

ПРЕДВСПЫШЕЧНАЯ ДИНАМИКА МИКРОВОЛНОВОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА

И.А.БАКУНИНА¹, В.Ф.МЕЛЬНИКОВ², А.С.МОРГАЧЕВ^{2,3}

Поступила 6 сентября 2019

Принята к печати 11 марта 2020

В настоящей работе исследована пространственная динамика микроволнового излучения (данные радиогелиографа Нобеля) двух активных областей NOAA 12673 и NOAA 11261 за несколько часов до мощных вспышек рентгеновского класса М. Установлена сильная нестационарность пространственного распределения радиояркости и интенсивности излучения в определенных участках активной области. Для исследования тонкой структуры активных источников излучения привлечены также данные в ультрафиолетовом (AIA/SDO) диапазоне. Показано, что пространственная динамика микроволновых источников хорошо коррелирует с положением и появлением ярких ультрафиолетовых (УФ) петель в линии 94 Å, т.е., с магнитными петлями, плазма в которых разогревается до высоких температур $\sim 10^7$ К. Из совместного анализа карт УФ и радиоизлучения с картами магнитного поля (HMI/SDO) для активной области NOAA 12673 выявлено, что появление сильной нестационарности микроволновых источников происходит одновременно с возгоранием системы перекрещивающихся УФ петель (X-структур). Также показано, что яркие УФ петли и микроволновые источники возникают в области всплытия новых магнитных потоков.

Ключевые слова: *Солнце: активные области: вспышки: микроволновое излучение*

1. Введение. Известно, что перед мощными солнечными вспышками происходит всплытие нового магнитного потока в активных областях [1-3]. Кроме того, в последние годы при анализе данных, полученных на таких крупных космических обсерваториях как GOES, RHESSI, SOHO/MDI, SDO (инструменты AIA and HMI), был сделан вывод о том, что наиболее характерным признаком подготовки крупной вспышки является формирование структуры магнитного поля типа "SHIL" (сильное магнитное поле с высоким градиентом на линии раздела полярностей) [4-6].

Одним из ярких примеров подобного поведения магнитного поля стала активная область (АО) NOAA 12673 (NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration), которая эволюционировала от одиночного пятна северной магнитной полярности до самой активной АО 24 цикла солнечной активности со сложным магнитным полем дельта-конфигурации. С 4 по 10 сентября 2017г. она произвела 52 вспышки рентгеновского класса C, M и X, в том числе 4 вспышки класса выше GOES X1 (включая вспышки X9.3 6 сентября 2017г.

микроволнового излучения с использованием данных радиогелиографа Нобеяма (NoRH) обеих активных областей за несколько часов до рентгеновских вспышек класса М. Поскольку микроволновое излучение является очень чувствительным индикатором изменения параметров активной области, а именно: концентрации нетепловых электронов, температуры и плотности плазмы, напряженности и пространственной структуры магнитного поля, использование его наблюдаемых характеристик для диагностики процессов, происходящих перед вспышками и корональными выбросами массы (КВМ), представляется очень перспективным.

2. *Наблюдения и анализ данных.* Анализ пространственной и временной динамики микроволнового излучения активных областей выполнен на основе радиокарт Солнца, полученных на радиогелиографе Нобеяма на частоте 17 ГГц с двумерным пространственным разрешением 10"-15", с временным интервалом между изображениями 10 с и временем усреднения при синтезе изображений 10 с. Для исследования тонкой структуры активных источников излучения в обеих АО привлечены также данные наблюдений AIA/SDO в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне 94 Å и данные наблюдений фотосферного магнитного поля HMI/SDO.

2.1. *Наблюдения АО 12673.* В нашем исследовании рассмотрено поведение микроволнового излучения активной области АО 12673 на стадии ее активного образования, задолго до вспышек класса X. Нас интересовала пространственная динамика излучения после всплытия нового магнитного потока, которое началось 3 сентября, а именно, в интервале несколько часов перед первой интенсивной вспышкой в этой АО класса M1.2 (05:36) 4 сентября 2017г.

В течение 6.5 ч до начала вспышки M1.2 пространственное распределение радиояркости кардинально изменялось от двух почти параллельных петлеобразных структур, вытянутых в направлении "север-юг" с положительной поляризацией южных оснований и отрицательной - северных оснований в начале наблюдений (22:50 UT) до появления за ~2.5 ч до начала вспышки яркой петлеобразной структуры, вытянутой в направлении "восток-запад". Эта поперечная структура в дальнейшем продолжала усиливаться и стала источником относительно мощного микроволнового излучения вспышки (рис.2а, б). Заметим, что эта новая горизонтальная микроволновая структура соединяет старое магнитное поле северной полярности с вновь возникшим магнитным потоком южной полярности.

Сопоставление с динамикой УФ излучения (AIA/SDO - 94Å) (рис.3а, б) показывает, что в начале наблюдений (23:11) в КУФ четко видны три системы петель (возможно, скрученных магнитных жгутов). В целом они совпадают со структурой источников, видимых на радиогелиографе Нобеяма

(рис.2), кроме горизонтальной, которая в радиодиапазоне появилась значительно позже, за ~ 2.5 ч до вспышки. Максимумы яркости в двух диапазонах излучения не совпадают: радиояркость максимальна в южном основании верхней петли, КУФ яркость максимальна в верхней части этой петли.

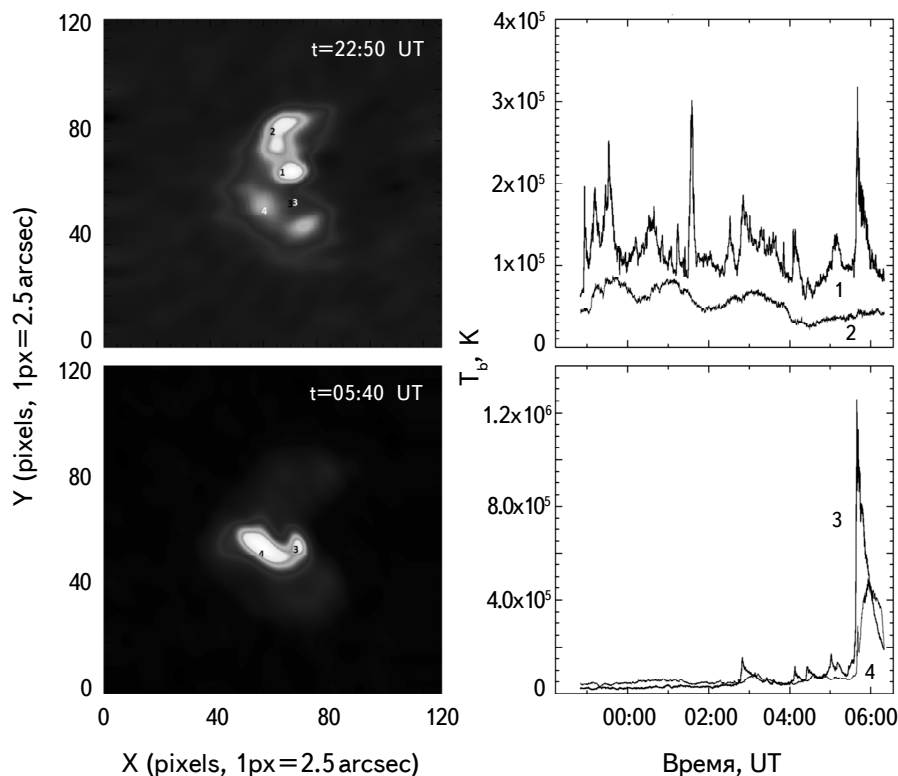


Рис. 2 а) Структура радиоисточника (NoRH) (левая панель) в интенсивности (параметр Стокса I) в два момента времени: 22:50 UT (начало наблюдений) и 05:40 UT (начало вспышки M1.2, 4 сентября 2017г.). Вспышка происходит во вновь сформированной горизонтальной структуре; б) Временные профили излучения на 17 ГГц из разных мест радиоисточника (1, 2 и 3, 4).

За УФ излучение в линии $94 \text{ \AA}$ ответственна плазма, нагретая до очень высоких температур $T \sim 10^7 \text{ K}$. Наблюдение в течение нескольких часов в АО ярких петель в этой линии свидетельствует о присутствии в них горячей, $T = 10^7 \text{ K}$, плазмы. Это означает, что в АО часами происходит значительное энерговыделение, предшествующее возникновению мощной вспышки.

Новая яркая поперечная УФ петля в горизонтальной структуре появляется в 01:42 UT раньше, чем окончательно сформируется перед вспышкой горизонтальный микроволновый источник. Возгорание системы УФ пересекающихся петель (X-структуры) происходит в 03:10 UT, одновременно с появлением

сильной временной нестационарности излучения микроволновых источников новой горизонтальной структуры (рис.2а). К началу вспышки (04:10 - 05:40 UT) в области микроволнового горизонтального источника возникает система пересекающихся друг с другом и активно взаимодействующих ярких УФ (магнитных) жгутов (рис.3с). Из совместного анализа карт УФ (яркость) и радио (контуры) излучения с картами магнитного поля ясно, что яркие УФ петли и микроволновые источники возникают в области всплывания новых магнитных потоков (рис.1).

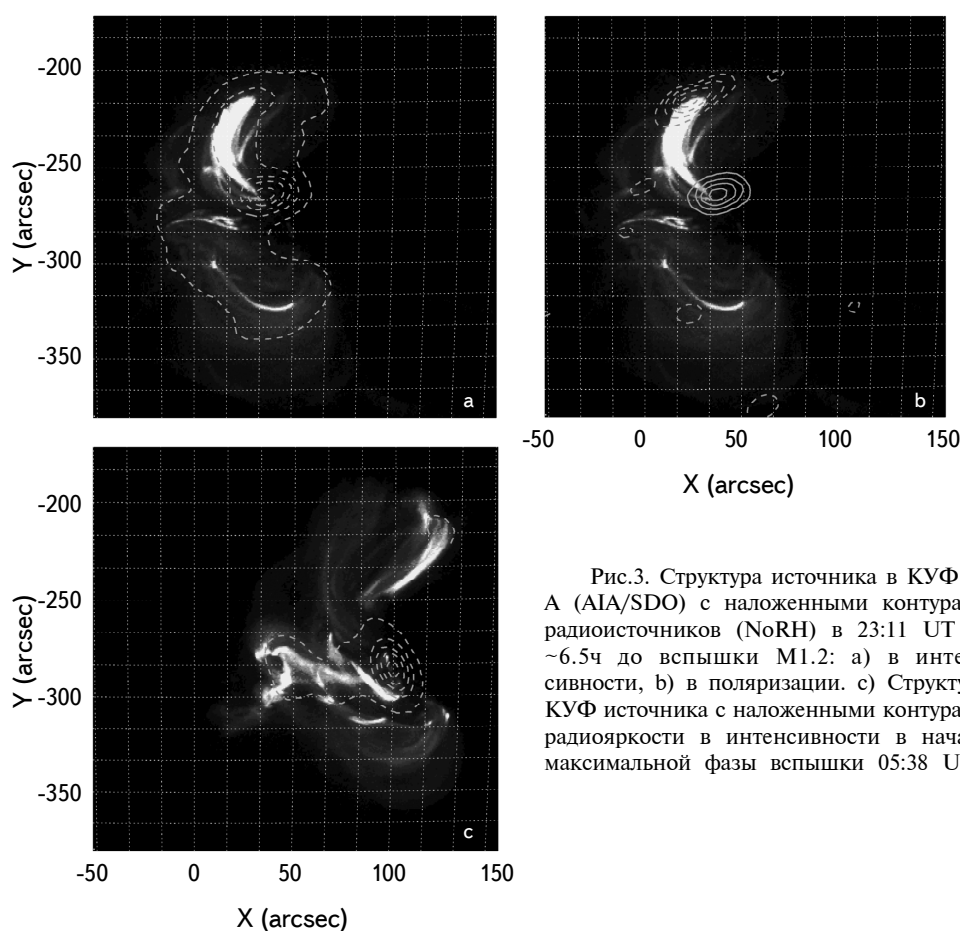


Рис.3. Структура источника в КУФ 94 А (AIA/SDO) с наложенными контурами радиоисточников (NoRH) в 23:11 UT за ~6.5ч до вспышки M1.2: а) в интенсивности, б) в поляризации. в) Структура КУФ источника с наложенными контурами радиояркости в интенсивности в начале максимальной фазы вспышки 05:38 UT.

2.2. *Наблюдения NOAA 11261.* Мы рассмотрели также динамику микроволнового излучения в интервале несколько часов перед вспышкой класса M1.4 (05:19) 2 августа 2011г. в активной области NOAA 11261, которая появилась на диске Солнца с уже развитой сложной магнитной структурой и дельта-конфигурацией магнитного поля, но не отличалась столь

сильной и яркой динамикой всплывтия новых магнитных потоков, как NOAA 12673. За 6.5ч до начала вспышки M1.4 (05:19) в ультрафиолетовом диапазоне ($94 \text{ \AA}$) также видна яркая поперечная петля (система петель), которая сохраняется до момента начала вспышки (рис.4). Именно в месте расположения

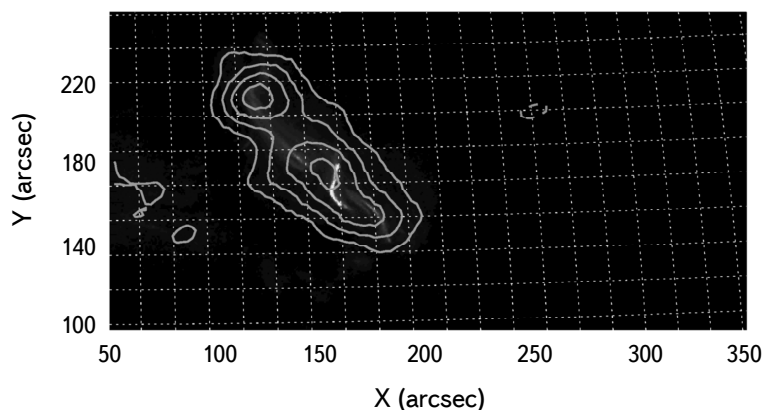


Рис.4. Структура источника в КУФ 94 А (AIA/SDO) с наложенными контурами яркости радиоисточника (NoRH) в интенсивности в момент начала наблюдений 22:53 UT.

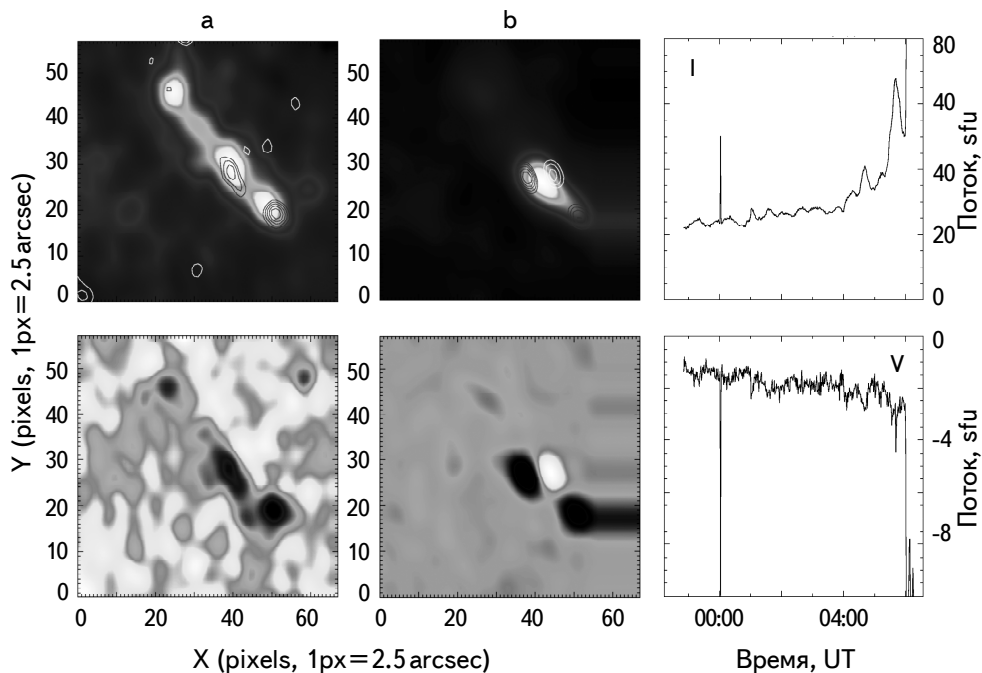


Рис.5. Структура радиоисточника (NoRH) в интенсивности (параметр Стокса I) (вверху) и в поляризации (параметр Стокса V=R-L) (внизу): а) перед вспышкой; б) в момент максимальной фазы вспышки. Контур на верхних рисунках показывают распределение правой и левой круговой поляризации (белые и черные, соответственно). Правая панель: временные профили потоков интенсивности (вверху) и поляризации (внизу).

этой поперечной УФ петли начинается вспышка. В радиодиапазоне источник с положительной круговой поляризацией, другого знака, чем основные источники, появляется в месте поперечной УФ петли за ~ 5 ч до начала первой фазы вспышки, но ведет себя нестабильно, появляется, исчезает, и затем появляется устойчиво перед вспышкой ($\sim 05:06$ UT). На рис.5а показана структура источника за 2.5 ч до вспышки, а на рис.5б - во время вспышки. Сама вспышка происходит в месте возникновения источника новой поляризации (рис.5б), там, где постепенно усиливается возгорание Х-структуры в УФ на $94 \text{ \AA}$, что можно видеть на рис.6а, б. Таким образом, появление поперечной УФ петли до появления нового микроволнового источника является неким предвестником последующей интенсивной вспышки в данной АО, как и в предыдущей. Временные профили на рис.6 демонстрируют нестационарность микроволнового излучения в течение всего времени наблюдений (6.5 ч) перед вспышкой. Нестационарность характеризуется квазипериодичностью с периодом 20-30 мин, аналогично тому, что наблюдалось перед вспышкой в АО 12673 4 сентября 2017г. (см. рис.2б). Вместе с тем отметим, что в АО 12673 присутствовали также колебания с более выраженной долгопериодической компонентой (1.5-2 ч).

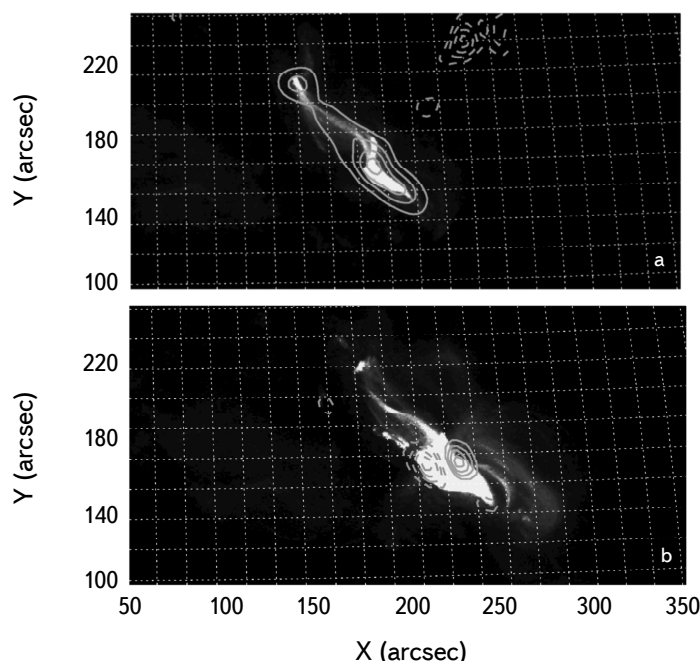


Рис.6. Структура источника в КУФ 94 А (AIA/SDO) с наложенными контурами радио-источника (NoRH): а) за 4 ч до вспышки, в момент 01:42 UT (в интенсивности); б) во время вспышки, в 05:40 UT (в круговой поляризации $V=R-L$, белые и черные контуры соответствуют правой и левой поляризации).

3. *Выводы.* Исследована пространственная динамика микроволнового излучения активной области NOAA 12673 на стадии ее активного образования, задолго до вспышек класса X, а именно, в интервале несколько часов перед вспышкой класса M1.2 (05:36) 4 сентября 2017г. и динамика микроволнового излучения NOAA 11261 в интервале несколько часов перед вспышкой класса M1.4 (05:19) 2 августа 2011г. Установлена сильная нестационарность пространственного распределения радиояркости и интенсивности излучения в определенных участках АО 12673 и АО 11261 на протяжении 6.5ч перед вспышками.

Для исследования тонкой структуры активных источников излучения привлечены УФ данные AIA/SDO с более высоким пространственным разрешением, чем обеспечивает радиогелиограф Нобейма (1".5 против 10"-15"). Показано, что пространственная динамика микроволновых источников хорошо коррелирует с положением и появлением ярких УФ петель в линии 94 Å, т.е., с магнитными петлями, плазма в которых разогревается до очень высоких температур $\sim 10^7$ К. Из совместного анализа карт УФ и радиоизлучения с картами магнитного поля (HMI/SDO) выявлено, что яркие УФ петли и микроволновые источники возникают в области всплытия новых магнитных потоков. Установлено, что появление сильной нестационарности микроволновых источников происходит одновременно с возгоранием системы перекрещивающихся УФ петель (X-структур).

Работа выполнена с использованием данных радиогелиографа Нобейма, который функционирует при содействии ICCON (International Consortium for the Continued Operation of Nobeyama Radioheliograph). ICCON включает the ISEE/Nagoya University, NAOC, KASI, NICT, и GSFC/NASA. Мы признательны команде SDO за наблюдательные данные AIA и HMI. Выполнение работ осуществлялось при частичной поддержке РФФИ (гранты № 18-02-00856, 17-52-80064) и Программы фундаментальных исследований РАН 12 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной".

¹ Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Нижний Новгород, Россия, e-mail: rinbak@mail.ru

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

³ Нижегородский государственный университет им. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

PREFLARE DYNAMICS OF MICROWAVE AND ULTRA-VIOLET EMISSION IN ACTIVE REGIONS OF THE SUN

I.A.BAKUNINA¹, V.F.MELNIKOV², A.S.MORGACHEV^{2,3}

In this work we studied the spatial dynamics of microwave emission (data from the Nobeyama Radioheliograph) of two active regions NOAA 12673 and NOAA 11261 several hours before X-ray class M power flares. The strong unsteadiness of the spatial distribution of radio brightness and intensity of emission in certain parts of the active region has been established. To study the fine structure of active sources of emission, data in the ultraviolet (AIA/SDO) range are also used. It was shown that the spatial dynamics of microwave sources correlates well with the position and appearance of bright ultraviolet (UV) loops at the 94 Å line, i.e., with magnetic loops in which the plasma is heated to high temperatures $\sim 10^7$ K. From the joint analysis of UV and radio emission maps with magnetic field maps (HMI/SDO), it was found for NOAA 12673 that the appearance of strong non-stationarity of microwave sources occurs simultaneously with the ignition of a system of intersecting UV loops (X-structures). It is also shown that bright UV loops and microwave sources arise in the area of the emergence of new magnetic fluxes.

Keywords: *The Sun: active regions: flares: microwave emission*

ЛИТЕРАТУРА

1. *А.В.Северный*, Изв. КРАО, **22**, 12, 1960.
2. *А.В.Северный*, Некоторые Проблемы Физики Солнца, М., Наука, с.221, 1988.
3. *В.Н.Ишков*, Изв. РАН, **62**, 1835, 1998.
4. *C.Schrijver*, Astrophys. J., **820**, 103, 2016.
5. *L.K.Harra, C.J.Schrijver, M.Janvier et al.*, Sol. Phys., **291**, 1761, 2016.
6. *S.Toriumi, C.J.Schrijver, L.K.Harra et al.*, Astrophys. J., **834**, 56, 2017.
7. *Y.J.Hou, J.Zhang, T.Li et al.*, Astron. Astrophys., **619**, A100, 2018.
8. *X.Sun, A.A.Norton*, Res. Notes AAS, **1**, 24, 2017.
9. *X.L.Yan, J.C.Wang, G.M.Pan et al.*, Astrophys. J., **856**, 14, 2018.
10. *H.Wang, V.Yurchyshyn, C.Liu et al.*, Res. Notes AAS, **2**, 8, 2018.