



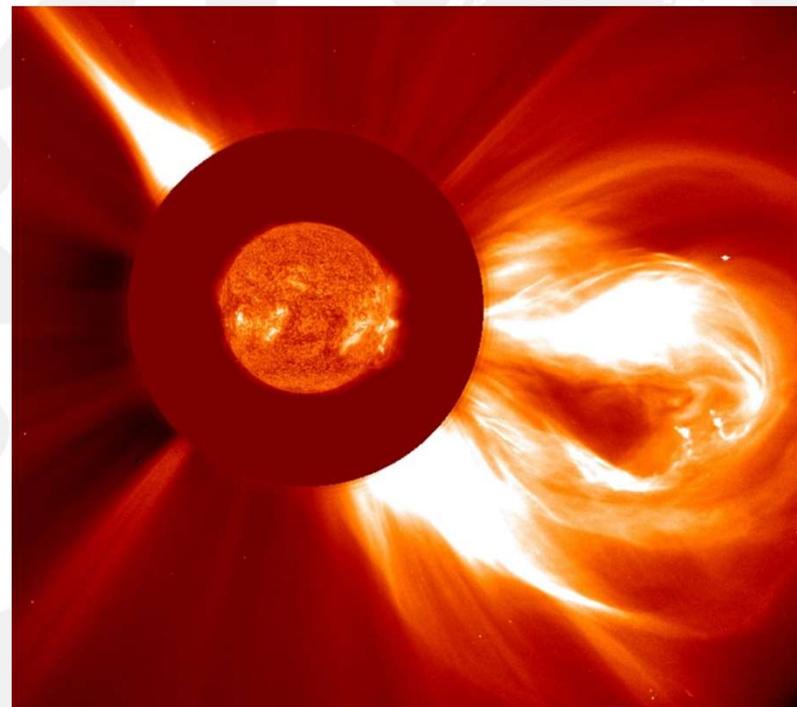
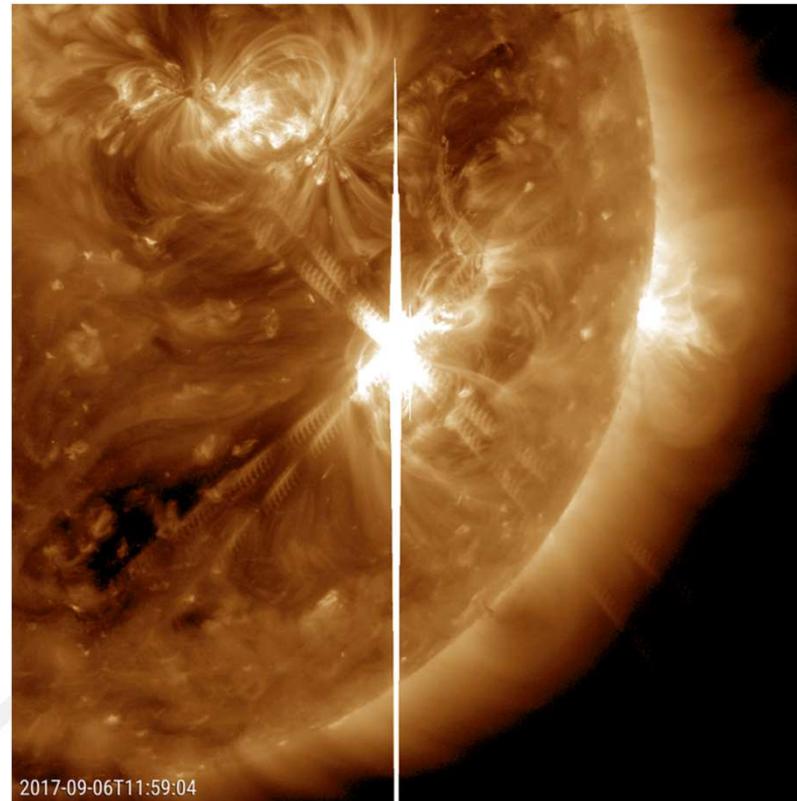
# Наблюдения Солнца на Сибирском Радиогелиографе

Кузнецов А.А.

*Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН (Иркутск, Россия)*

## Солнечная радиоастрономия

- Солнечные вспышки и связанные с ними корональные выбросы массы являются главными факторами, определяющими космическую погоду. Их причина – процессы выделения магнитной энергии в солнечной короне.
- В оптическом и рентгеновском диапазонах солнечная корона практически прозрачна и невидима.
- С другой стороны, радио- и микроволновое излучение генерируется непосредственно в короне. Радиоизлучение крайне чувствительно к параметрам плазмы, магнитного поля и ускоренных частиц.
- Раскрытие диагностического потенциала солнечной радиоастрономии требует:
  - а) наблюдений с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением;
  - б) методов решения обратной задачи – восстановления параметров источника по радионаблюдениям.



# Сибирский Радиогелиограф (СРГ)



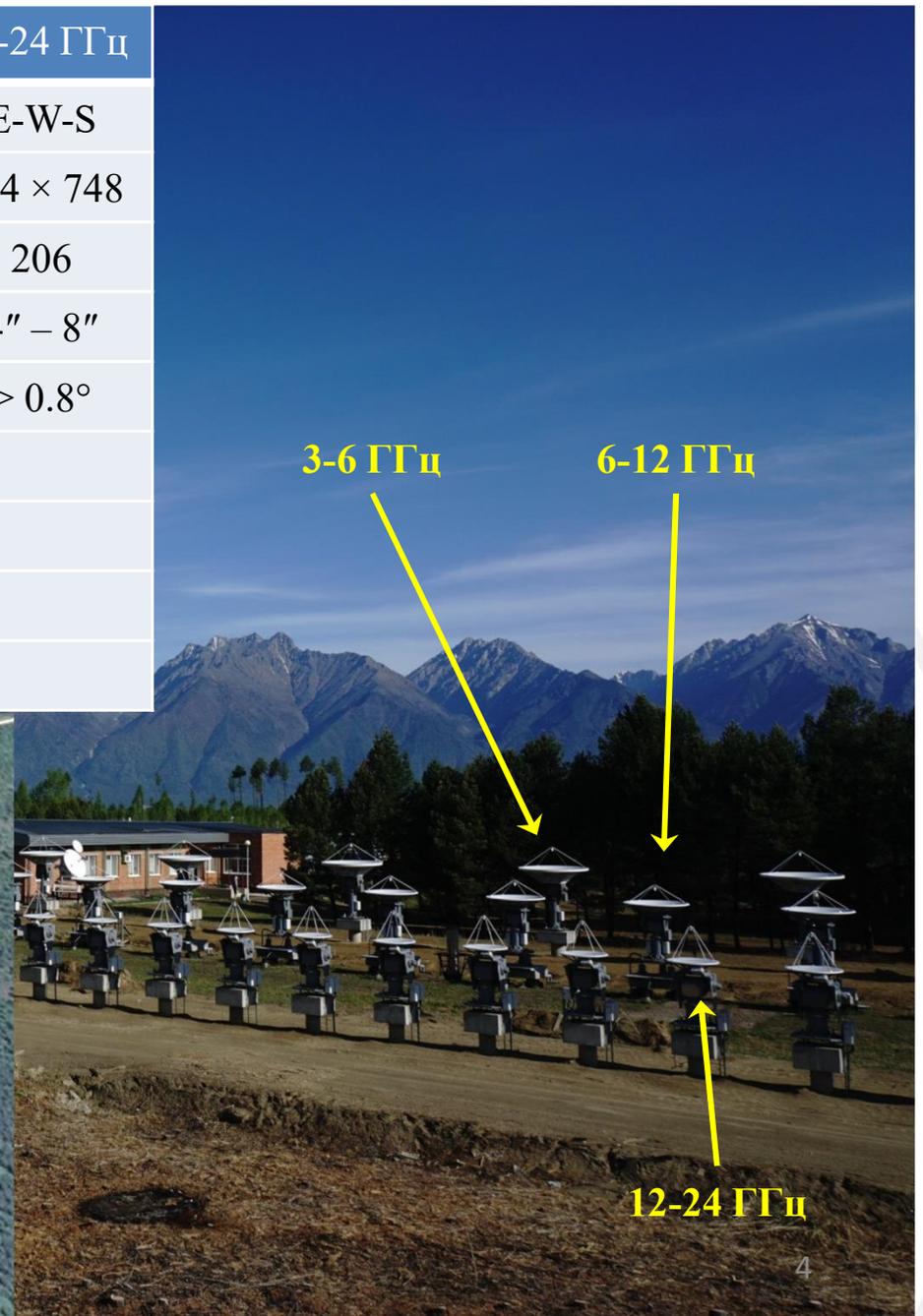
- Разработан и построен в ИСЗФ СО РАН.
- Входит в Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук.
- Расположен в Радиоастрономической обсерватории им. проф. Г.Я. Смолькова (в Тункинской долине, респ. Бурятия, 220 км от Иркутска, N51 E102).



# Сибирский Радиогелиограф (СРГ)

Сибирский Радиогелиограф состоит из трёх Т-образных антенных решёток, работающих в диапазонах частот 3-6, 6-12 и 12-24 ГГц.

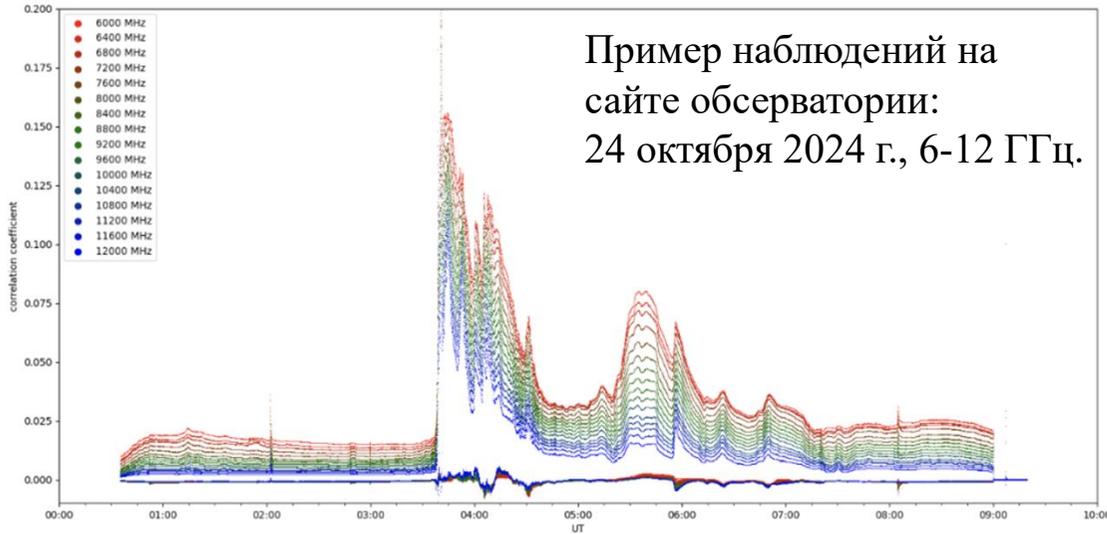
	3-6 ГГц	6-12 ГГц	12-24 ГГц
Конфигурация	E-W-N	E-W-S	E-W-S
База, м	323 × 941	311 × 622	374 × 748
Число антенн	128	192	206
Угловое разрешение	12" – 24"	9" – 18"	4" – 8"
Поле зрения	> 1.0°	> 0.8°	> 0.8°
Поляризация	обе круговые		
Спектральное разрешение	10 МГц		
Временное разрешение	0.2 с / канал		
Макс. число частотных каналов	1024		



# Сибирский Радиогелиограф (СРГ)

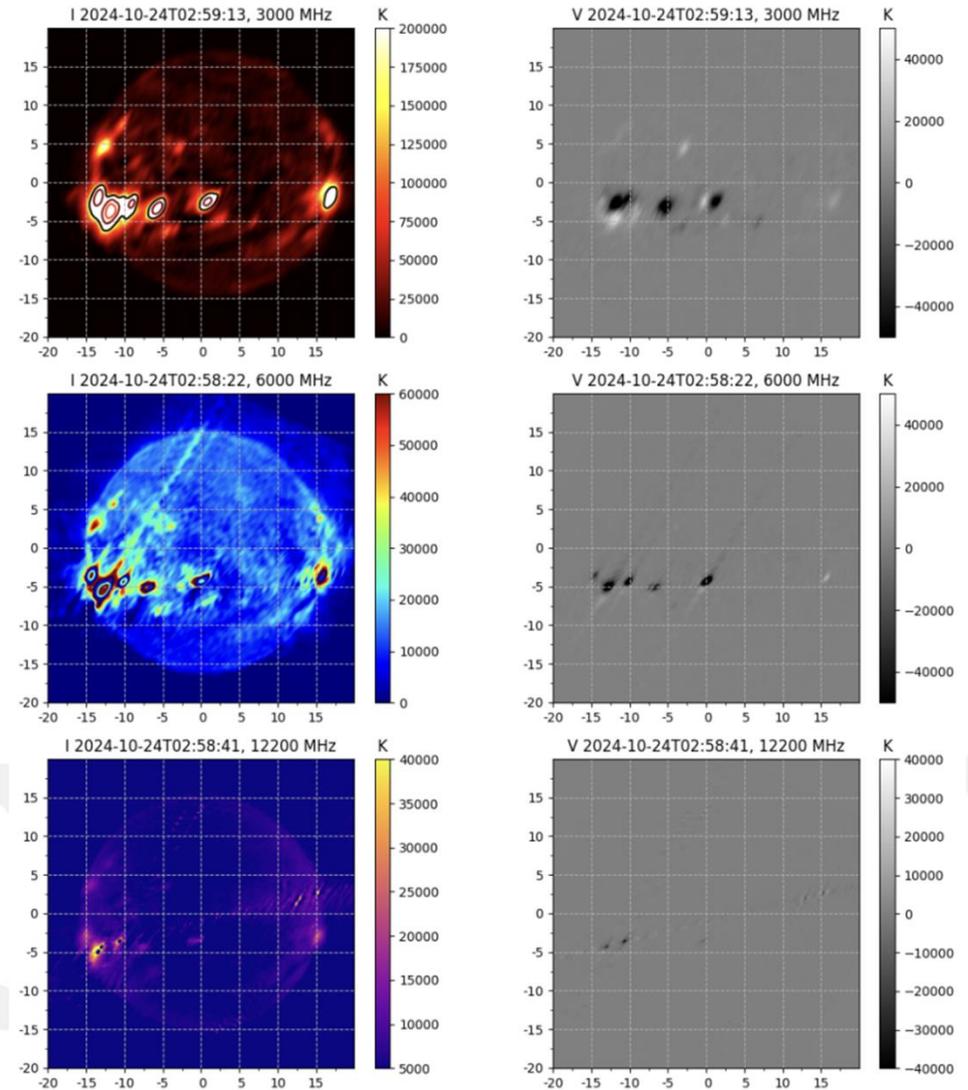


<https://badary.iszf.irk.ru/srhDaily.php>

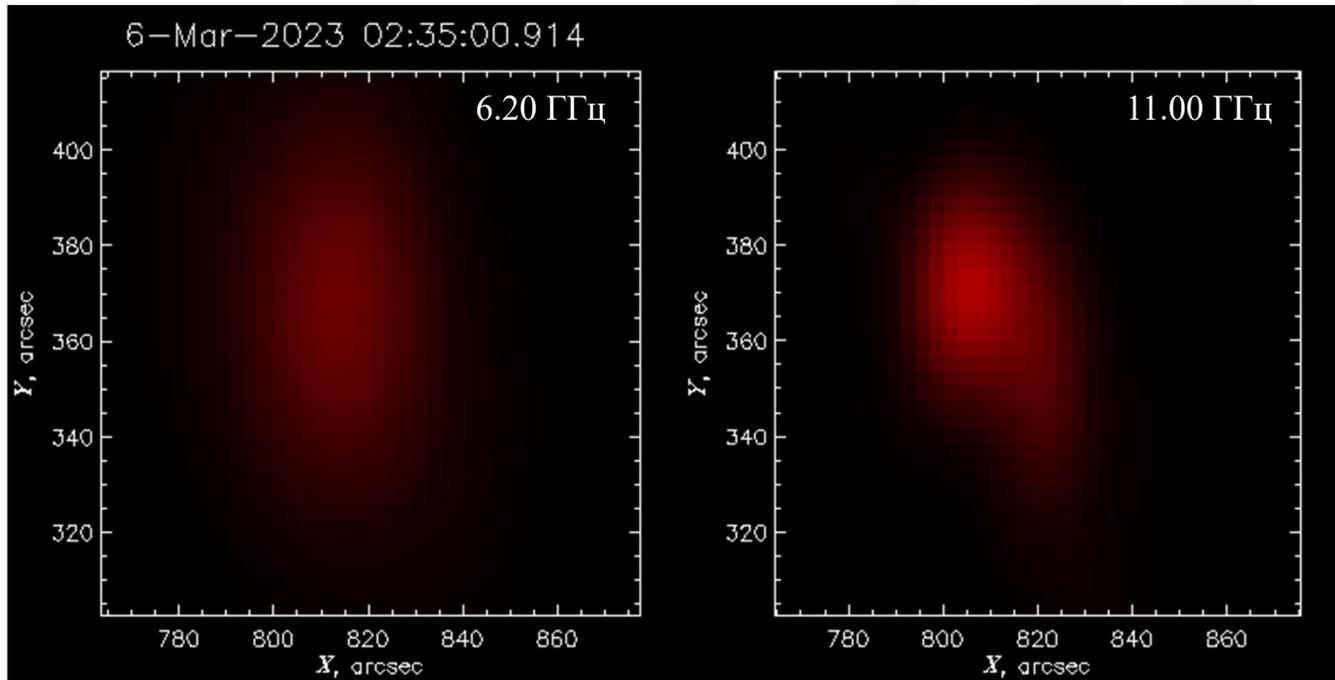
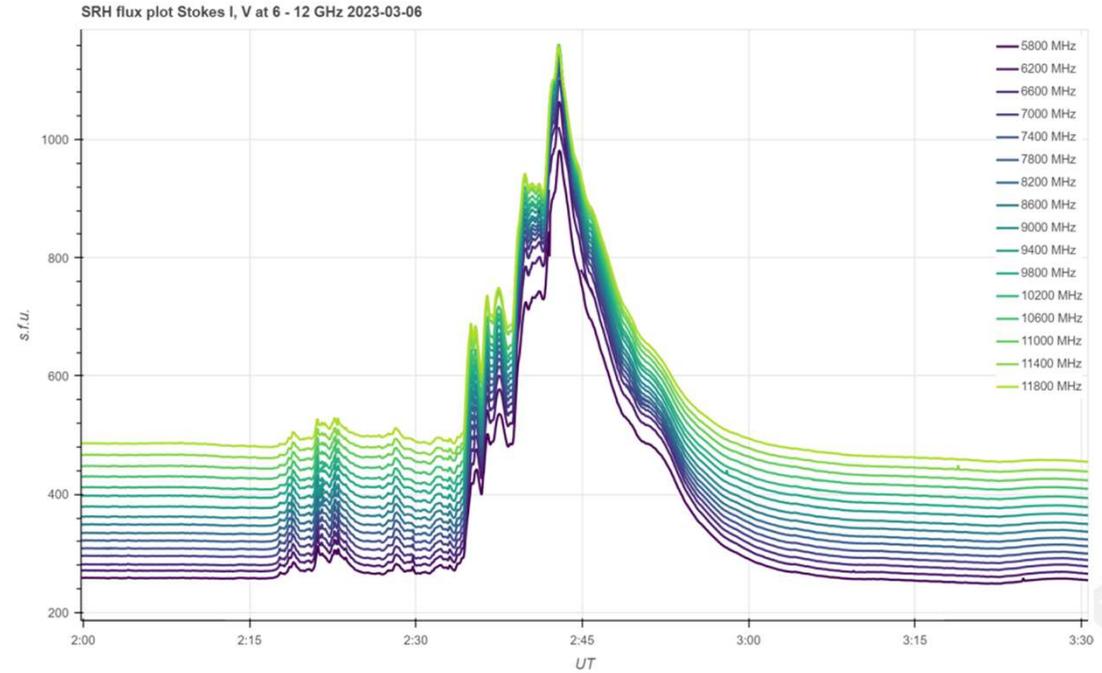
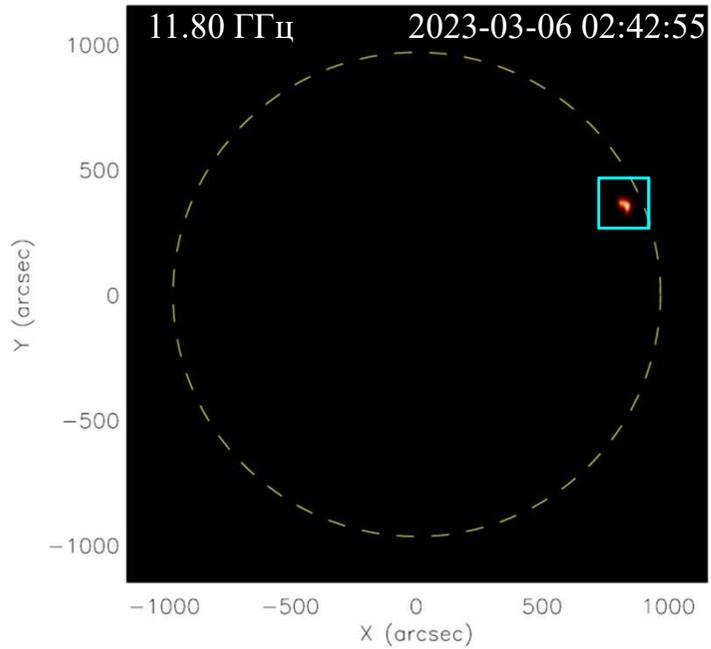


Пример наблюдений на сайте обсерватории:  
24 октября 2024 г., 6-12 ГГц.

- Регулярные наблюдения в полной конфигурации (3-24 ГГц) начались в декабре 2023 г.
- Наблюдения в режиме тестирования (на отдельных решётках) доступны с марта 2021 г.
- Текущий режим наблюдений:
  - 16 эквидистантных частотных каналов в каждом частотном диапазоне (всего 48);
  - временное разрешение:  $\sim 3$  с.

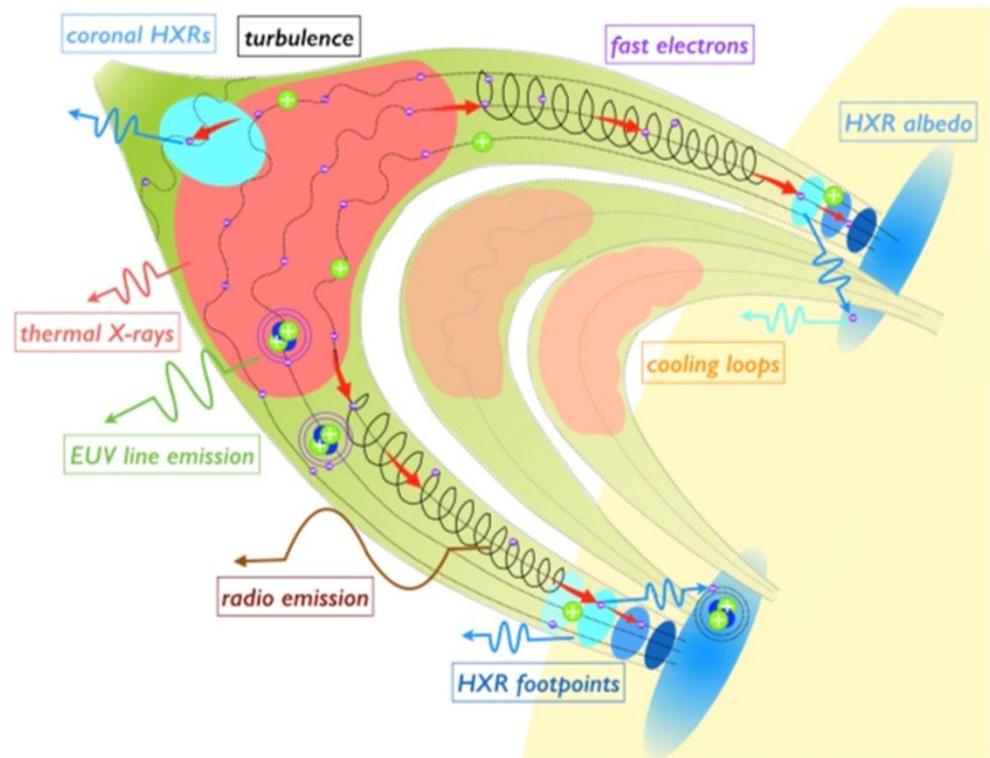
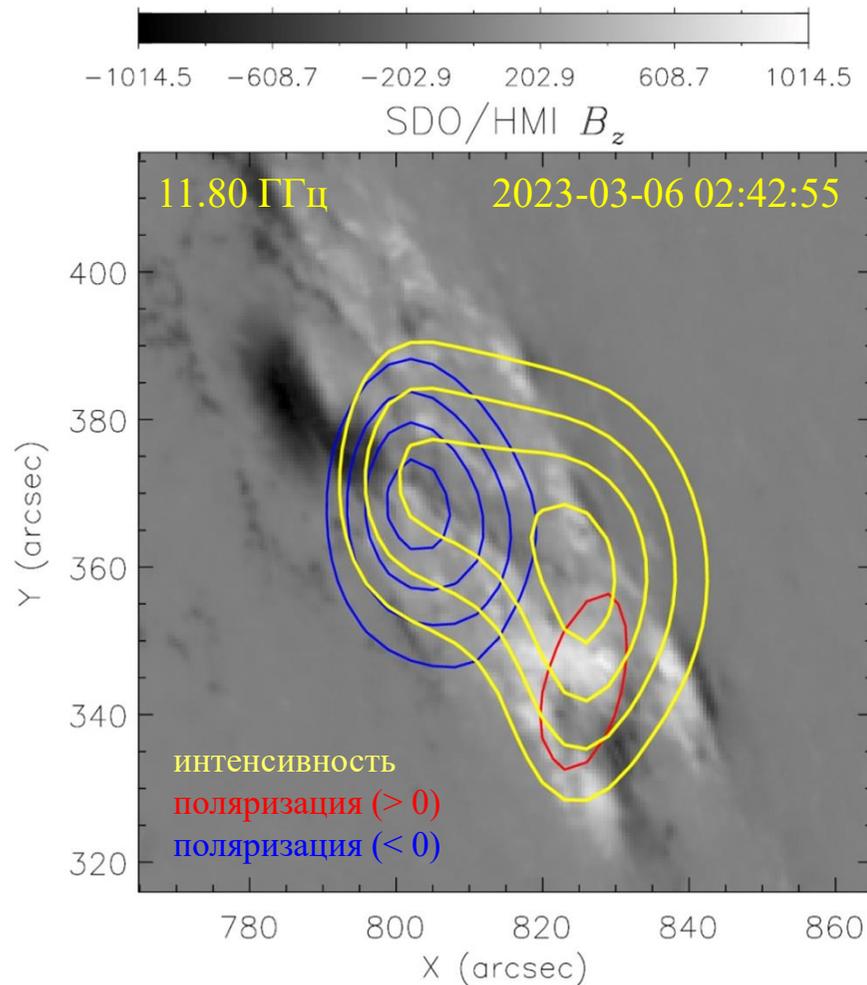


# Сибирский Радиогелиограф – наблюдения солнечных вспышек



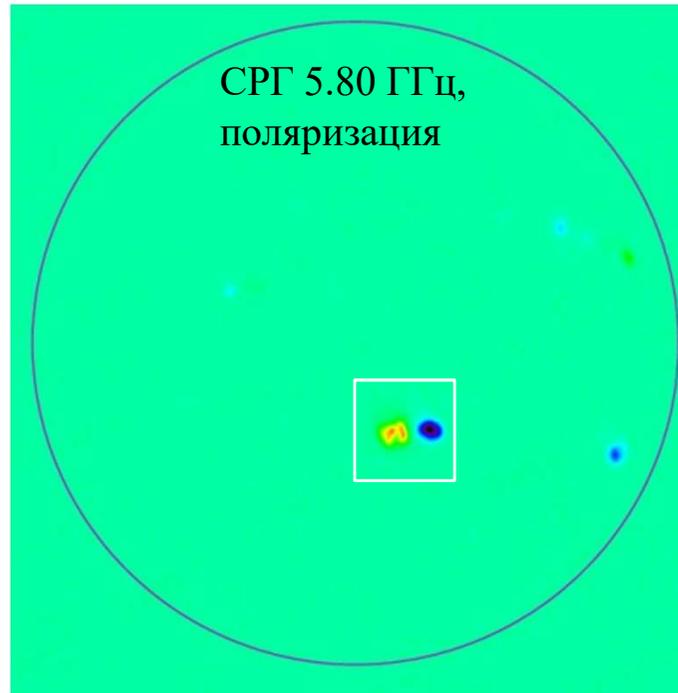
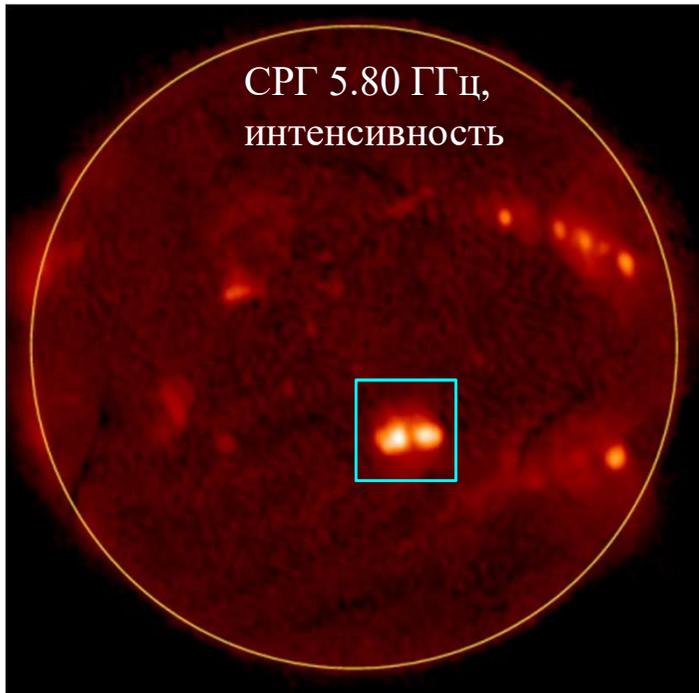
Изображения и временные профили вспышки 6 марта 2023 г.  
Класс по GOES: M5.8.

# Сибирский Радиогелиограф – наблюдения солнечных вспышек



- Источник микроволнового излучения: ускоренные электроны ( $\sim 0.1 - 10$  МэВ), захваченные в магнитном поле.
- Ускоренные электроны захвачены в корональной вспышечной петле и сконцентрированы вблизи её вершины.
- Механизм излучения: гиротронный.

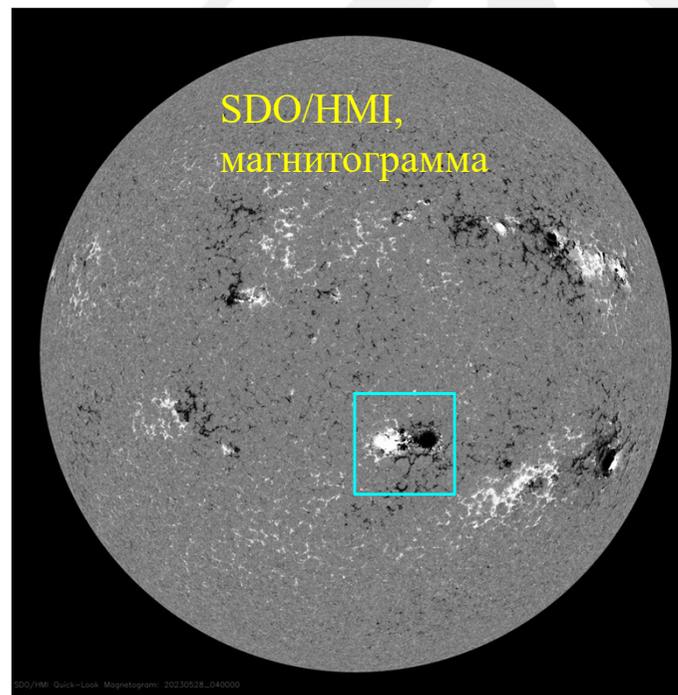
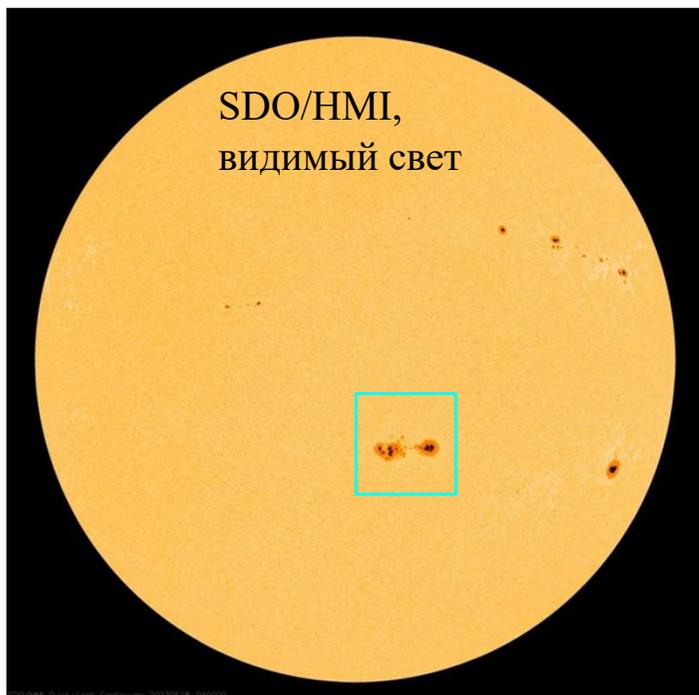
# Сибирский Радиогелиограф – наблюдения солнечных активных областей



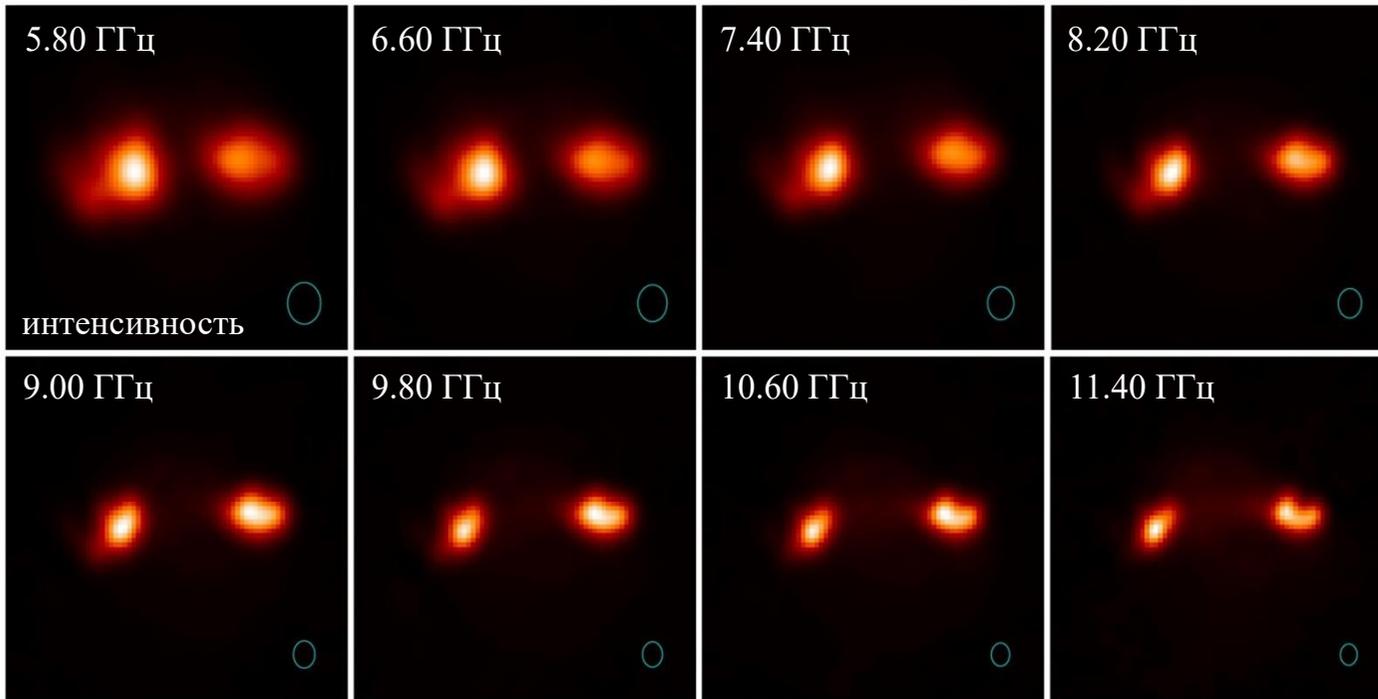
Изображения Солнца  
28 мая 2023 г.

Наиболее яркий  
микроволновый  
источник – активная  
область AR 13315.

Изображение Солнца  
(на одной частоте)  
создаётся за 0.2 с.

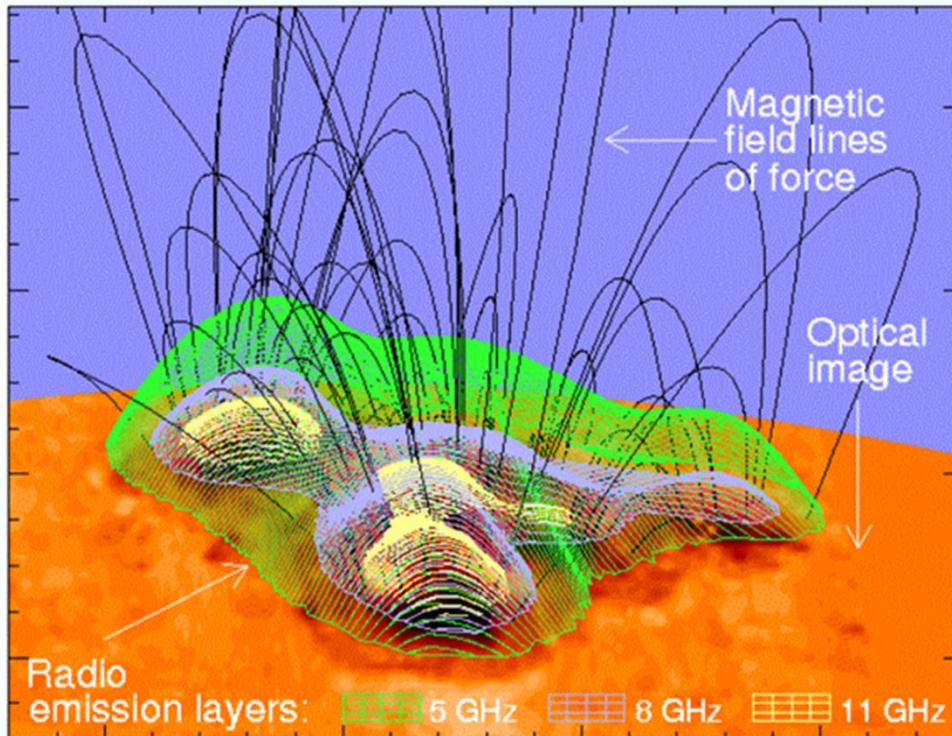


# Сибирский Радиогелиограф – наблюдения солнечных активных областей



Изображения активной области AR 13315 (28 мая 2023 г.) на разных частотах.

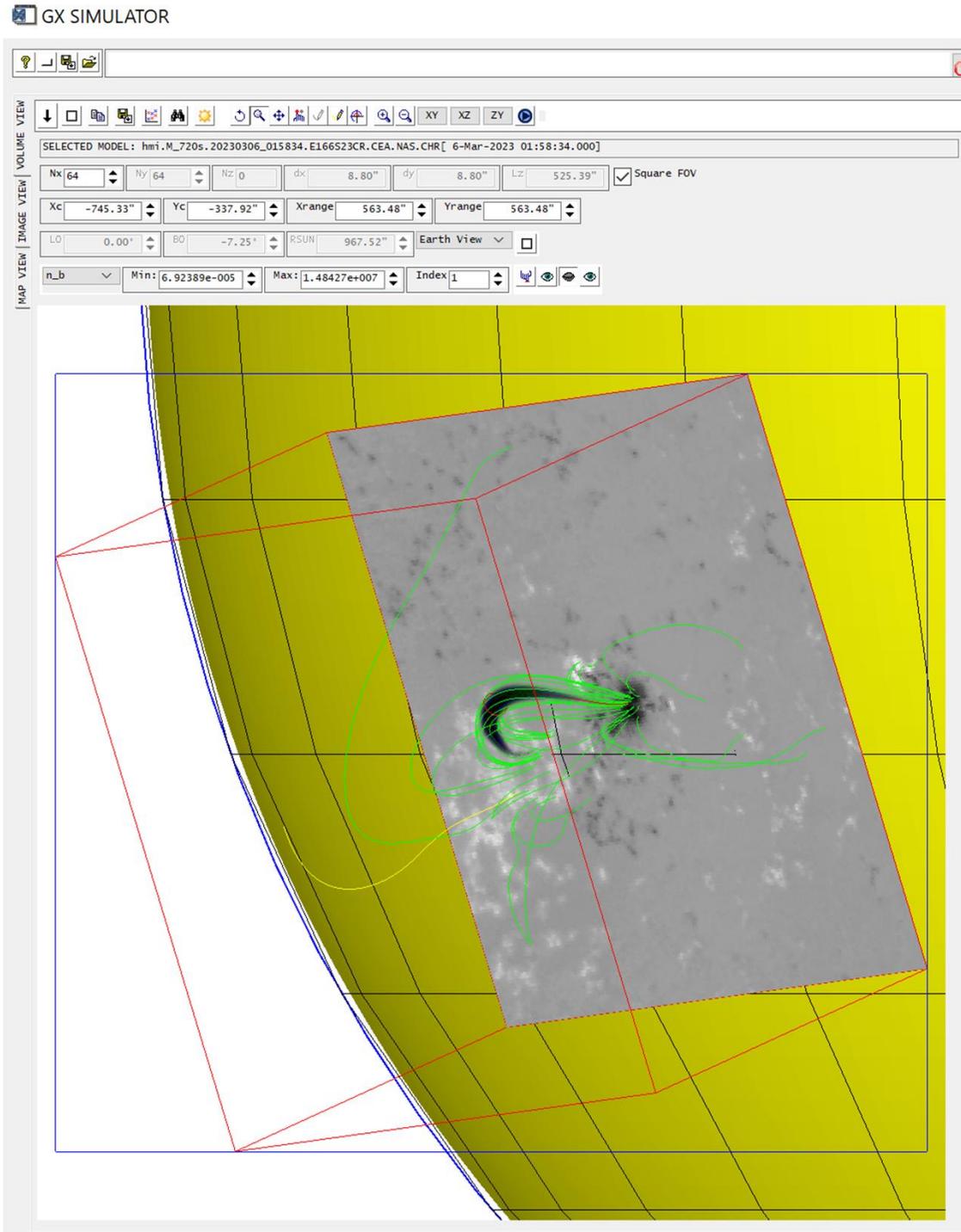
- Источник излучения: тепловые электроны ( $\sim 1 - 3$  МК) в магнитном поле над солнечными пятнами.
- Механизм излучения: гирорезонансный.
- Излучение генерируется на гирорезонансных уровнях – поверхностях постоянной напряжённости магнитного поля.



## Восстановление параметров источника излучения по наблюдениям (forward-fitting)



# Интерактивная система моделирования GX Simulator



## GX Simulator:

- программный пакет на языке IDL для моделирования солнечного микроволнового, рентгеновского и УФ излучений;
- входит в состав пакета SolarSoft;
- разрабатывается с 2010 г.

## Авторы:

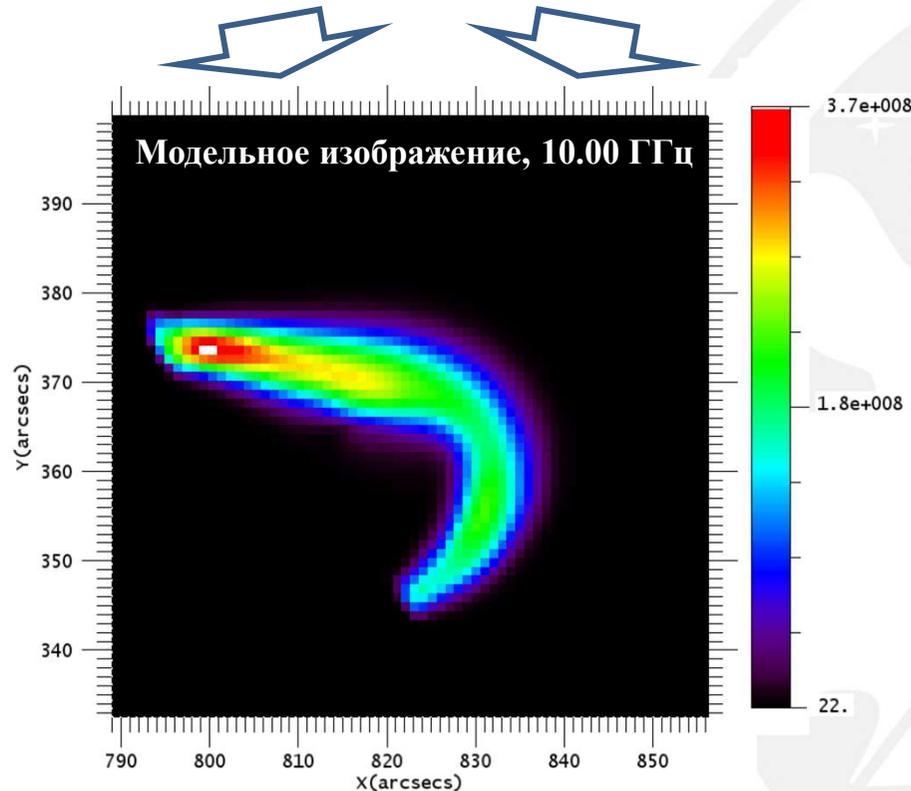
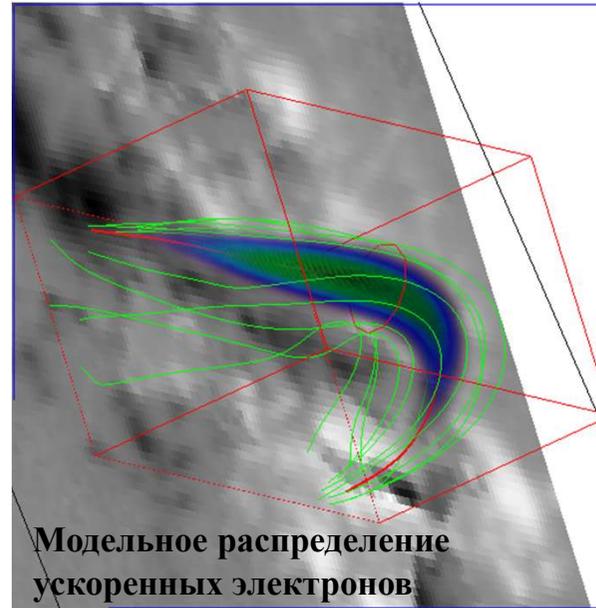
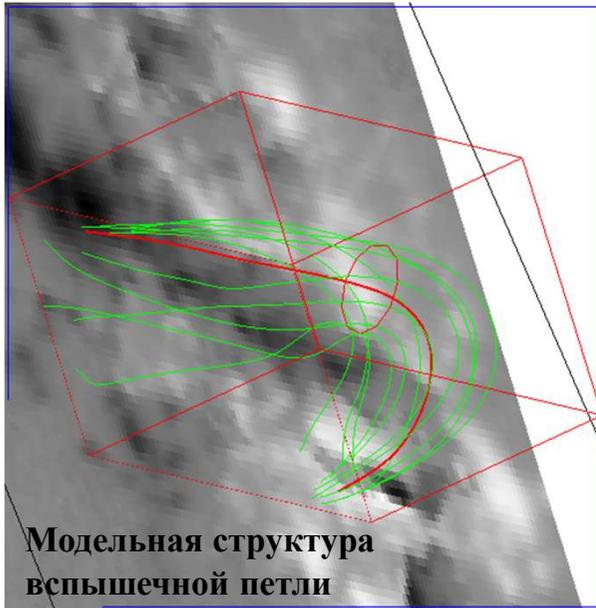
G.M. Nita (NJIT),  
Г.Д. Флейшман (NJIT),  
А.А. Кузнецов (ИСЗФ СО РАН),  
С.А. Анфиногентов (ИСЗФ СО РАН),  
А.Г. Ступишин (СПБГУ),  
Е.Р. Kontar (Univ. of Glasgow),  
S.J. Schonfield (ISR),  
J.A. Klimchuk (NASA),  
D.E. Gary (NJIT).

*В.В. Феденёв (ИСЗФ СО РАН) – перевод на Python.*

## Ссылки:

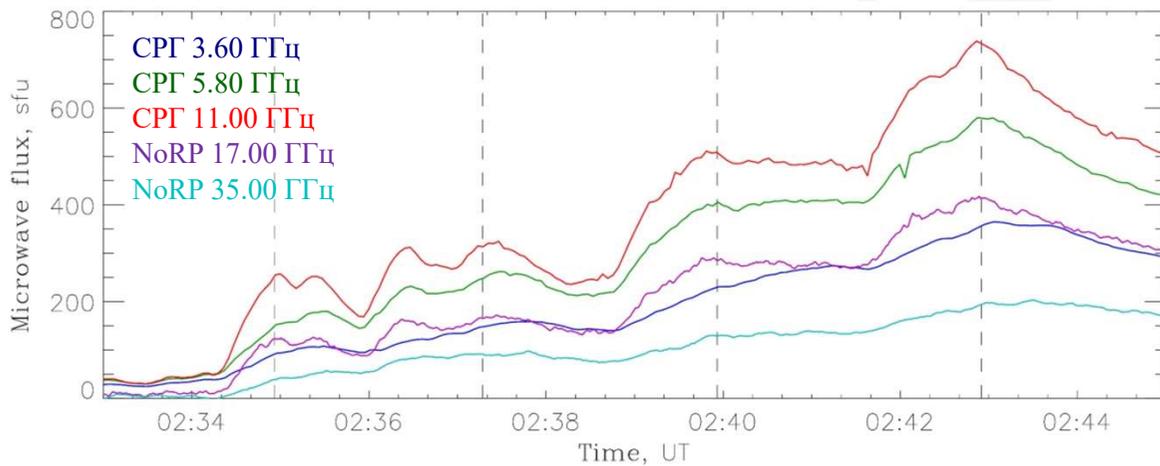
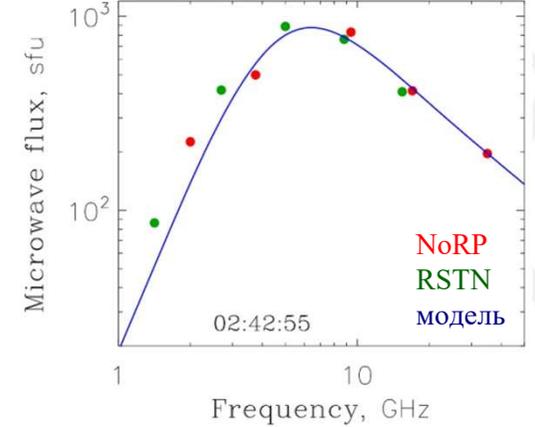
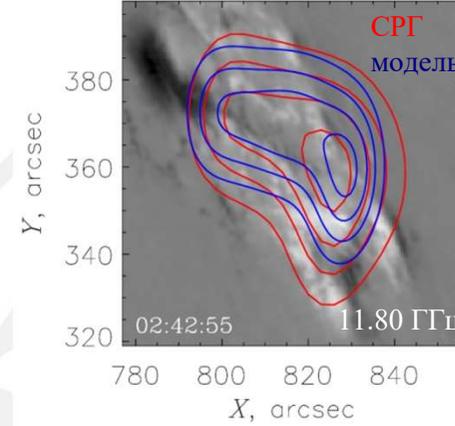
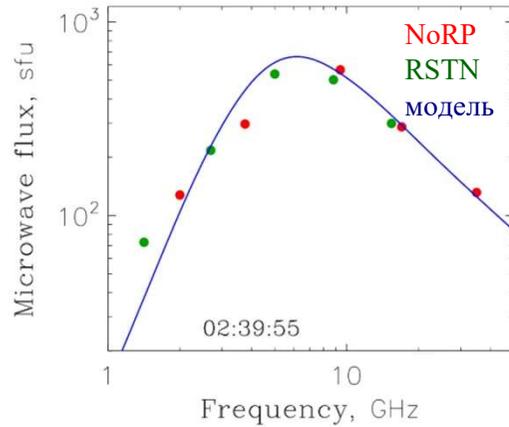
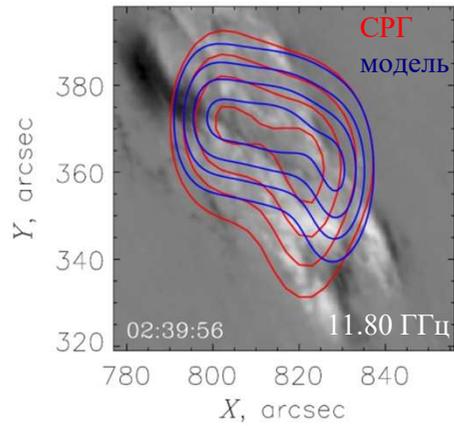
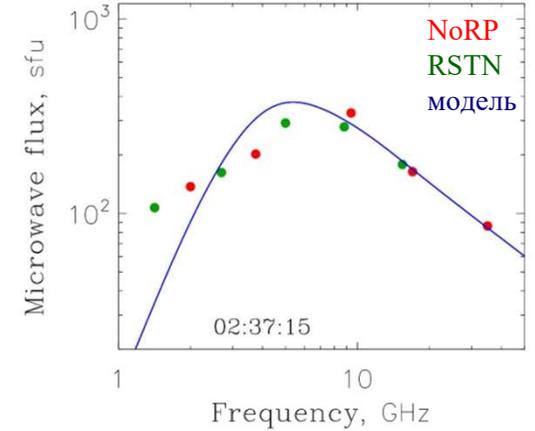
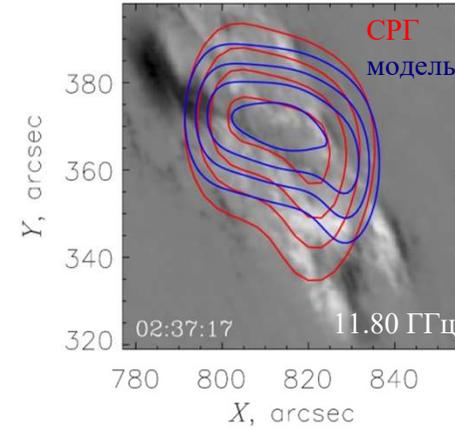
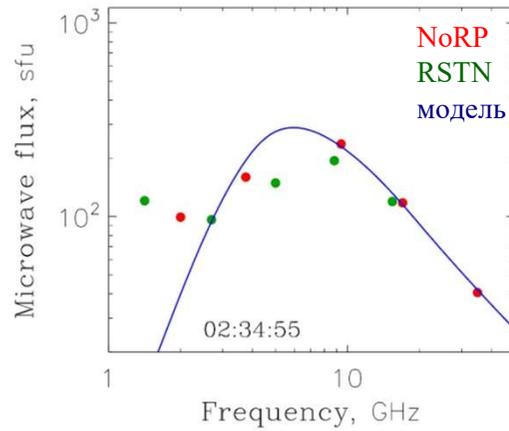
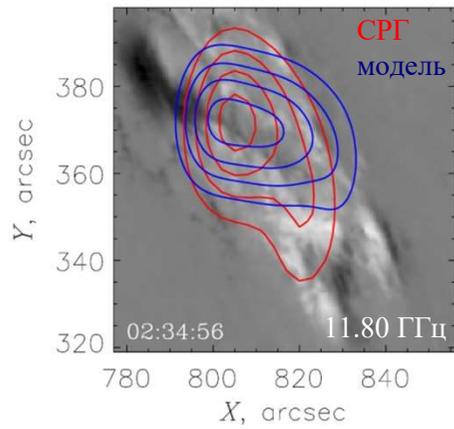
Nita et al., ApJ Suppl. Ser., v. 267, id. 6, 2023  
[https://github.com/Gelu-Nita/GX\\_SIMULATOR](https://github.com/Gelu-Nita/GX_SIMULATOR)

# GX Simulator: моделирование микроволнового излучения солнечных вспышек

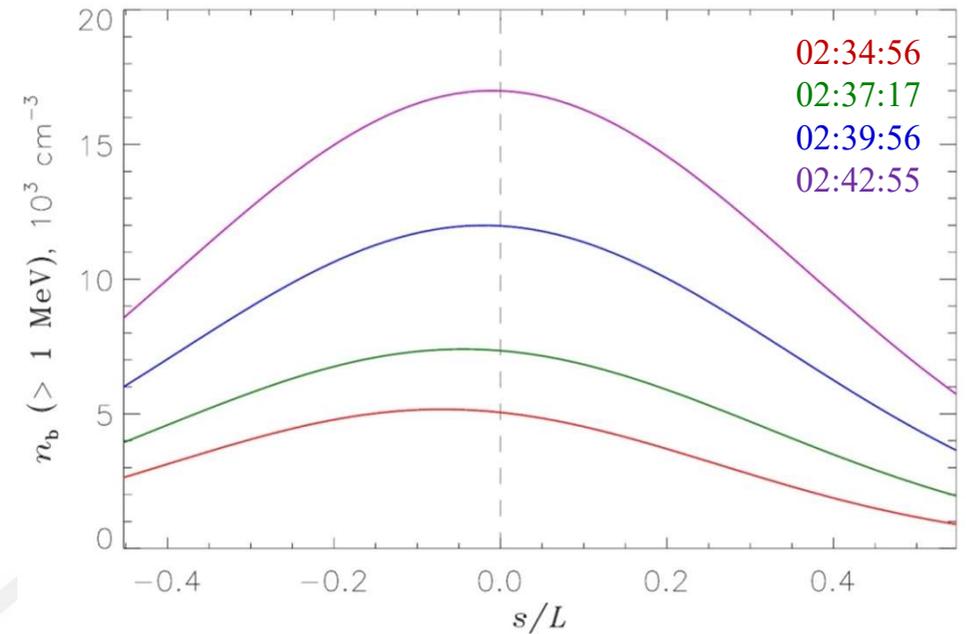
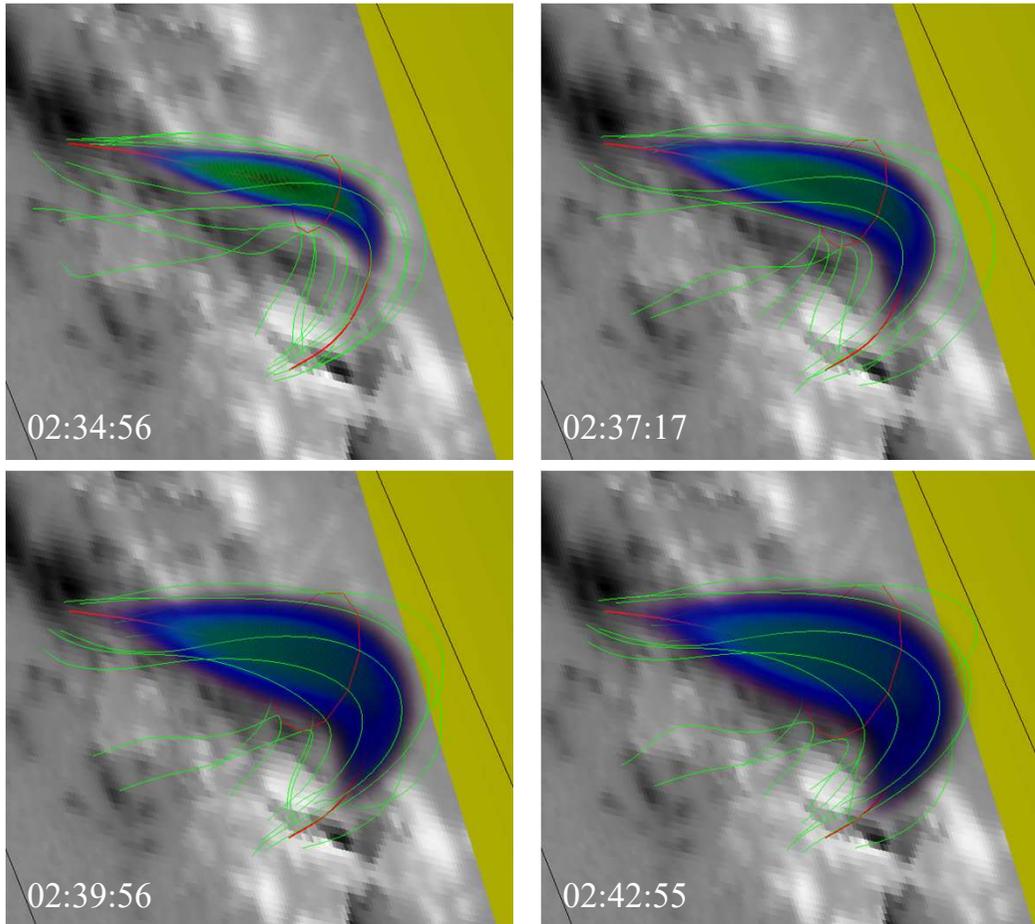


- Структура коронального магнитного поля: на основе экстраполяции магнитограммы.
- Можно выбрать одну или несколько вспышечных петель.
- Можно варьировать:
  - пространственное распределение ускоренных электронов вдоль петли  $n_b = n_b(r, s)$ ;
  - энергетическое иpitch-угловое распределения ускоренных электронов;
  - пространственное распределение тепловых электронов  $n_0 = n_0(r, h)$ .
- Микроволновое излучение вычисляется с помощью «быстрых гиротронных кодов» (Kuznetsov & Fleishman 2021).

# Диагностика параметров ускоренных частиц: вспышка 6 марта 2023 г.



# Диагностика параметров ускоренных частиц: вспышка 6 марта 2023 г.



Параметры вспышечной петли:

$L \approx 53\,000$  км,  $H \approx 17\,000$  км,  
 $B \approx 1600 - 170 - 1380$  Гс.

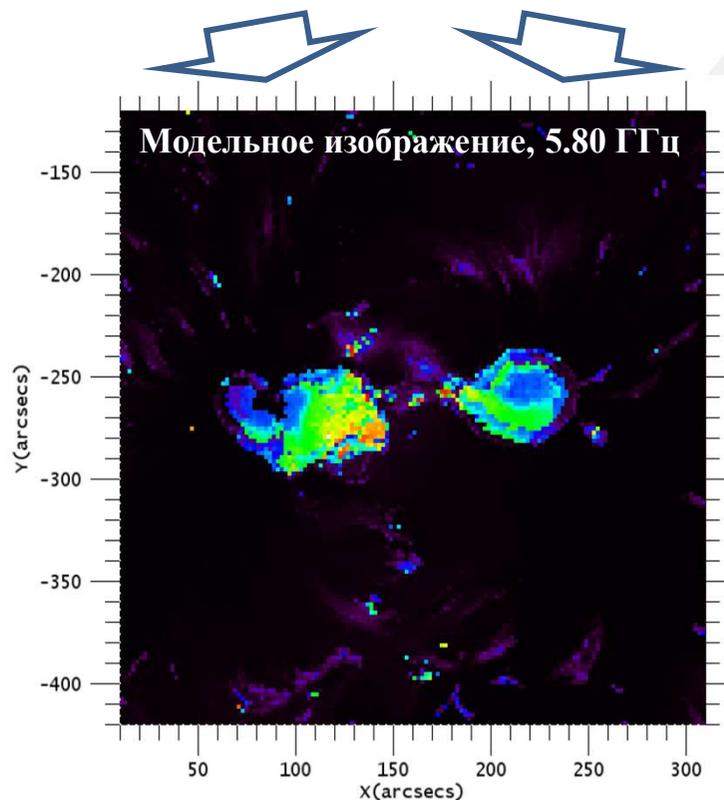
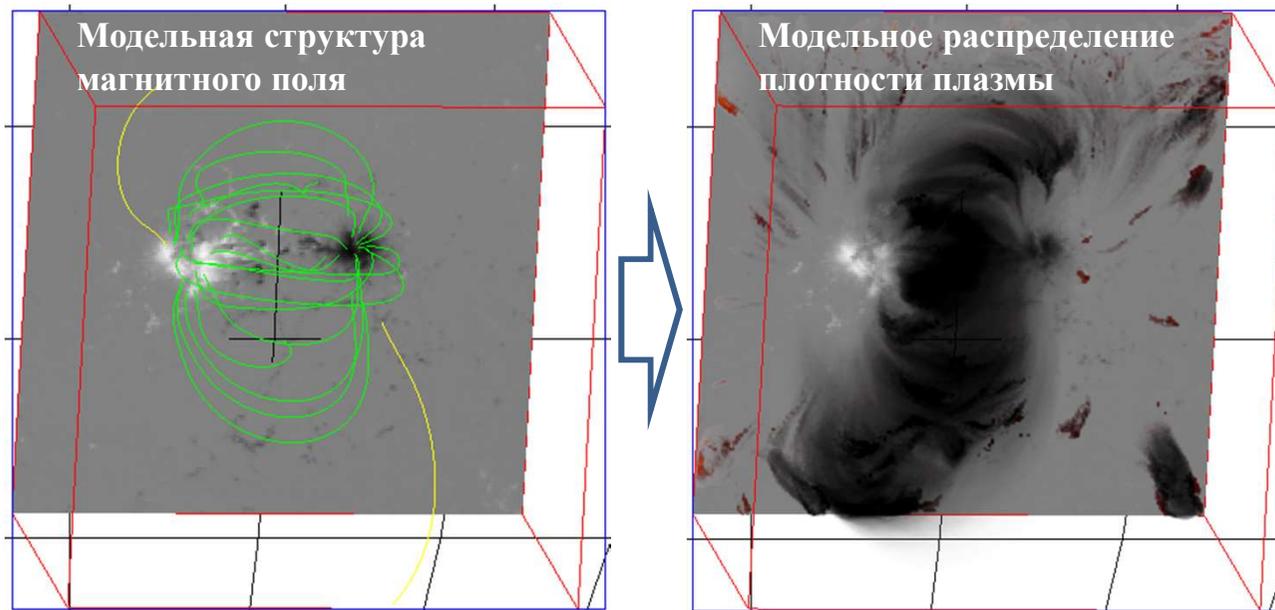
Функция распределения ускоренных электронов:

$f(E) \propto E^{-\delta}$ ,  $E = 0.01 - 10$  МэВ,

$$n_b(r, s) = n_{b0} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_r^2(s)}\right] \exp\left[-\frac{(s-s_0)^2}{2\sigma_s^2}\right]$$

Время, UT	$\sigma_{r0}$ , км	$\sigma_s$ , км	$s_0$ , км	$n_{b0}$ , см <sup>-3</sup>	$\delta$
02:34:56	1285	8145	3710	$3.30 \times 10^7$	2.90
02:37:17	1800	9860	2385	$1.55 \times 10^6$	2.30
02:39:56	2315	10125	1060	$5.80 \times 10^6$	2.60
02:42:55	2575	10700	0	$3.40 \times 10^6$	2.45

# GX Simulator: моделирование микроволнового излучения активных областей



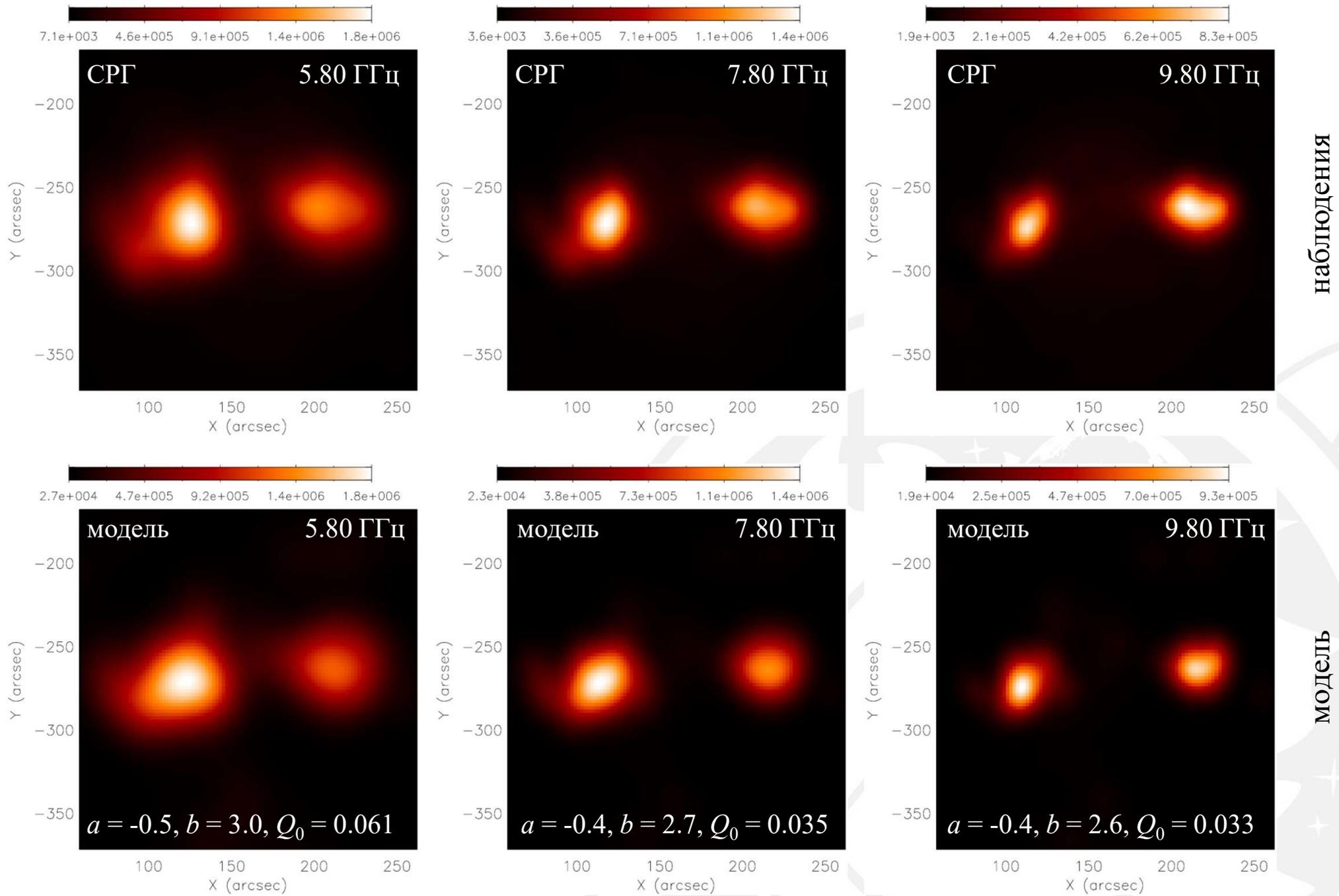
3.7e+006

1.8e+006

4.5e+003

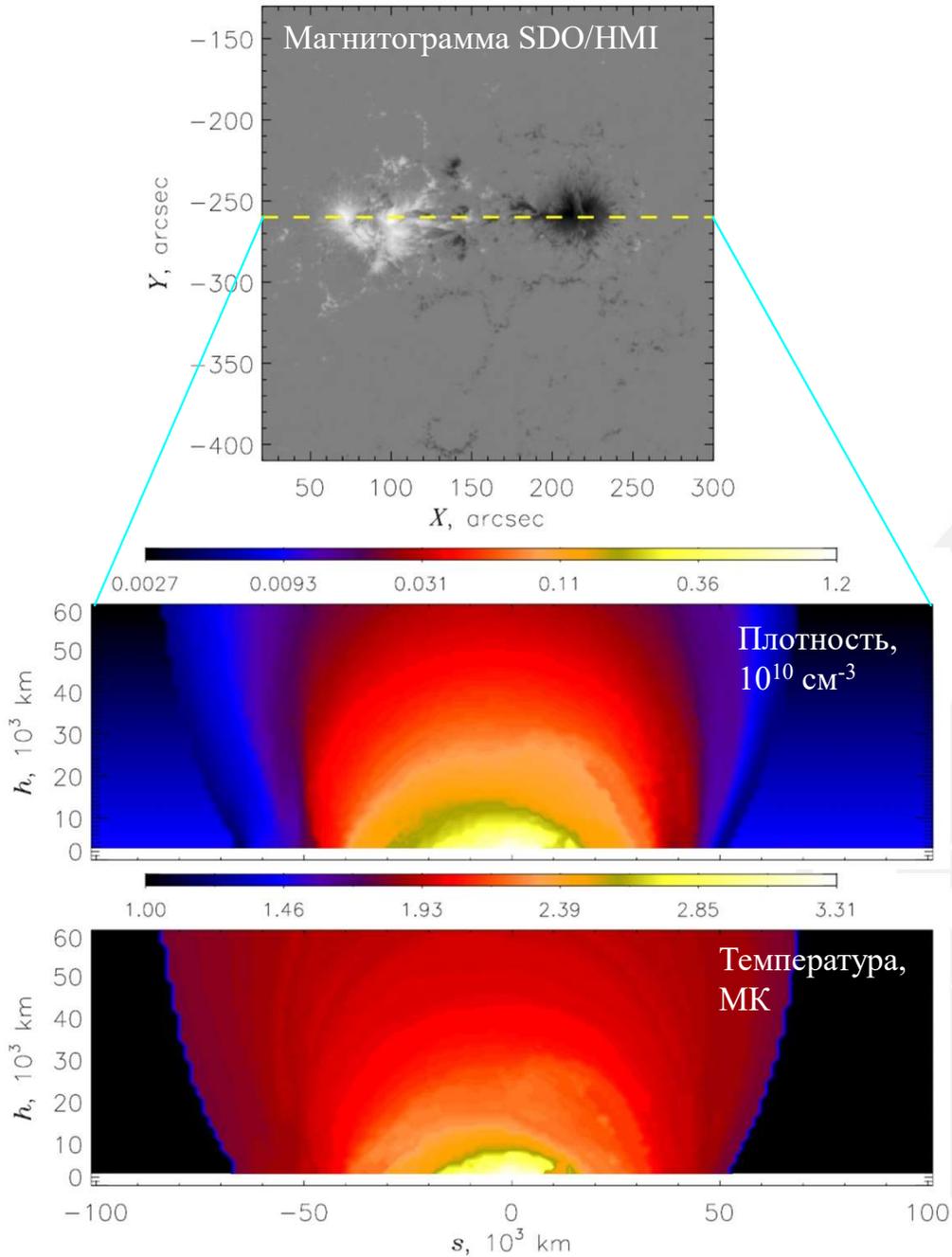
- Структура коронального магнитного поля: на основе экстраполяции магнитограммы.
- Модель коронального нагрева:
$$Q = Q_0 \left( \frac{\langle B \rangle}{B_0} \right)^a \left( \frac{L}{L_0} \right)^{-b}$$
зависит от трёх параметров ( $Q_0$ ,  $a$ ,  $b$ ).
- Плотность и температура плазмы вычисляются на основе кода EBTEL (Klimchuk et al. 2008).
- Гирорезонансное микроволновое излучение вычисляется с помощью кода Fleishman, Kuznetsov & Landi (2021).
- Разработана автоматическая система подгонки модельных параметров к наблюдениям: <https://github.com/kuznetsov-radio/gxmodelfitting>

# Диагностика параметров коронального нагрева: AR 13315



# Диагностика параметров плазмы и механизма нагрева солнечной короны

Модельные распределения плотности и температуры плазмы в активной области AR 13315:



Соответствие различных теоретических механизмов нагрева солнечной короны наблюдениям:

$a$	$b$	Model description	$N_{\text{cases}}$		
			$\sim 6 \text{ GHz}$	$\sim 8 \text{ GHz}$	$\sim 10 \text{ GHz}$
-2	0	Switch-on MHD shock train	0	0	0
-1	-2	Resonant absorption A ( $m = -2$ )	0	0	0
-1	-1	Resonant absorption B ( $m = -2$ )	0	0	0
		Hybrid triple-correlation cascade			
-1	0	Fast-mode shock train	0	0	0
		Iroshnikov-Kraichnan cascade			
-1	1	Resonance cavities ( $m = -2$ )	0	1	1
0	-1	Resonant absorption A ( $m = -1$ )	0	0	0
0	0	Resonant absorption B ( $m = -1$ )	0	1	1
		Alfvén-wave collisional damping			
		Kolmogorov-Obukhov cascade			
		Reflection-driven cascade			
0	2	Resonance cavities ( $m = -1$ )	17	22	16
1/2	0	Surface-wave damping	1	1	1
2/3	2/3	Phase mixing	2	2	2
1	1	Current layers	5	4	4
		Flux cancellation			
		Resonant absorption B ( $m = 0$ )			
		Tearing-mode reconnection			
1	2	Reconnection $\propto v_A$	25	24	20
3/2	3/2	Reconnection $\propto v_{A\perp}$	24	24	19
		Turbulence with constant dissipation coefficients			
		Line-tied reduced MHD cascade			
5/3	4/3	Turbulence with closure	24	24	19
		Turbulence (high-frequency)			
1.7	1.7	Turbulence with closure + spectrum ( $m = -1$ )	23	24	17
2	1	Critical angle	22	22	19
		Current sheets			
2	2	Stochastic buildup	5	3	3
		Critical twist			
		Current layers			
		Taylor relaxation			
2.1	2.1	Turbulence with closure + spectrum ( $m = -2.5$ )	5	2	2
3	2	Non-ideal/slipping reconnection	2	1	1
3	3	Hyperdiffusive reconnection	0	0	0

## Заключение

- Наблюдения в радио- и микроволновом диапазонах – наиболее перспективное средство для исследования солнечных вспышек и прочих активных процессов в солнечной короне.
- Сибирский Радиогелиограф (СРГ) – самый современный инструмент для солнечной радиоастрономии, не имеющий аналогов в мире.
- В ИСЗФ СО РАН, совместно с коллегами из других институтов, проводится разработка теоретических методов и компьютерных программ для количественной интерпретации многоволновых наблюдений СРГ.
- С помощью сравнения результатов моделирования с наблюдениями можно определить параметры магнитного поля, плазмы и ускоренных частиц в солнечной короне; подобный анализ уже был проведён для ряда солнечных вспышек и активных областей.
- Наилучшие результаты достигаются при совместном анализе наблюдений в различных спектральных диапазонах: микроволновом, оптическом, рентгеновском и т.д.