



ОБ УСИЛЕНИИ H_{α} И СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПЕРЕД СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ

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

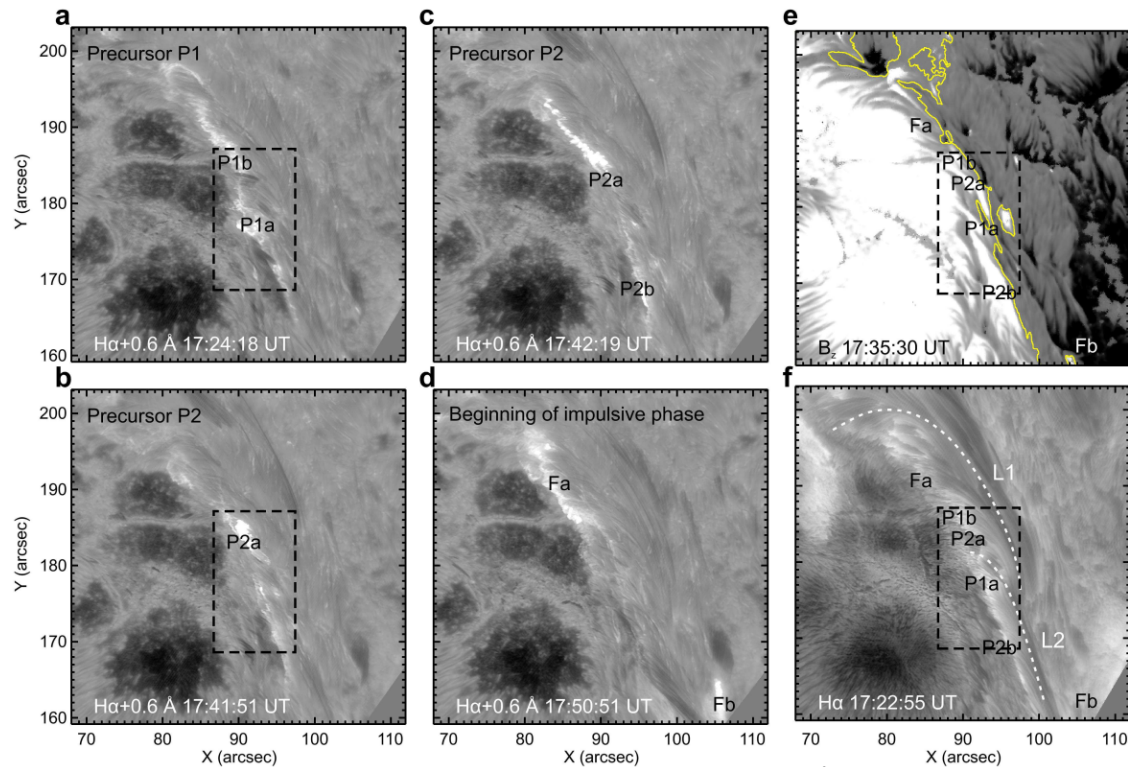


¹Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН

²ГАО РАН

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе





Puc.1. Wang et al., Nature Astronomy 1, 0085 (2017). BBSO/NST chromospheric H α + 0.6 Å (a-d) и H α center-line (f) images 22 June 2015 M6.5 flare. Brightenings labeled P1a/P1b, P2a/P2b, and Fa/Fb appear during the precursor episodes P1, P2, and at the beginning of the flare impulsive phase, respectively. The yellow contour in e indicates the линия раздела полярности. The dashed lines in f illustrate sheared arcade loops L1 and L2. All the images were registered with respect to 22 June 2015 17:24 UT.

ВВЕДЕНИЕ

Предвестники солнечных вспышек известны довольно давно и наблюдались в различных диапазонах на разных временных масштабах (Charikov, 2000). Так, например, в работе Wang et al. (2017) были рассмотрены предвестники солнечных вспышек, наблюдаемые в хромосфере. В частности, анализировались данные с высоким пространственным разрешением, по наблюдениям в линии H α (Рис.1). Было показано, что за несколько минут до вспышки наблюдается усиление яркости в некоторых областях над пятнами – (см. эволюцию предвестников P1 и P2 вспышки 22.06.2015), связанных со всплытием магнитного потока.

Наблюдения показывают, что для некоторых событий, усиление суб-ТГц излучения всплеск в пред- и пост-импульсной фазах может быть связано с излучением горячей корональной плазмы, что подтверждается расчетами дифференциальной меры эмиссии КУФ-излучения. В импульсной фазе всплеск, вклад корональной плазмы оказывается пренебрежимо малым. Это также свидетельствует в пользу того, что суб-ТГц излучение формируется в хромосфере, вследствие нагрева плазмы ускоренными электронами. В этой связи, можно ожидать наличие тесной корреляции между временными профилями и положением суб-ТГц и хромосферных (H α и др.) источников излучения. Однако такая корреляция наблюдается не всегда (Рис.2).

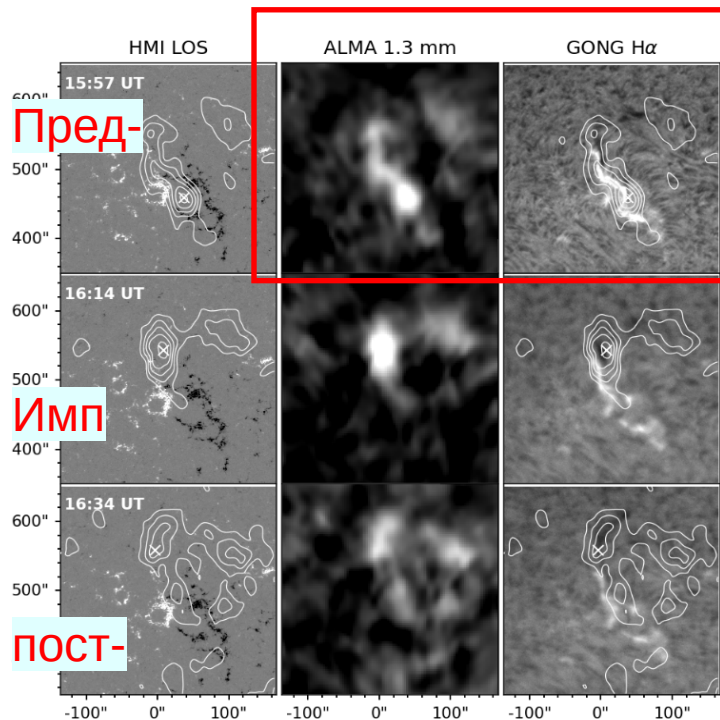
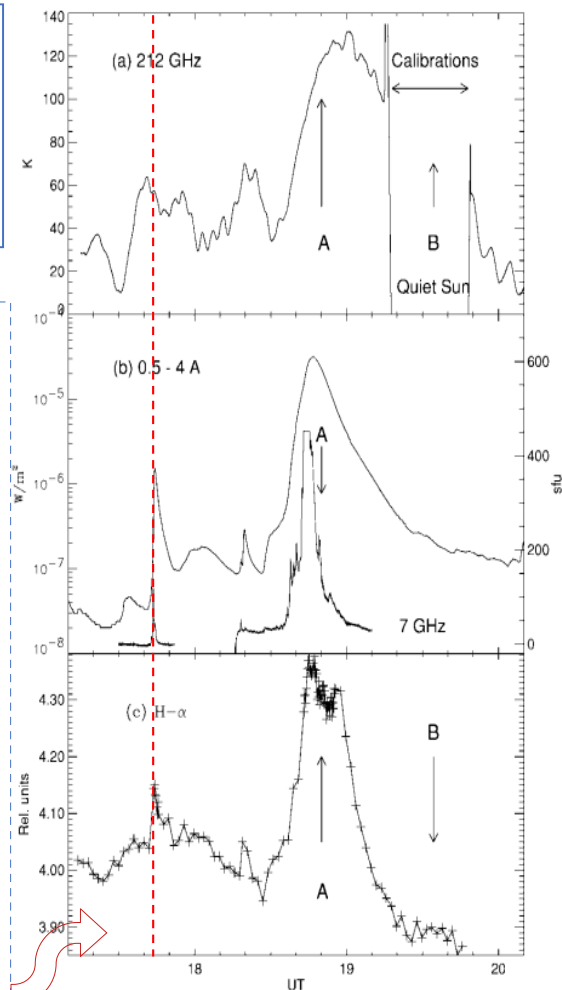


Рис.2. Слева: карты распределения яркости вспышки рентгеновского класса В, по данным ALMA, на волне 1.3 мм и H α на трех фазах вспышки (Skokic et al. 2023). Видно, что за 20 мин до импульсной фазы вспышки, в линии H α наблюдается яркий источник, положение которого совпадает с источником суб-ТГц излучения (выделено красным боксом). В импульсной фазе источник H α излучения слабеет, а суб-ТГц излучение усиливается.

Справа: временные профили вспышки по наблюдениям SST (Kaufmann et al. 2009) на частоте 212 ГГц, в сравнении с профилями рентгеновского и H α излучения. На временных профилях видно, что за час до импульсной фазы вспышки, наблюдается значительное усиление мягкого рентгеновского и H α излучения, а также, флуктуации излучения на частоте 212 ГГц.



Ранее было установлено, что $\text{H}\alpha$ излучение солнечных вспышек проявляется в виде ярких локальных источников на фоне всей активной области (Рис.3). Анализ временных профилей вспышек показывает, что суб-ТГц излучение может как опережать $\text{H}\alpha$ на несколько минут, так и запаздывать относительно него.

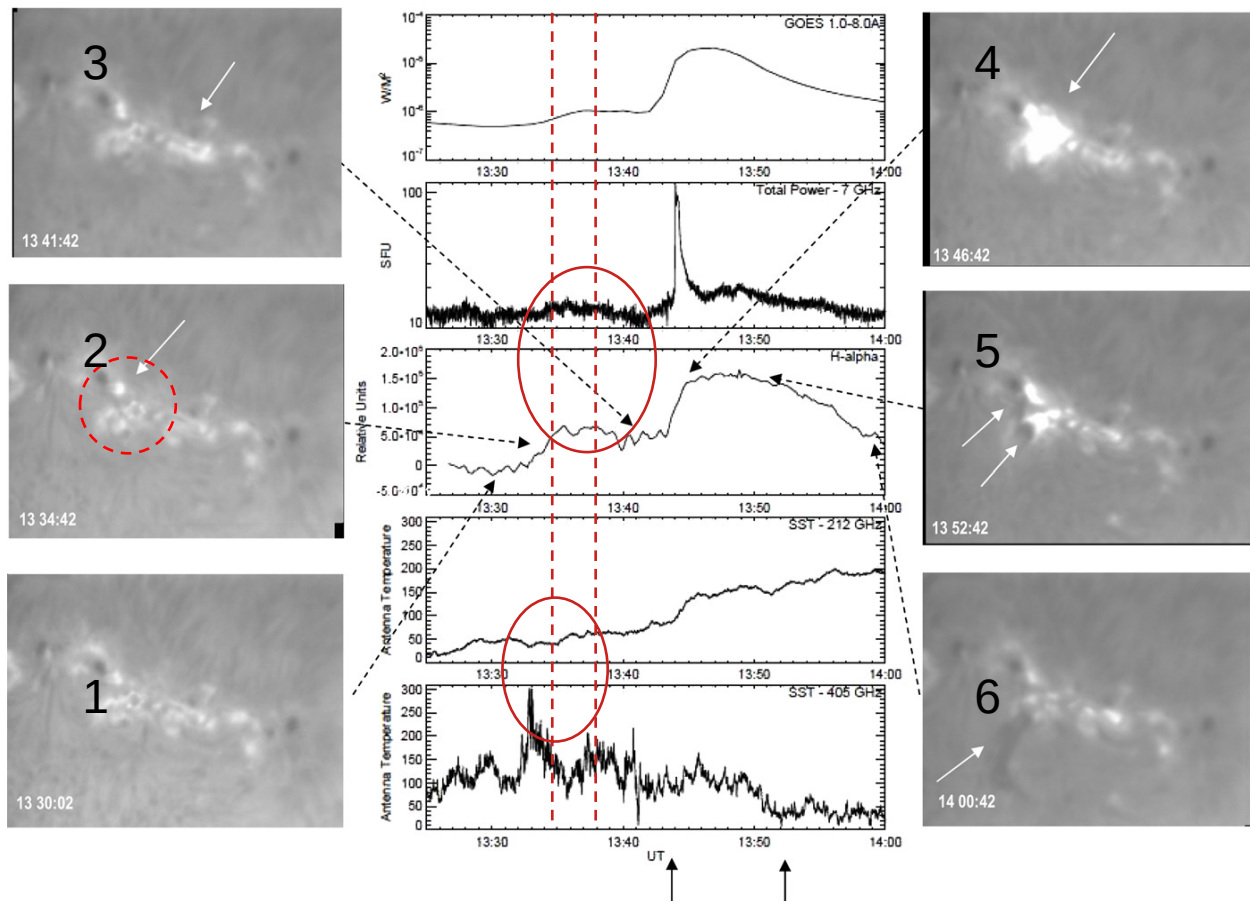


Рис.3. Карты распределения интенсивности вспышки SOL2010-02-08T13:45, по данным $\text{H}\alpha$, в сравнении с временными профилями рентгеновского, микроволнового и суб-ТГц излучения на частотах 212 и 405 ГГц (Kaufmann et al 2011). Видно, что в мягком рентгене, за несколько минут до вспышки наблюдается предвестник, который виден одновременно в линии $\text{H}\alpha$ и на частоте 405 ГГц в виде импульса. На картах распределения интенсивности в линии $\text{H}\alpha$ видно, что предвестник соответствует усилению яркости небольшой локальной области (обозначена красным пунктирным кругом на карте 2). Во время основной фазы вспышки, площадь яркой области увеличивается (карта 4), а затем снова делится на несколько источников (карта 5). На карте 6 наблюдается выброс вещества.

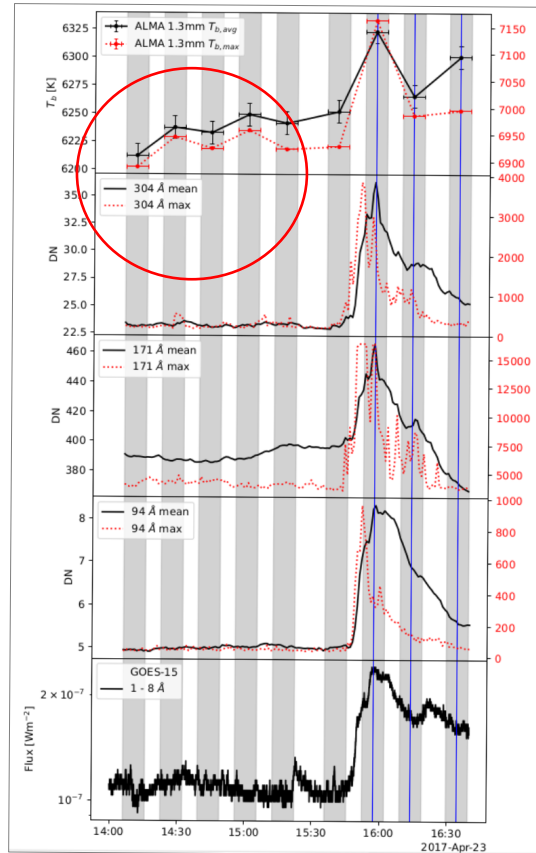


Рис.4. Временные профили потока излучения вспышки (сверху-вниз): 230 ГГц (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA), линии КУФ: 304 Å, 171 Å, 94 Å, 1-8 Å (Skokić et al., 2022). Видны заметные вариации суб-ТГц радиоизлучения (Skokić et al 2023)..

Современные наблюдения вспышек

На рис.4 показаны временные профили излучения вспышки 23.04.2017, в том числе и на частоте 230 ГГц, полученные по новым наблюдениям на радиointерферометре Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Красным кружком показаны флуктуации суб-ТГц радиоизлучения перед импульсной фазой. Такие предвспышечные флуктуации суб-ТГц излучения иногда совпадают по времени с усилением хромосферного излучения в канале 304 Å и H α (Рис.5). Так как суб-ТГц излучение генерируется в солнечной хромосфере, следует ожидать его корреляцию с излучением в линии H α .

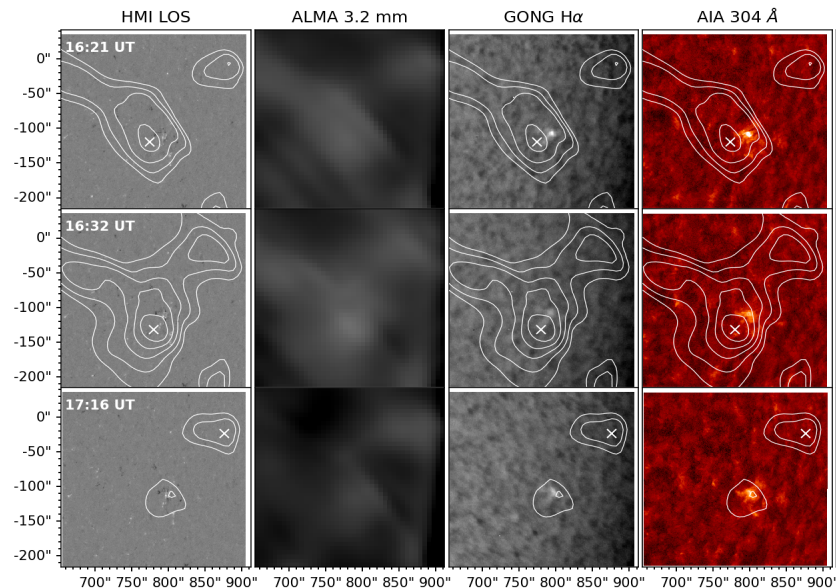


Рис.5 Карты распределения интенсивности на волне 3.2 мм (ALMA), в линии H α и в канале 304 Å (Skokić et al 2023).

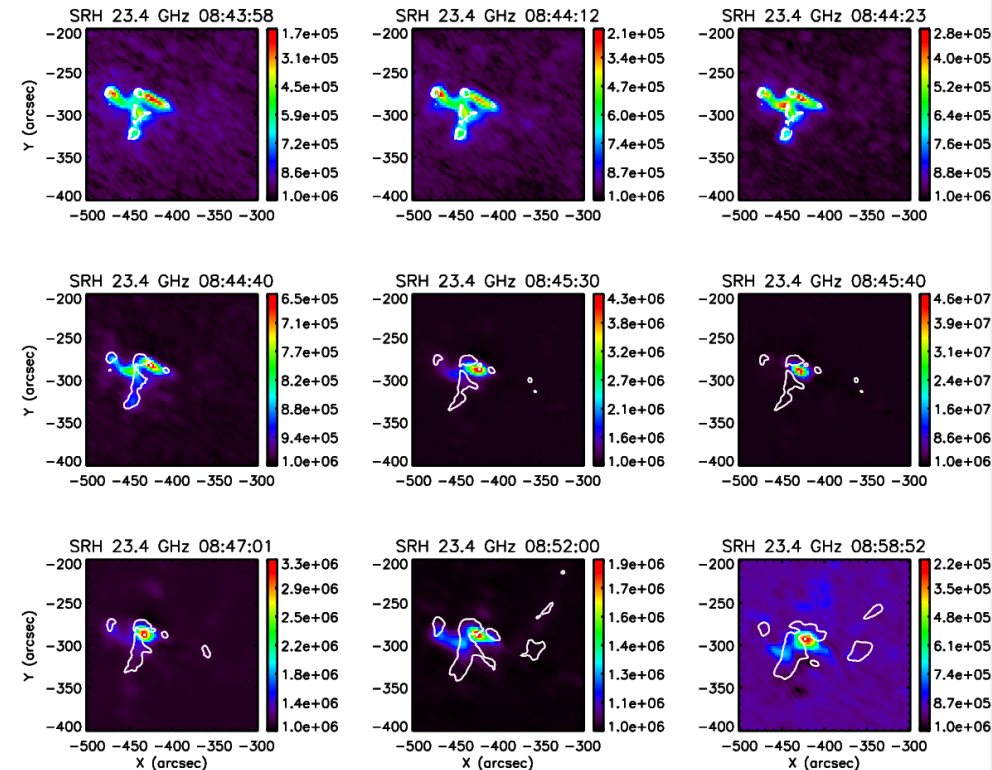


Рис.6. Карты распределения интенсивности микроволнового излучения (23.4 ГГц), полученные перед вспышкой, во время импульсной и пост-импульсной фаз. Белыми контурами показан источник в линии H_{α} . Видно, что перед импульсной фазой вспышки микроволновый и H_{α} источники пространственно совпадают.

Наблюдения некоторых вспышек в предимпульсной фазе обнаруживают усиление излучения в микроволновом диапазоне и линии H_{α} , что иногда совпадает по времени с рентгеновскими предвестниками вспышек (Hudson et al. 2021) и свидетельствует, возможно, о процессах энерговыделения в хромосфере Солнца. На рис. представлены карты распределения яркостной температуры вспышки SOL2024-06-01T08:45 по наблюдениям на Сибирском радиогелиографе (СРГ), на частоте 23.4 ГГц. Белыми контурами нанесено положение источника излучения в линии H_{α} . Видно, что перед импульсной фазой вспышки (верхняя панель), в хромосфере наблюдаются яркие области, совпадающие по положению с радиоисточником.

Цель работы – выявить возможную взаимосвязь предвестников солнечных вспышек, по наблюдениям в H_{α} и суб-ТГц диапазонах, и природу нагрева переходной области и верхней хромосферы Солнца, акцентируя внимание на в начальной фазе солнечной вспышки.

В Таблице 1 представлено 16 вспышечных событий по наблюдениям на разных инструментах. Из них, только для 7 вспышек имеются одновременные наблюдения суб-ТГц и Н α излучения перед началом импульсной фазы. Рассмотрим событие SOL2012-07-05T11:44 (Tsap et al. 2018), для которого имеются многоволновые наблюдения. Наблюдения суб-ТГц излучения проводились на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Во время этой вспышки наблюдался рост плотности потока суб-ТГц излучения с частотой, между частотами 93 и 140 ГГц.

Наблюдения

	Date	Freq (GHz)	GOES class	References
1	SOL2001-04-12T10:28	230/345	X2.0	Lüthi et al., 2004
2	SOL2003-10-27T12:43	212/405	M6.7	Trottet et al., 2011
3	SOL2003-11-02T17:25	212/405	X8.3	Silva et al., 2007
4	SOL2006-12-06T18:47	212/405	X6.5	Kaufmann et al., 2009
5	SOL2010-02-08T13:45	212/405	M2.0	Kaufmann et al., 2011
6	SOL2011-02-14T17:25	212/405	M2.2	Valle et al., 2019
7	SOL2012-07-04T09:55	93/140	M5.3	Tsap et al. 2016
8	SOL2012-07-05T11:44	93/140	M6.1	Tsap et al. 2018
9	SOL2013-02-17T15:50	212/405	M1.9	Fernandes et al., 2017
10	SOL2013-04-12T19:52	212/405	M3.3	Fernandes et al., 2017
11	SOL2013-04-16T07:40	93/140	C1.3	Smirnova et al., 2025
12	SOL2014-10-27T14:47	212/405	X2.0	Kaufmann et al., 2015
13	SOL2017-04-02T07:50	93/140	M5.4	Morgachev et al., 2018
14	SOL2022-03-28T11:29	93	M4.0	Motorina et al., 2022
15	SOL2022-05-04T08:45	93	M5.7	Smirnova et al., 2023
16	SOL2024-06-01T08:54	39/93	X1.4	Smirnova et al., 2025

Вспышка SOL2012-07-05T11:44 (Tsap et al. 2018)

Вспышка наблюдалась в разных диапазонах, как оптическом, так и радио. На рис. Слева представлены временные профили суб-ТГц излучения на частотах 93 и 140 ГГц, в сравнении с мягким, жестким рентгеновским, микроволновым и H α излучением. Показано, что максимум вспышки в линии H α , который наблюдался в локальной области, совпадающей с ярким источником жесткого рентгеновского излучения (рис.7 справа), хорошо коррелирует с суб-ТГц профилем.

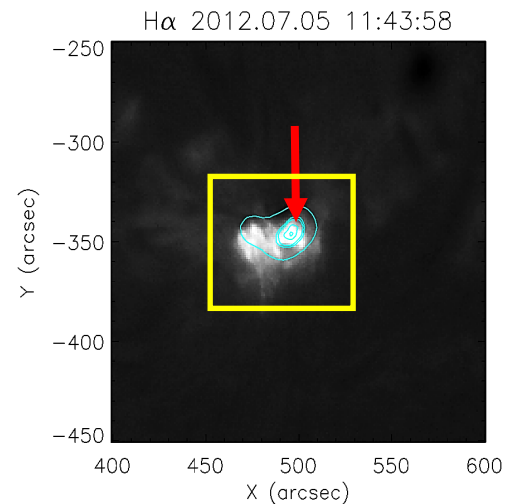
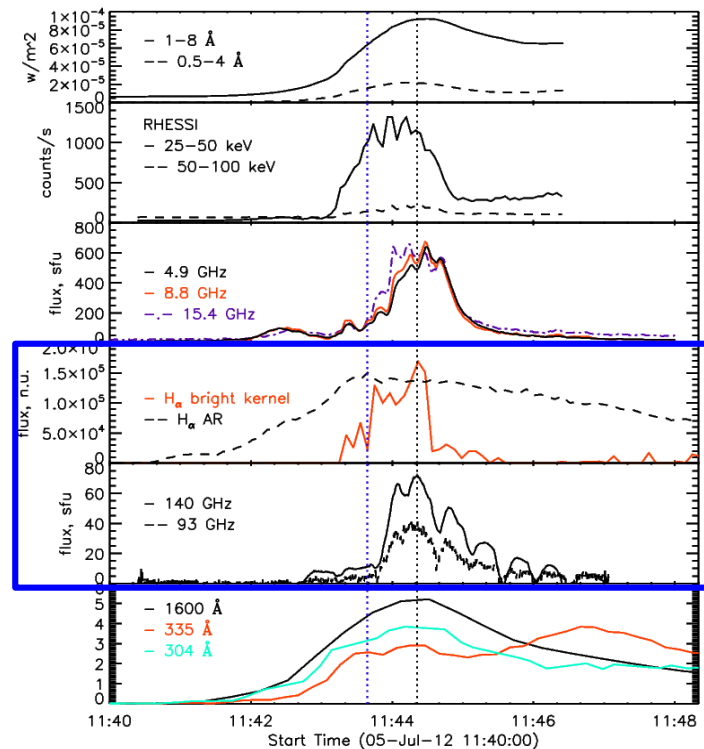


Рис.7. Слева: временные профили рентгеновского, микроволнового H-alpha, суб-ТГц и ультрафиолетового излучения вспышки. Два временных профиля в линии H-alpha были получены: 1) путем интегрирования по всей активной области (выделено желтым боксом на правой панели), 2) из яркого ядра, отмеченного красной стрелкой на правой панели. Справа: изображение источника вспышки в линии H-alpha. Голубыми контурами показано положение источника жесткого рентгеновского излучения в канале 25-50 кэВ, по данным КА RHESSI.

Результаты сравнительного анализа показывают, что **за час** до начала вспышки SOL2012-07-05T11:44, в мягком рентгеновском, $H\alpha$ и суб-ТГц излучении одновременно наблюдались флуктуации (рис.8).

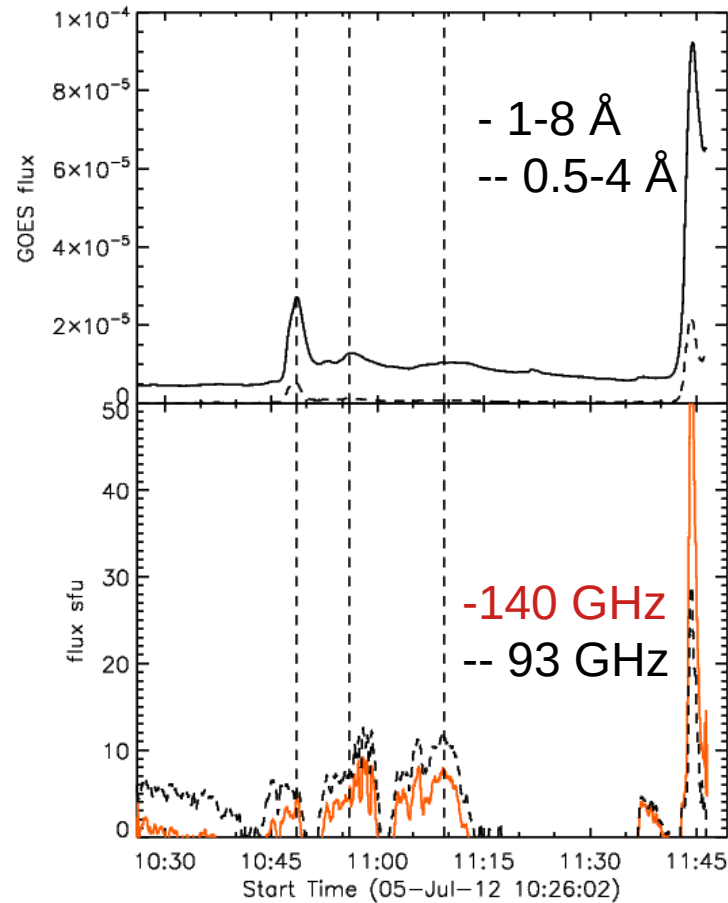
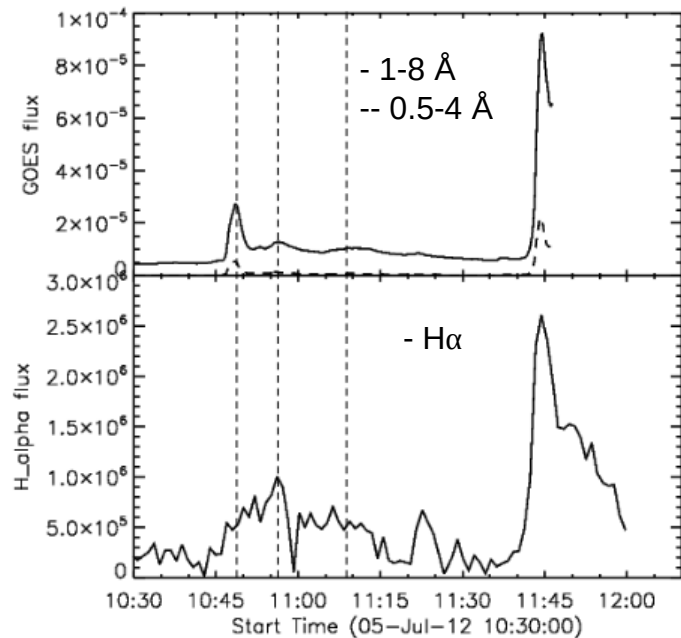


Рис.8. Слева: временные профили мягкого рентгеновского (данные спутника GOES) и $H\alpha$ излучения до начала исследуемой вспышки. Справа: временные профили мягкого рентгеновского (данные спутника GOES) и суб-ТГц (данные радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана) излучения до начала вспышки. Видно, что перед вспышкой одновременно появляется усиление и флуктуации излучения.



Заключение

- Проведен сравнительный анализ временных профилей мягкого рентгеновского, $H\alpha$ и суб-ТГц излучения солнечной вспышки SOL2012-07-05T11:44.
- Показано, что за час до вспышки наблюдалось усиление и флуктуации излучения одновременно в мягком рентгене, суб-ТГц диапазоне и линии $H\alpha$, что может свидетельствовать о нагреве активной области перед вспышкой.
- Суб-ТГц излучение может быть использовано для краткосрочного прогноза солнечных вспышек.

