

УДК 523.985.3

## НАБЛЮДЕНИЕ ФАЗЫ СПАДА БЕЛОЙ ВСПЫШКИ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

И.Д. Мотык, Л.К. Кашапова

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,  
motykilya@iszf.irk.ru

## OBSERVATION OF WHITE-LIGHT FLARE DECAY PHASE IN MICROWAVE RANGE

I.D. Motyk, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, motykilya@iszf.irk.ru

**Аннотация.** Представлены первые результаты исследования процессов энерговыделения на фазе спада белой вспышки, класса M2.7, 17 июля 2023 г. Событие произошло на юго-западной части солнечного лимба, что позволило провести анализ пространственной структуры и развития микроволнового источника пост-эруптивной аркады без вклада излучения спокойного Солнца. Оценка магнитного поля микроволнового источника по пиковой частоте гиро-синхротронного спектра указывает на слабое поле около 3 Гс в области формирования микроволнового вспыхивающего источника. Эволюция микроволнового спектра показала, что в начале формирования аркады присутствовали ускоренные электроны, однако спустя час тепловое тормозное излучение стало доминировать в спектре, указывая на большое количество тепловой плазмы.

**Ключевые слова:** Солнечные вспышки, фаза спада, пост-эруптивная аркада, Сибирский Радиогелиограф.

**Abstract.** In this study, we present the first results of the energy release process during the decay phase of an M 2.7 GOES-class white flare that occurred on July 17, 2023. The event was located at the southwestern part of the solar limb. This position allowed us to analyze the spatial structure and the microwave source evolution of the post-eruptive arcade without the effect of the solar disk emission. An estimation of the magnetic field of the microwave source by the peak frequency of the gyro-synchrotron spectrum indicates a weak field of about 3 G in the region where the microwave flare emission was generated. The microwave spectrum evolution showed that accelerated electrons were present at the beginning of arcade formation, but an hour later, thermal bremsstrahlung began to dominate the spectrum, indicating a large amount of thermal plasma.

**Keywords:** Solar flares, decay phase, posteruptive arcade, Siberian Radioheliograph.

### ВВЕДЕНИЕ

Вспышка является одним из наиболее заметных и ощутимых проявлений солнечной активности. Её связь с корональными выбросами массы и последующими магнитными бурями на Земле делает её важным и интересным объектом изучения. Эволюцию вспышки подразделяют на 2 этапа: фаза роста и фаза спада. Фаза роста характеризуется быстрым ростом потока излучения в широком диапазоне электромагнитного спектра. Такое поведение связывают с лавинообразным выделением энергии, накопленной в структурах магнитных силовых линий. Длительность данной фазы составляет от нескольких секунд до десятков минут. Последующая фаза спада характеризуется медленным возвращением значений потока к предвспыхивающему уровню, что связывают с охлаждением плазмы. Численные [Jakimes et al., 1992] и аналитические [Cargill et al., 1995] модели, описывающие эволюцию вспышки, исходят из предположения, что во время фазы спада работают только процессы охлаждения. Однако, наблюдения указывают на более длительное время остывания плазмы, чем предсказывают теоретические модели [Ryan et al., 2013]. Одно из возможных объяснений данной проблемы может заключаться в отличии вкладов каждого процесса в реальности от того, что предполагают модели [Motyk & Kashapova, 2022]. Другой возможной причиной может быть то, что процессы энерговыделения во вспыхивающей плазме не прекращаются после достижения максимума излучения. Это могут быть и процессы связанные с нагревом плазмы, и с ускорением частиц. Наиболее чувствительной к типам механизмов излучения является микроволновое (МВ)

излучение. Но для использования этого вида излучения необходимы многоволновые наблюдения, которые были редки до настоящего времени. В работе [Grigoryeva et al., 2007] был представлен многоволновой анализ пост-эруптивной аркады на лимбе Солнца по данным микроволнового излучения радиотелескопа Ратан-600. МВ источник находился близко к солнечному экватору, что позволило провести анализ его пространственной и спектральной эволюции. Авторы также отметили доминирование теплового излучения в микроволновых спектрах, что указало на большое количество плазмы в пост-эруптивных аркадах. Остались неясными источники энергии, позволившие наблюдать излучение пост-эруптивной аркады в течение нескольких часов. С началом наблюдений Сибирского радиогелиографа [Lesovoi et al., 2017], появилась возможность исследовать эволюцию процессов определяющих генерацию излучения пост-эруптивной аркады с пространственным разрешением. Целью данной работы является анализ пространственной связи между развитием пост-эруптивной аркады наблюдаемой в ультрафиолетовом и микроволновом диапазонах, а также выявление механизмов генерации микроволнового излучения.

### АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Исследуемая вспышка началась примерно в 22:55 UT 17 июля 2023 г. и закончилась после 4:00 UT 18 июля. Событие произошло на западном лимбе Солнца, что позволило наблюдать развитие и рост пост-эруптивной аркады без влияния каких-либо проекционных эффектов. Наблюдения Geostationary Operational

Environmental Satellites (GOES) в мягком рентгеновском диапазоне 1–8 Å показали, что класс вспышки составил M2.7. В целом фаза спада рассматриваемой вспышки длилась примерно 5 часов и её можно отнести к так называемым «продолжительным событиям» (long duration events). Положение события на диске Солнца и длительность эволюции делает его интересным объектом для изучения процессов, происходящих во время фазы спада солнечных вспышек. Наблюдения на инструментах космической обсерватории Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S) позволили классифицировать данную вспышку, как белую т.е. демонстрирующее излучение из области фотосферы.

Информация о спектральных свойствах микроволнового потока во время данного события была доступна по наблюдениям спектрополяриметра Nobeyama Radio Polarimeters (NRP) и одно из спектрографов сети Radio Solar Telescope Network (RSTN). Сибирский Радиогелиограф (СРГ) наблюдал данное событие в диапазоне 3–12 ГГц приблизительно с 00:00 UT 18 июля 2023 г., что позволило проследить за динамикой развития пост-эруптивной аркады и сделать предположения о механизмах генерации излучения во время продолжительной фазы спада.

Для сравнения формы микроволнового источника, связанного с пост-эруптивной аркадой развития вспышки, использовались изображения в ультрафиолетом (УФ), крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне, полученные телескопом AIA на Solar Dynamic Observatory (SDO).

Согласно изображениям SDO/AIA в линиях КУФ пост-эруптивная аркада начала формироваться около 00:04 UT. При этом в основании аркады наблюдалась только одна вспышечная лента типичной двуленточной вспышки. Второе основание аркады, вероятнее всего, было расположено слишком близко к лимбу из-за чего скорее всего оно не было заметно. На радиоизображениях СРГ видно, что микроволновые источники на частотах выше 2.8 ГГц достаточно хорошо соответствуют полосе AIA/SDO 131 Å которая соответствует плазме с более высокой температурой, в то время как структуры, видимые на изображениях в полосе AIA/SDO 171 Å значительно меньше по размерам и не соответствуют тому, что видно в МВ. К концу фазы спада как во всех диапазонах КУФ так и в МВ излучении видна полностью сформировавшаяся аркада. В то же время на радиоизображениях на частотах 4–6 ГГц можно выделить пятенный источник, также микроволновый источник, находящийся на вершине пост-эруптивной аркады (рис. 1).

Анализ спектральной эволюции МВ излучения вспышки был проведен с помощью комбинирования данных потоков МВ излучения приборов NRP, RSTN и СРГ. Так как спектрографы и спектрополяриметры получают поток от всего Солнца, то для данных СРГ был использован также поток от всего диска Солнца. В начале наблюдений СРГ (примерно 00:01 UT) МВ спектр имел форму гирোসинхротронного, спектра ускоренных электронов с максимумом в районе 2 ГГц [Dulk, 1985] (рис. 2, левая панель).

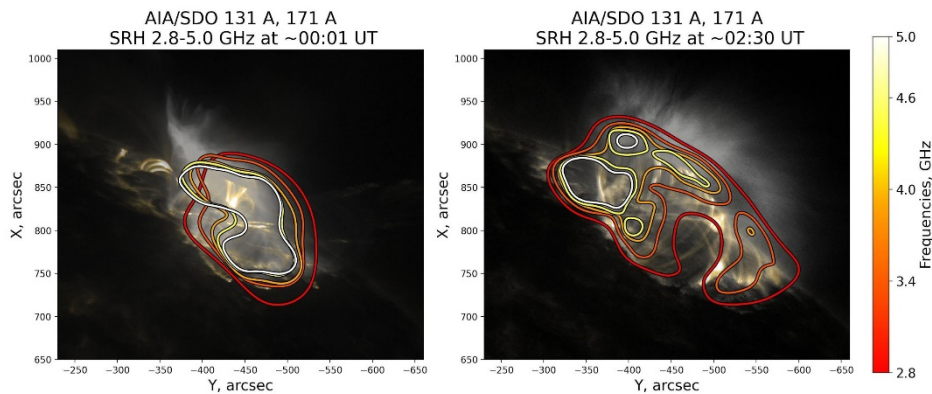


Рис. 1. Пространственная эволюция вспышки в КУФ AIA/SDO и микроволнах СРГ (SRH). Изображение в полосе 171 Å (жёлтая палитра) наложено на 131 Å (градации серого). Контуры соответствуют 70% максимальной яркостной температуры (СРГ)

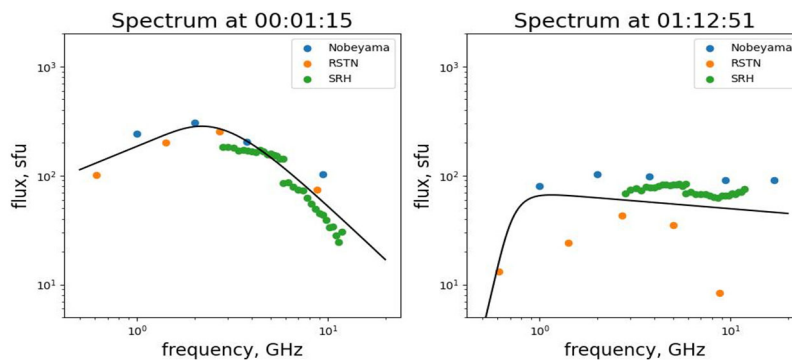


Рис. 2. Спектральная эволюция фазы спада вспышки. Чёрной линией обозначена спектральная функция, соответствующая форме микроволнового спектра и полученная в результате фитирования экспериментальных значений

Оценка, величины магнитного поля с использованием формул из [Dulk, 1985] и стандартных параметров вспышечной плазмы показало, что значение магнитного поля в области формирования МВ вспышечного источника около 3 Гс. Также мы можем сделать вывод, что диапазон наблюдений СРГ соответствует оптически тонкому источнику. С течением времени мощность спектра уменьшилась в несколько раз и при этом изменилась форма спектра. В 01:13 UT форма спектра соответствует тормозному тепловому и излучению, что говорит о доминировании излучения тепловой плазмы и слабом магнитном поле в области формирования микроволнового излучения (рис. 2, правая панель).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели первичный анализ процесса формирования вспышечной аркады солнечной вспышки 17 июля 2023 г. Обнаружено, что размер и форма источника развиваются в соответствии с развитием пост-эруптивной аркады. В начале ее формирования, микроволновый спектр указывает на присутствие ускоренных электронов. Приблизительно через час после формирования аркады начинает доминировать тормозное тепловое излучение, что говорит о большом количестве тепловой плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Авторы также благодарят

команды GOES, ASO-S, NRP, RSTN, СРГ и SDO за предоставление открытого доступа к наблюдательным данным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jakimiec J., Sylwester B., Sylwester J. et al. Dynamics of flaring loops. II - Flare evolution in the density-temperature diagram. // *Astron. & Astrophys.* 1992. V. 253, N. 1. P. 269–276.
- Cargill, P.J., Mariska J.T., Antiochos S.K. Cooling of Solar Flare Plasmas. I. Theoretical Considerations // *Astrophysical J.* 1995. V. 439. P. 1034.
- Ryan D.F., Chamberlin P.C., Milligan R.O., Gallagher P.T. Decay-phase cooling and inferred heating of m- and x-class solar flares // *Astrophys J.* 2013. V. 778. P. 68.
- Motyk I.D., Kashapova L.K. Study of Cooling Processes during the Decay Phase of Solar and Stellar Flares // *Astronomy Reports.* 2022. V. 66, iss. 11. P. 1043–1049.
- Grigoryeva I.Y., Borovik V.N., Livshits M.A. et al. Post-Eruptive Arcade Formation in the 25 January 2007 CME/Flare Limb Event: Microwave Observations with the RATAN-600 Radio Telescope // *Solar Phys.* 2009. V. 260, iss. 1. P. 157–175.
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Kochanov A.A. et al. Siberian radioheliograph: First results // *Sol.-Terr. Phys.* 2017. V. 3, N 1. P. 3–18.
- Gan W., Zhu C., Deng Yu. The Advanced Space-Based Solar Observatory (ASO-S) // *Solar Phys.* 2023. V. 298, iss. 5.
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275, N 1–2. P. 17–40.
- Dulk G.A. Radio emission of the sun and stars // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* 1985. V. 23. P. 169–224.