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. // Ge&Ae, 2020, (in press).
11. Kaufmann P.; Trottet G.; Giménez de Castro, et al. // Sol. Phys, 2009, V. 255, Iss. 1, pp.131-142.
12. Trottet G., Raulin J.-P., Gimenez de Castro G., et al. // Sol. Phys., 2011, V. 273, Iss. 2, pp.339-361.
13. Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. // Ge&Ae, 2018, Vol. 58, No. 8, pp. 1113–1122, DOI: 10.1134/S001679321808011X.
14. Hanser, F.A. and F.B. Sellers, 1996, 2812, 344-352, doi: 10.1117/12.254082.
15. Hudson H.S., Simoes P.J.A., Fletcher L., et al. 2020, eprint arXiv:2007.05310.
16. Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. // Ge&Ae, 2019, Vol. 59, No. 8, pp. 1114–1120, DOI: 10.1134/S0016793219080140.