# СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ПРЕДВЕСТНИК СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

*Смирнова В.В.[1], Цап Ю.Т.[1], Моторина Г.Г.[3,4,5], Моргачев А.С.[3]*

*[1]Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН*
*2ГАО РАН*
*3ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*
*[4]Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences*

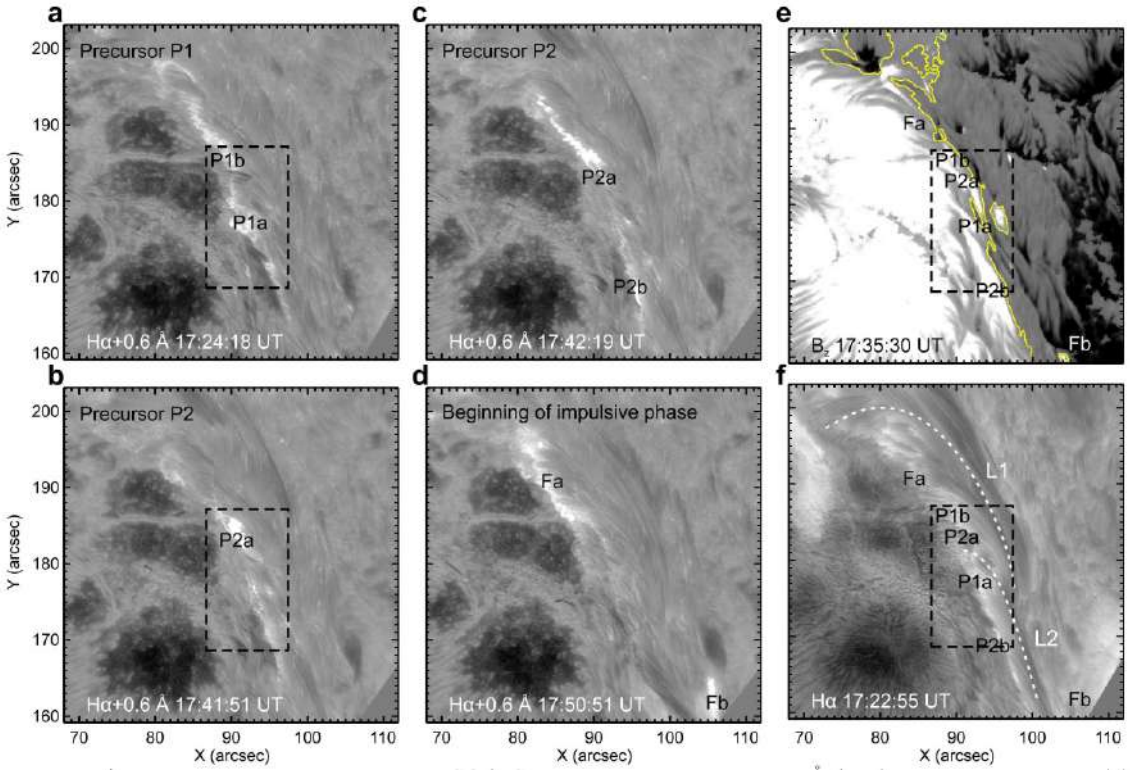



***Рис.1.*** Wang et al., Nature Astronomy 1, 0085 (2017). *BBSO/NST chromospheric Hα + 0.6 Å (a-d) and Hα center-line (f ) images 22 June 2015 M6.5 flare. Brightenings labeled P1a/P1b, P2a/P2b, and Fa/Fb appear during the precursor episodes P1, P2, and at the beginning of the flare impulsive phase, 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_alpa (Рис.1). Было показано, что за несколько минут до вспышки наблюдается усиление яркости в некоторых областях над пятнами – (см. эволюцию предвестникиов P1 и P2 вспышки 22.06.2015), связанных со всплытием магнитного потока.

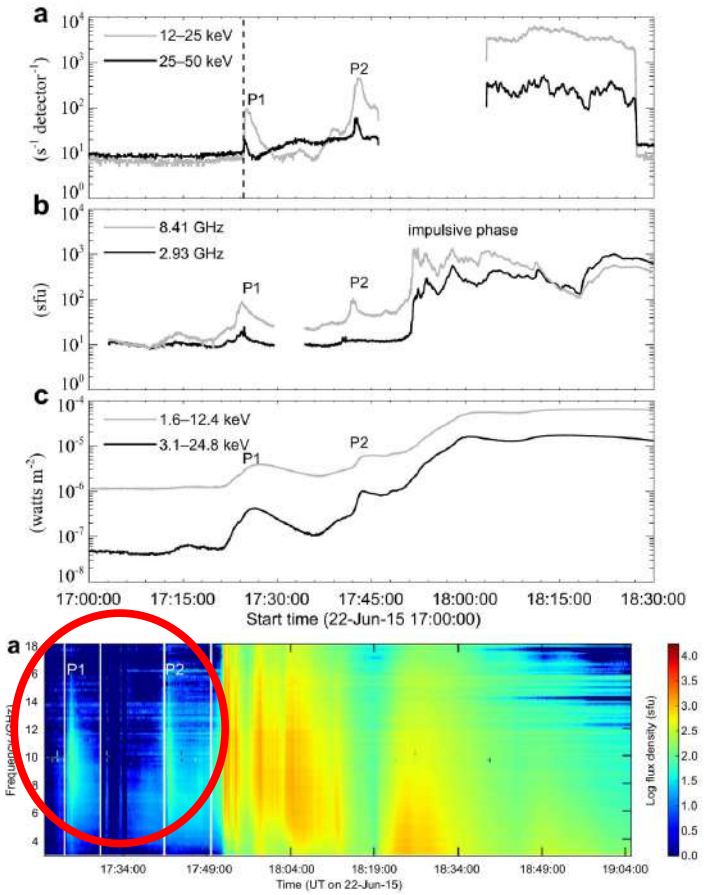



***Рис.2.*** *Временные профили (A) и динамический спектр (B) мв излучения вспышки. P1 и P2 – предвестники, наблюдаемые одновременно в мв и мягком рентгеновском диапазонах (Wang et al. 2017, Nature astronomy 1, 0085).*

**В микроволновом (мв) диапазоне основными предвестниками вспышек являются**:

- флуктуации радиоизлучения за несколько минут до вспышки (Kundu et al. 2001).
- источники над нейтральной линией магнитного поля (Bakunina et al. 2016);
- быстрые и сильные изменения в излучении S-компоненты (переменной составляющей, связанной с излучением АО) (Бакунина 2007);
- уменьшение величины спектрального индекса сантиметрового излучения (вплоть до смены знака в коротковолновой части диапазона) (Bogod et al. 2009);
- квазипериодические колебания радиоизлучения АО (Abramov-Maximov et al. 2020).

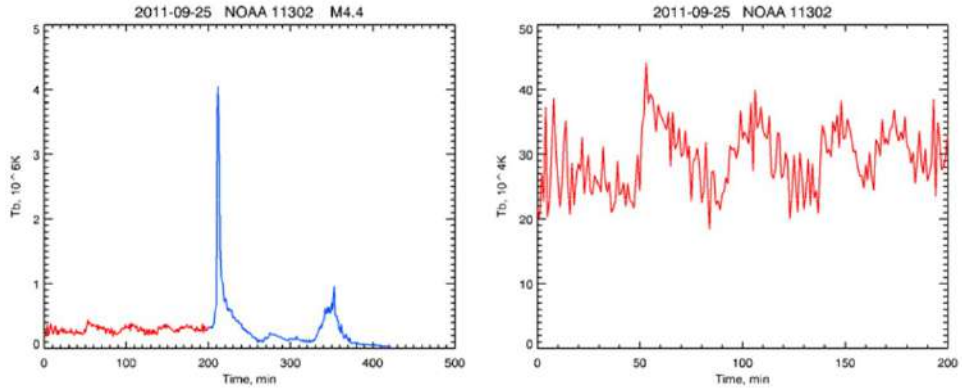



***Рис.3.*** *Левая панель: Временной профиль микроволнового излучения АО NOAA 11302 на волне 1.76 см в интенсивности по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма 25 сентября 2011 г. Красным цветом обозначен предвспышечный фрагмент профиля. Правая панель: Фрагмент временного профиля микроволнового излучения АО NOAA 11302, обозначенный на левой панели красным цветом. На обеих панелях оси абсцисс – время в минутах, оси ординат – максимальная яркостная температура по FOV (Абрамов-Максимов и Бакунина, 2020).*

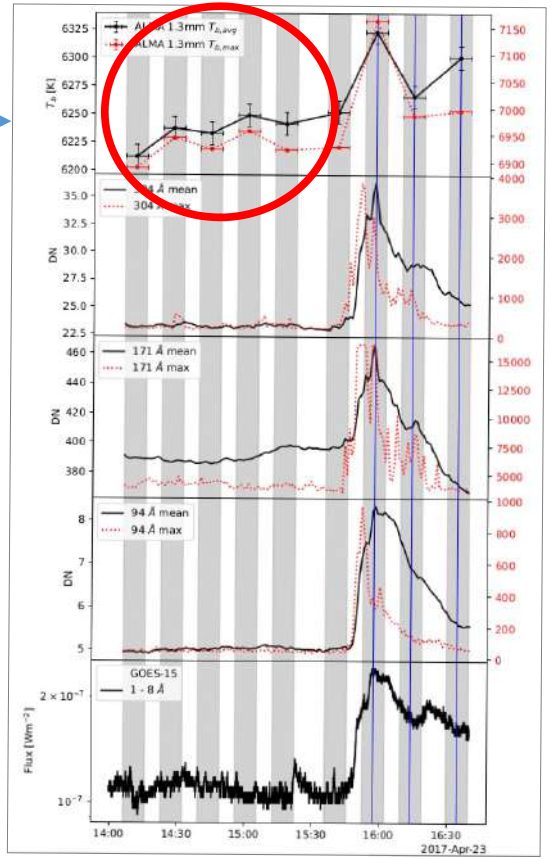
Исследования излучения АО в **суб-терагерцовом** (суб-ТГц) диапазоне, на частоте 93 ГГц с разрешением 2,8’ показали, что повышение уровня излучения из области вблизи нейтральной линии магнитного поля приводит к заметному увеличению вероятности возникновения мощных вспышек (Raulin et al. 1997). Аналогичные результаты получены на частоте 37 ГГц (Pohjolainen et al. 1997).

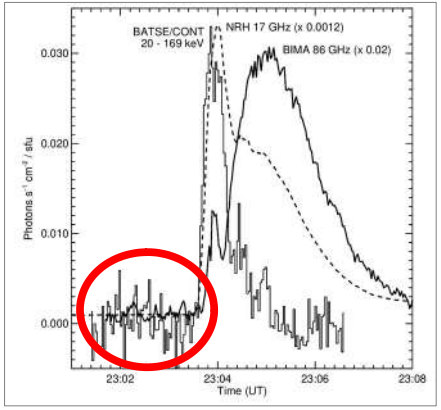
Также, были выявлены квази-периодические пульсации суб-ТГц излучения на частоте 86 ГГц за несколько минут перед вспышками (Рис.4).

На рис.5 показаны временные профили излучения вспышки 23.04.2017, в том числе и на частоте 230 ГГц, полученные по новым наблюдениям на радиоинтерферометре ALMA. Красным кружком указаны флуктуации радиоизлучения перед импульсной фазой.

**НО: Нет достоверных данных об источнике суб-ТГц излучения вспышки.**

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)



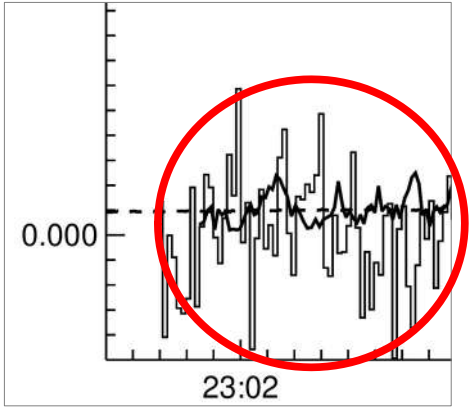




*Рис.4. Слева: временные профили вспышки GOES класса B5.6, произошедшей 16.08.1994 (Raulin et al 1997). Сплошной линией показан всплеск на частоте 86 ГГц. Красным кружком обобзначена предимпульсная фаза вспышки. Справа: увеличенная часть временных профилей перед импульсной фазой. Заметны квази-периодические пульсации суб-ТГц излучения.*

***Рис.5.*** *Временные профили потока излучения вспышки (сверху-вниз): 230 ГГц (ALMA), линии КУФ: 304 А, 171 А, 94 А, 1-8 А (Skokić et al., 2022). Видны заметные вариации суб-ТГц радиоизлучения.*

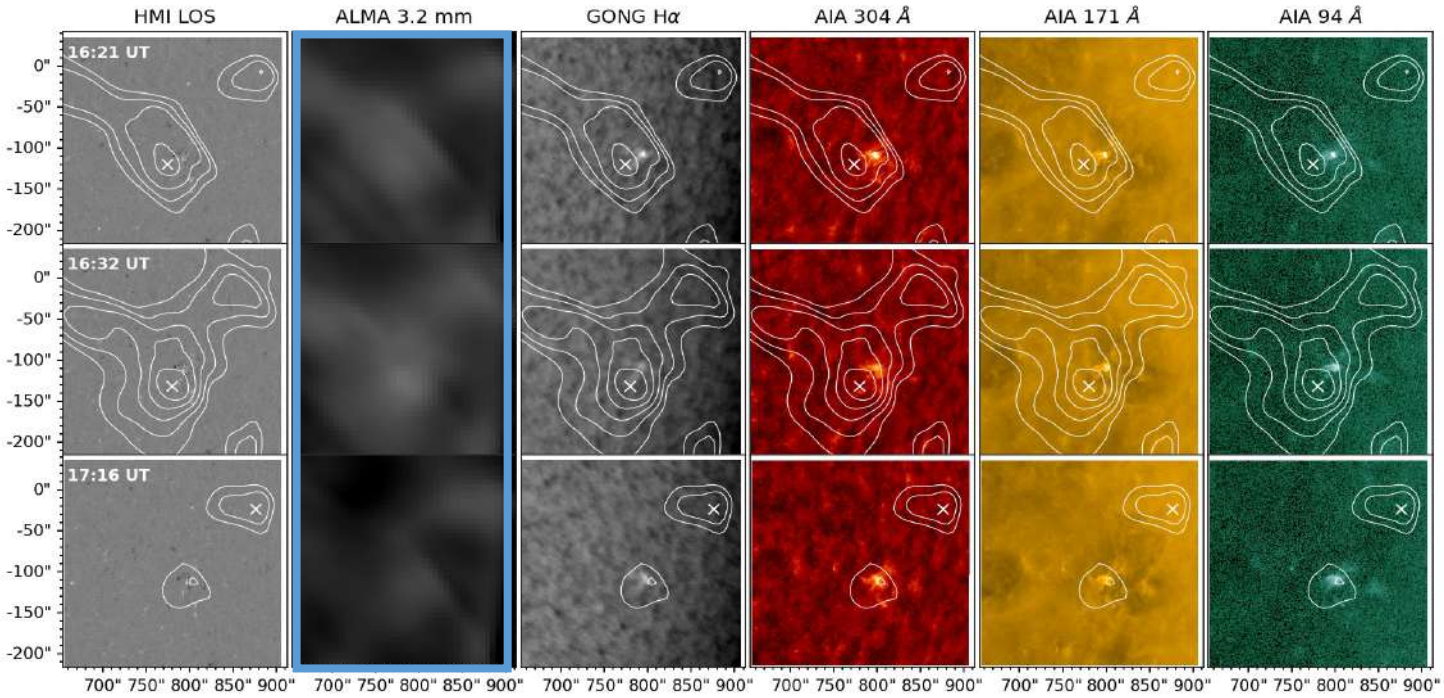
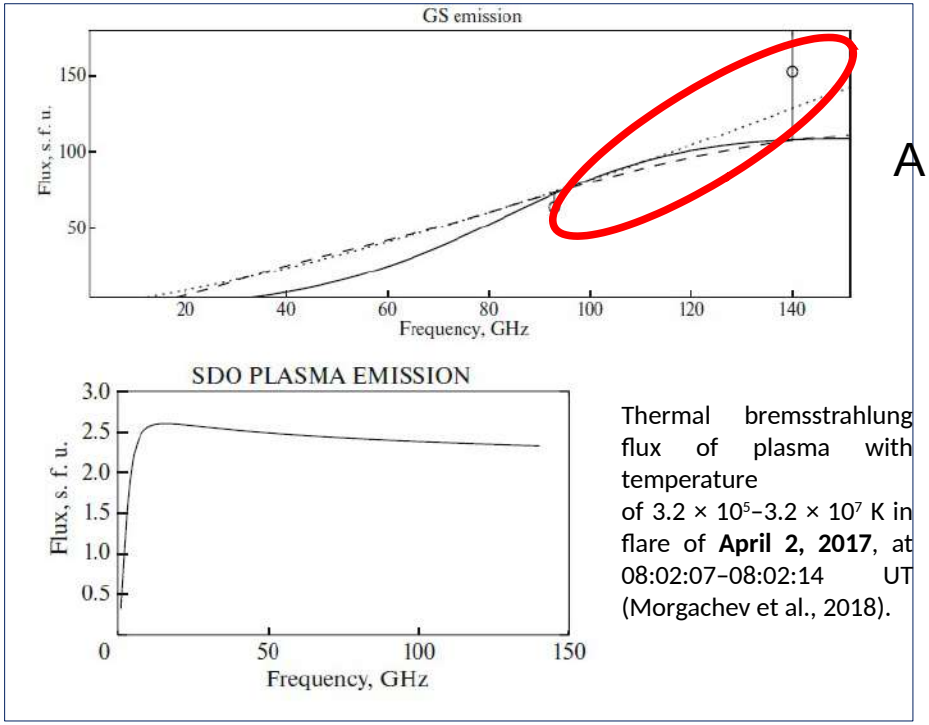



*Рис.6. Изображения источника вспышки в нескольких диапазонах. Синим прямоугольником выделены изображения, полученные на радиоинтерферометре ALMA? на частоте 93 ГГц (Skokić et al., 2023). Видно, что радиоизображения не всегда совпадают с источниками, наблюдаемыми в других диапазонах, и едва ли их можно отождествить со вспышками.*

**Выводом** *работы (Skokić et al., 2023) является то, что как горячая, так и холодная плазма может быть источником усиления суб-ТГц излучения вспышек. Излучение тепловое тормозное (free-free). Миллиметровые источники могут соответствовать основаниям или вершинами «горячих» корональных петель, пост-вспышечным петлям, а в некоторых случаях их вообще не удается отождествить с какими-либо магнитными структурами, или источниками, наблюдаемыми в других диапазонах. Сценарий вспышки, при котором нагрев хромосферы вызван пучком электронов, требует пересмотра.*

# Тепловое излучение от горячей корональной плазмы:




A

B

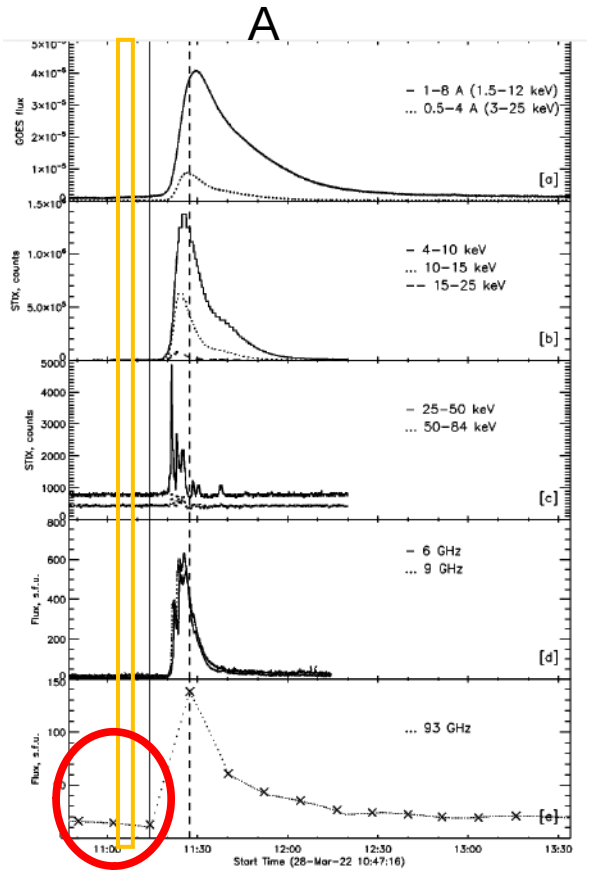
Thermal bremsstrahlung flux of plasma with temperature of $3.2 \times 10^5$–$3.2 \times 10^7$ K in flare of **April 2, 2017**, at 08:02:07–08:02:14 UT (Morgachev et al., 2018).

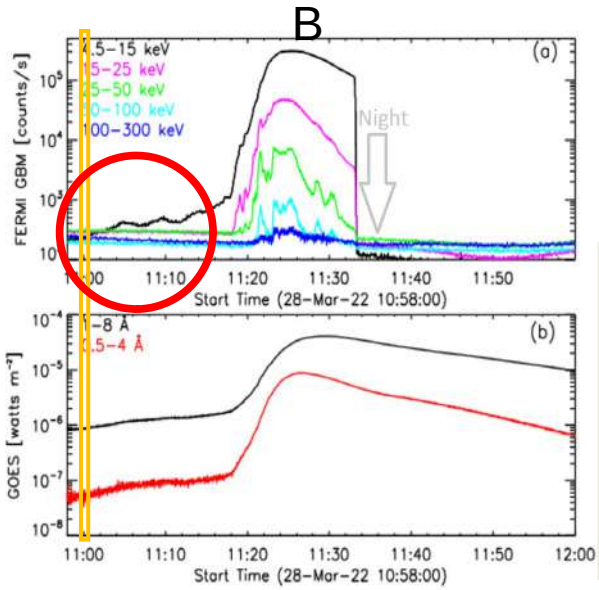
- **Однако, ранее было показано, что горячая корональная плазма не дает значительный вклад в мм излучение** (Trottet et al. 2002, Tsap et al., 2016, 2018), что частично противоречит результатам Skokić et al. (2022). Источник нагрева хромосферной плазмы может быть связан с:
- ускоренными электронами,
- тепловыми потоками,
- ударными волнами,
- энерговыделением in situ.

*Рис.7. А: наблюдаемый спектр плотности потока радиоизлучения вспышки 2.04.2017. В: расчетный спектр радиоизлучения горячей корональной плазмы по данным AIA/SDO.*

*Цель работы – выяснить природу нагрева переходной области и верхней хромосферы Солнца, акцентируя внимание на в начальной фазе солнечной вспышки, что позволяет получить важную информацию о природе предвестников солнечных вспышек.*

Вспышка 2022.03.28 (M4.0):
Для анализа источника нагрева в предимпульсной фазе была выбрана солнечная вспышка SOL2022-03-28T105800. Эта вспышка наблюдалась на частоте 93 ГГц, на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также, на ряде других инструментов. Временные профили вспышки представлены на Рис.8 (A). Вспышка SOL2022-03-28T105800 рентгеновского класса M4.0 произошла в АО 12975 в 10:58-11:45 UT и имела максимум суб-ТГц излучения в 11:28 UT. В предимпульсной фазе вспышки, поток суб-ТГц излучения составлял (при вычитании фона от спокойного Солнца и учета погрешностей наблюдений) ~ 20 ± 5 с.е.п. На рис.8.(B) представлены временные профили рентгеновского излучения вспышки по данным спутников FERMI и GOES. Красным кружком показаны пульсации излучения в мягком рентгене. Спектр плотности потока радиоизлучения показан на рис. 8 (C).



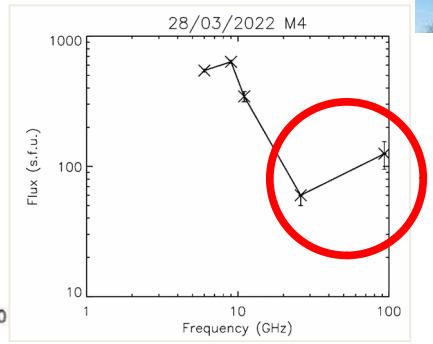



*Рис.8. A: временные профили вспышки 28.03.2022. B: расчетный спектр радиоизлучения горячей корональной плазмы по данным AIA/SDO. B: временные профили рентгеновского излучения вспышки. C: Спектр плотности потока радиоизлучения вспышки. Положительный наклон спектра между частотами 26 и 93 ГГц = 0.6.*

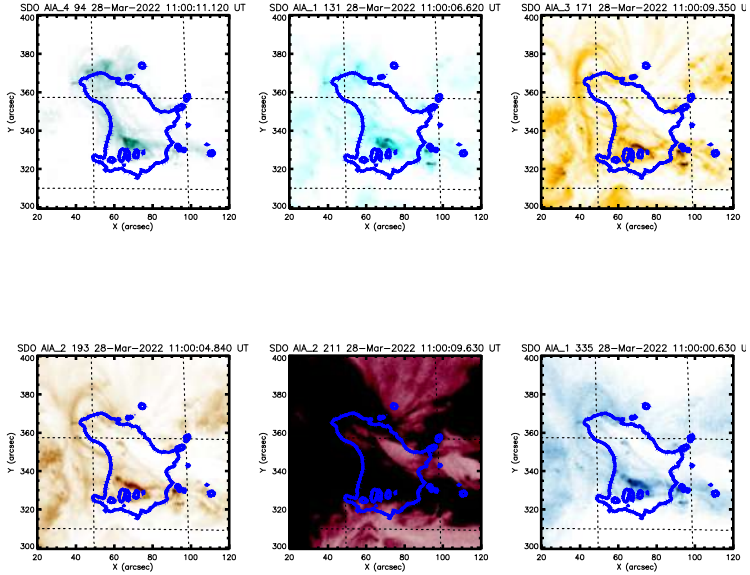



*Рис.9. Карты распределения интенсивности ультрафиолетового излучения для начальной фазы вспышки. Синим контуром обозначена область источника вспышки (для расчета площади источника).*

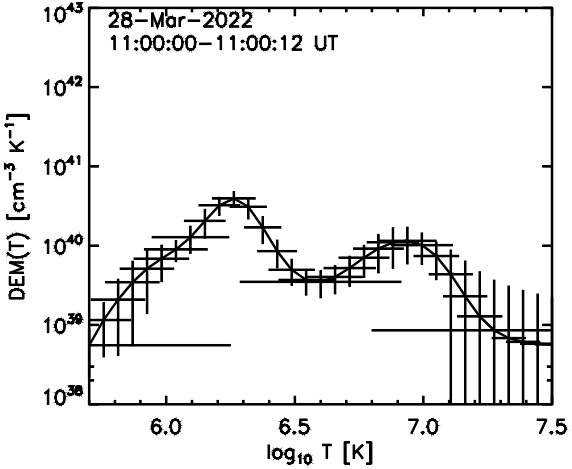



*Рис.10. Дифференциальная мера эмиссии **Φ(T)** по данным AIA/SDO (0.5 МК ≤ T ≤ 32 МК).*

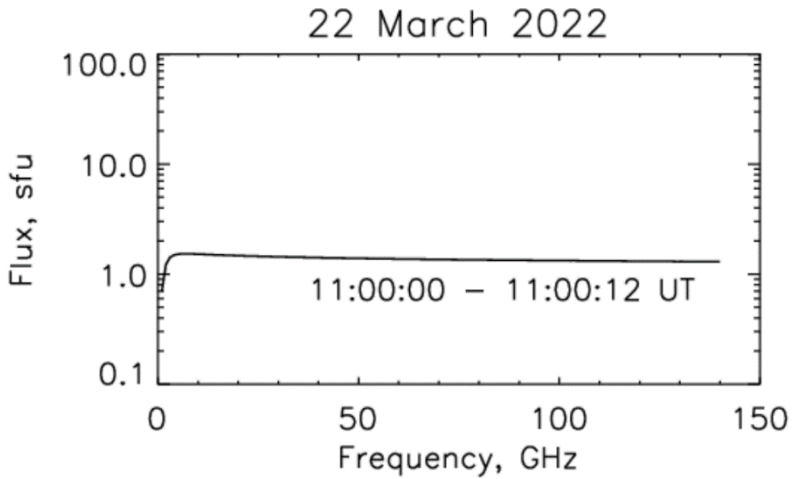
$$\phi(T) = n_e^2 \frac{dl}{dT} \quad ¿\frac{\mathrm{dEM}}{\mathrm{dT}}$$

Используя данные спутника AIA/SDO о КУФ излучении вспышки (Рис.9, Lemen et al., 2012) для начальной фазы вспышки (11:00:00–11:00:12 UT), с помощью метода регуляризации Тихонова (Тихонов, Арсенин 1979; Hannah, Kontar, 2012) нами было проведено восстановление дифференциальной меры эмиссии (DEM) (Рис.10).

## Радиоизлучение горячей плазмы

На основе распределения дифференциальной меры эмиссии *ϕ(T)* был выполнен расчет миллиметрового излучения для интегральной яркостной температуры *Tb* и наблюдаемого спектрального потока *Fv* теплового тормозного излучения согласно формулам (Dulk G.A., 1985; Tsap et al., 2016). Расчетный спектр плотности потока радиоизлучения представлен на рис.11. Видно, что в начальной фазе вспышки, где наблюдаемый поток суб-ТГц излучения уже достигает 20 с.е.п., **вклад корональной плазмы пренебрежимо мал.**

$$T_b(\nu) = \frac{1}{\nu^2}\int_{T_{min}}^{T_{max}} \frac{K\phi(T)}{\sqrt{T}} e^{-\tau_\nu(T)} dT \qquad \tau_\nu = \int_{T_{min}}^{T_{max}} \frac{K\phi(T)}{T^{3/2}\nu^2} dT \qquad F_\nu = \frac{2k_B\nu^2}{c^2} T_b(\nu)\frac{S}{R^2}$$

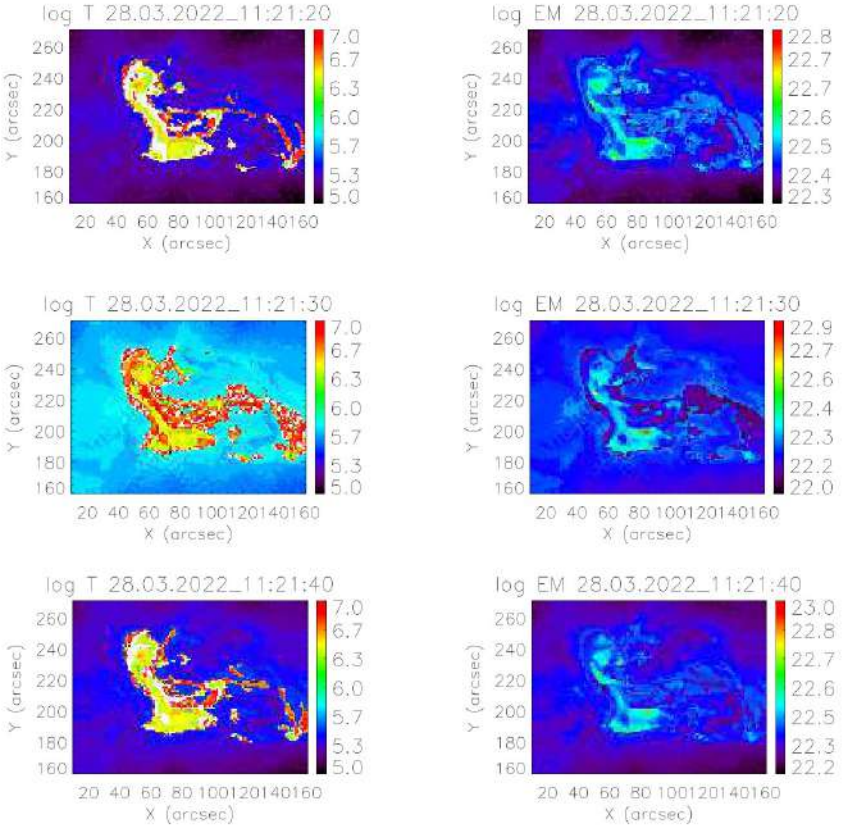



$Flux_{93}$ = 20±5 сеп

Расчетный $Flux_{93}$ = 1.5 сеп

*Рис.11. Расчетный спектр плотности потока радиоизлучения корональной плазмы.*

# Тепловая неустойчивость перед импульсной фазой вспышки




Используя данные спутника AIA/SDO о КУФ излучении вспышки и результаты расчета DEM, мы построили карты распределения температуры и меры эмиссии в источнике вспышки с шагом 12 с. Три набора карт показаны на рис.12. Видно, что перед импульсной фазой вспышки температура уменьшается, что может быть связано с развитием тепловой неустойчивости в горячих корональных петлях с температурой, порядка $10^6$ К. На рис. 13 представлены графики функции радиационных потерь, согласно разлиичным моделям.

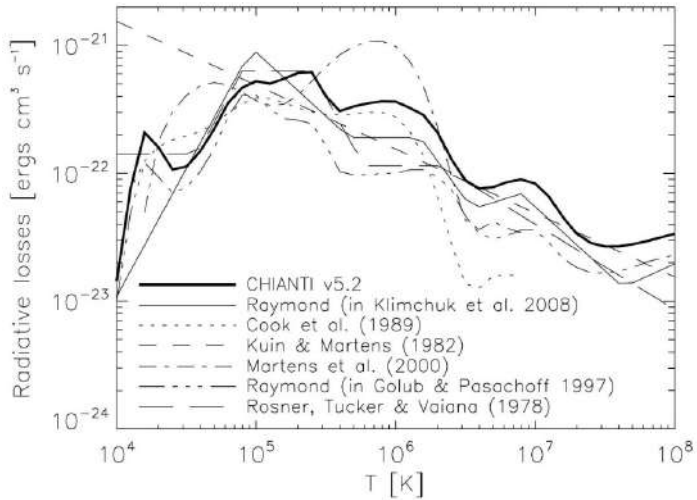



*Рис.13. Карты распределения температуры и меры эмиссии в источнике вспышки.*

*Рис.13. Модельные кривые функции радиационных потерь (Derteev et al. 2023).*

# Заключение

Для вспышки 28-Mar-2022 проведена оценка вклада корональной вспышечной плазмы и ускоренных электронов в генерацию суб-ТГц излучения в начальной фазе и около максимума суб-ТГц излучения.

Показано, что вспышечная корональная плазма вносит несущественный вклад в наблюдаемое миллиметровое излучение на частоте 93 ГГц.

Развитие тепловой неустойчивости в корональных петлях может оказывать существенное влияние на генерацию миллиметрового излучения в предимпульсной фазе.

Нагрев вспышечной хромосферы скорее происходил *in situ* в результате джоулевой диссипации электрических токов (Stepanov, Zaitsev, 2016).