

## МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ ПЯТЕН ПО ДАННЫМ ССРТ И NoRH

В.П. Максимов, В.Э. Капустин

### MICROWAVE EMISSION OF SINGLE SUNSPOTS AS DEDUCED FROM SSRT AND NoRH DATA

V.P. Maksimov, V.E. Kapustin

По результатам отдельного изучения характеристик микроволнового излучения в необыкновенной и обыкновенной модах на длине волны 5.2 см не обнаружено тонкой структуры в излучении мод. На длине волны 1.72 см тонкая структура обнаружена только для крупных пятен и только в излучении обыкновенной моды. На большей статистике подтверждено превышение размеров источника в обыкновенной моде над размерами источника в необыкновенной моде, что не описывается классической моделью микроволнового источника над одиночным пятном.

Results of the selective study of characteristics of microwave emission in extraordinary and ordinary modes in a wavelength of 5.2 cm did not reveal a fine structure in the emission of the modes. In a wavelength of 1.73 cm, a fine structure was found only for large sunspots and only in the o-mode emission. Based on a large volume of statistical data, we confirmed that sizes of the o-mode source exceed those of the x-mode source. This fact does not described by the classical model of microwave source over a single sunspot.

#### Введение

В результате многолетних исследований солнечных пятен в радиодиапазоне установлен механизм генерации радиоизлучения пятенных источников – магнитотормозное (циклотронное) излучение плазмы в сильных магнитных полях на низких гармониках гирочастоты.

Однако появление наблюдательных данных, полученных с высоким пространственным и спектральным разрешением, поставило целый ряд вопросов, на которые до сих пор нет удовлетворительных ответов. В частности, нет ясности в понимании того, чем вызвана депрессия яркостной температуры над тенью пятна. Одни исследователи [Brosius et al., 1992; Злотники др., 1996] считают, что она обусловлена наличием над пятном холодной плотной плазмы. Другие [Alissandrakis, Kundu, 1982; Vourlidas et al., 1997] объясняют ее зависимостью оптической толщины от угла зрения для гирорезонансного источника. Решению этой проблемы способствовало бы изучение тонкой структуры радиоисточника, которая была предсказана Гельфрейхом и Лубышевым [Гельфрейх, Лубышев, 1979] и наблюдалась в микроволновом излучении, начиная с длин волн до 7.5 см, на WSRT, VLA, OVRO и PATAN-600 [Lang, Willson, 1982; Vourlidas et al., 1997]. Однако недавно в работе [Топчило и др., 2010] высказано утверждение, что тонкая структура (депрессия в центре пятна) проявляется только на коротких длинах волн 1.76–1.92 см.

Проведенные до сих пор исследования ограничивались анализом отдельных активных областей, находившихся вблизи центрального меридиана.

В настоящей работе на основе отдельного анализа излучения в обыкновенной и необыкновенной модах исследовалась возможность обнаружения депрессий яркостной температуры источников над одиночными пятнами на радиотелескопах с умеренным пространственным разрешением – Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ) и радиогелиографе Нобейяма (NoRH). Сделаны оценки соотношений размеров и высот источников в обыкновенной и необыкновенной модах излучения за все время прохождения исследованных источников по солнечному диску.

#### Наблюдения и результаты

В работе исследовалось прохождение по диску Солнца активных областей по двумерным изображениям микроволнового излучения на длинах волн 5.2 см (ССРТ) и 1.76 см (NoRH), а также по фотогелиограммам, представленным на сайте <http://www.solar-monitor.org>. Поскольку право- и левополяризованное излучение для источников над пятнами соответствует обыкновенной и необыкновенной модам излучения, они лучше подходят для исследования тонкой структуры источников. Вначале исследовалось микроволновое излучение одиночных пятен разной площади.

Активная область (АО) 11582 вышла из-за лимба 26 сентября 2012 г. Она состояла из одиночного пятна магнитного класса  $\alpha$ , 27 сентября площадь пятна составляла 200 м.д.п. Площадь пятна постепенно увеличивалась, достигнув 360 м.д.п. в день прохождения центрального меридиана, а затем стала уменьшаться и вблизи западного лимба составила 230 м.д.п.

Излучение микроволнового источника над пятном в день выхода из-за лимба было неполяризованным. На следующий день после выхода АО из-за лимба (27 сентября) излучение стало правополяризованным, что при северной полярности магнитного поля пятна соответствовало необыкновенной моде излучения. Знак круговой поляризации сохранялся в течение всего прохождения пятна по солнечному диску до 7 октября, когда излучение стало неполяризованным. Тонкая структура в R- и L-поляризациях не наблюдалась, размер источника обыкновенной волны был меньше размера источника необыкновенной волны. С переходом активной области в западное полушарие источник обыкновенной волны сместился к западу от источника необыкновенной волны.

В то же время по наблюдениям на NoRH тонкая структура в излучении обыкновенной моды наблюдалась в течение всего прохождения АО по солнечному диску за исключением 1 октября (рис. 1). Следует отметить, что в момент кульминации слабая депрессия яркостной температуры в o-моды все-таки наблюдалась.

Из униполярных АО, проходивших по солнечному диску в 1998 г., были выбраны АО 08217, состоявшая

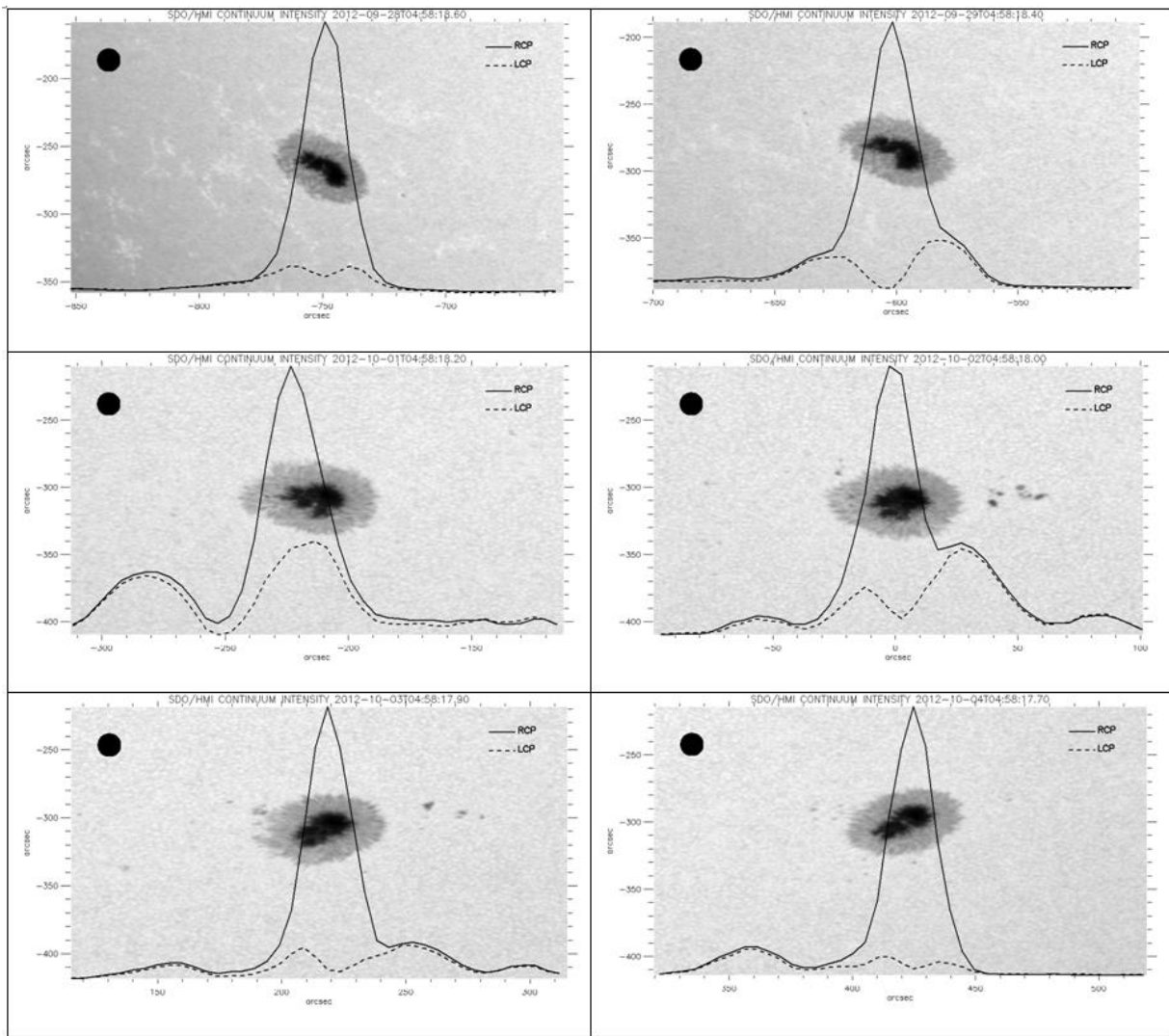


Рис. 1. Распределения яркости в R- и L-поляризации на длине волны 1.76 см по наблюдениям на NoRH для АО 11582, наложенные на фотогелиограммы, полученные на SDO.

из пятна малой площади (40–60 м.д.п.), и АО 08263, состоявшая из пятна средней площади (150–210 м.д.п.). В обеих АО тонкая структура в R- и L-поляризациях не проявилась. В АО 08217 размеры источника в о-моду превышали размеры источника в е-моду в течение всего времени прохождения АО по солнечному диску.

Исследованные в работах [Злотник и др., 1996; Топчило и др., 2010] АО не были униполярными, а состояли из большого ведущего пятна и мелких пятен в хвостовой части АО. Возникает вопрос, не проявляется ли тонкая структура только в таких группах, а не в одиночных пятнах. Для проверки была исследована АО 10810. Эта область вышла на видимый диск 18 сентября 2005 г. Она состояла из крупного головного пятна с магнитным полем северной полярности и хвостовой части из мелких пятен обеих полярностей. Магнитный класс АО 10810 был  $\beta$ . Ось группы пятен была ориентирована вдоль экватора. В день пересечения центрального меридиана 23 сентября площадь группы составляла 230 м.д.п. и уменьшилась до 150 м.д.п. при заходе АО за западный лимб.

Тонкой структуры в излучении обыкновенной и необыкновенной мод не наблюдалось. Размеры источника в обеих модах излучения в этой АО были примерно одинаковы. При заходе источник наблюдался над лимбом, причем произошла смена знака круговой поляризации: источник из правополяризованного стал левополяризованным. Это говорит о том, что на пути распространения излучения к наблюдателю существовало квазиперечное магнитное поле, которое отсутствует для источников над чисто одиночными пятнами. Это еще раз свидетельствует о некорректности использования для таких АО моделей одиночных пятен.

АО 10756 также состояла из большого головного пятна южной полярности и множества мелких пятен к востоку и югу от него. В отличие от оси АО 10810, ось этой группы пятен была ориентирована вдоль меридиана. Магнитный класс АО 10756 был  $\beta\delta$ . Площадь АО возрастала от 330 до 1000 м.д.п., а затем уменьшалась до 590 м.д.п. В АО в периоды 28–30 апреля и 5–7 мая произошли вспышки балла C, а 6 и 7 мая вспышки балла M1.3 и M1.4 соответственно. Тонкой структуры в излучении обыкновенной и необыкновенной мод на длине волны 5.2 см не наблю-

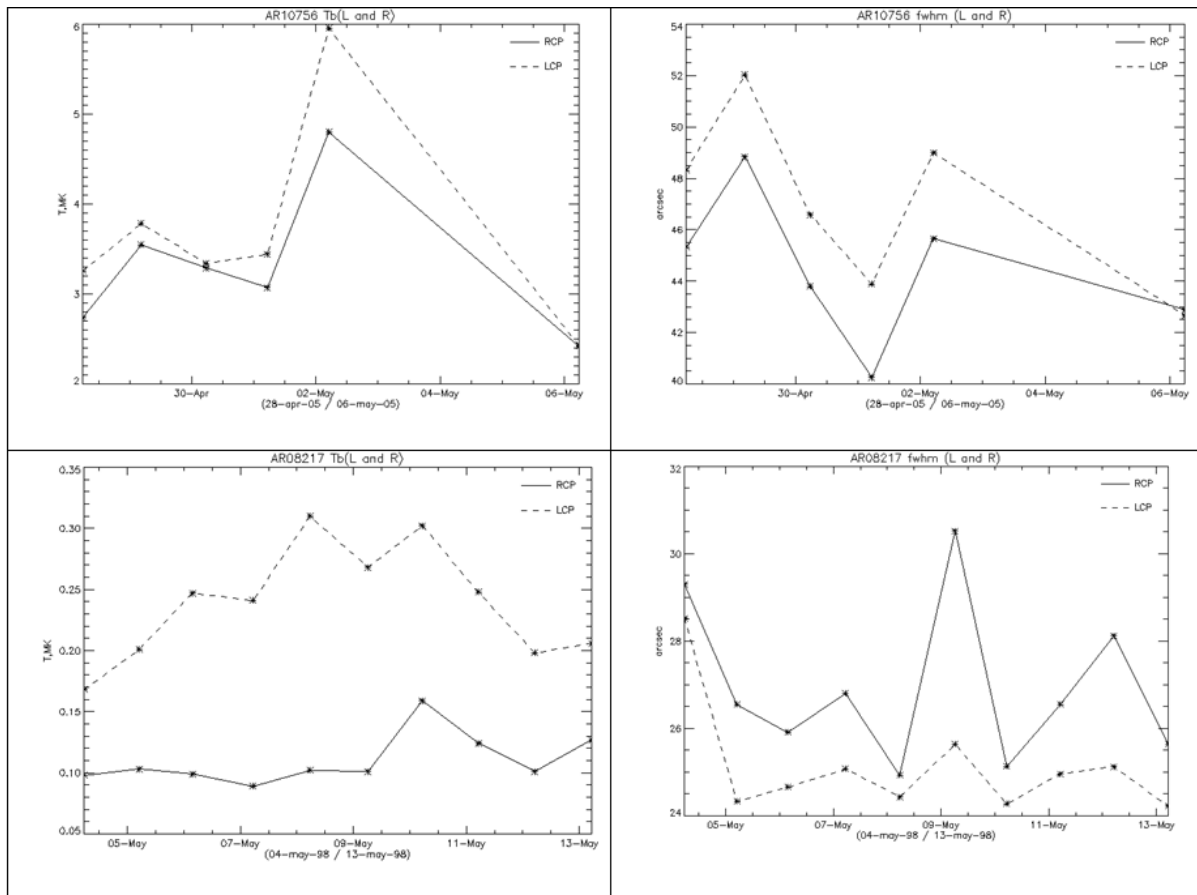


Рис. 2. Верхний ряд – поведение яркостной температуры (слева) и размеров источника (справа) в R- и L-поляризации за время прохождения АО 10756 по солнечному диску. Нижний ряд – поведение яркостной температуры (слева) и размеров источника (справа) в R- и L-поляризации за время прохождения АО 08217 по солнечному диску.

далось. Размеры источника в e-моду излучения превышали размеры источника в o-моду в течение всего времени прохождения этой АО по солнечному диску (рис. 2). В излучении на длине волны 1.76 см тонкая структура наблюдалась только в o-моду, причем профиль излучения существенно изменялся от дня ко дню.

Методика раздельного анализа излучения в R- и L-поляризации дает возможность оценки яркостных температур и размеров источников, излучающих в e- и o-модах. Во всех наблюдавшихся случаях яркостная температура в e-моду излучения превышала яркостную температуру в o-моду в течение всего времени прохождения АО по солнечному диску.

### Обсуждение и заключение

Тонкая структура излучения на длине волны 5.2 см в исследованных нами случаях не обнаружена как при прохождении по солнечному диску одиночных пятен, так и крупных пятен в составе группы пятен. В излучении на длине волны 1.76 см тонкая структура наблюдалась только для крупных пятен и только в o-моду излучения. При этом профиль яркостной температуры в o-моду излучения при прохождении АО по солнечному диску может меняться от дня ко дню. С учетом того, что тонкая структура ранее уверенно наблюдалась в излучении на длинах волн до 7.5 см на радиотелескопах с пространственным разрешением 2–4", можно предположить, что отсут-

ствие тонкой структуры в наблюдениях на ССРТ обусловлено недостаточным пространственным разрешением. Для всех исследованных АО яркостная температура источника в e-моду превышала яркостную температуру в o-моду. Что касается размеров и высот источников в разных модах излучения, то здесь наблюдались различные ситуации.

В АО 10756 размер источника в e-моду больше размера источника в o-моду в течение всего времени прохождения АО по солнечному диску. Такая ситуация описывается классической моделью микроволнового источника над солнечным пятном. Однако отметим, что АО 10756 не являлась униполярной, а состояла из большого головного пятна южной полярности и множества мелких пятен обеих полярностей к востоку и югу от него.

В АО 10810 размеры источников в обоих модах отличаются слабо и вблизи лимбов высоты источников в обоих модах совпадают. Такой случай описан в работе [Vourlidis et al., 1997] для АО 7123, наблюдавшейся на VLA на частоте 8.4 ГГц. Авторы сделали вывод, что излучение может происходить с одного и того же гироуровня, хотя такая же ситуация может возникнуть при близком расположении гироуровней, т. е. при тонкой переходной области между хромосферой и короной.

В АО 08217 размеры источника в o-моду больше размеров источника в e-моду и вблизи западного лимба высота источника в e-моду меньше, чем в

о-моды, т. е. источник в о-моды располагается выше источника в е-моды. Такое противоречие отмечалось ранее в работах [Топчило и др., 2010; Коржавин и др., 2010]. Так, в работе [Топчило и др., 2010] также указывается на превышение размера источника в о-моды над размером источника в е-моды. В работе [Коржавин и др., 2010] обнаружено небольшое уменьшение размеров источника с ростом длины волны и, соответственно, с ростом высоты.

Однако в АО 08263, 10944, и 11582 соотношения размеров источников в е- и о-моды менялись в течение прохождения этих областей по солнечному диску.

Для оценки относительного положения источников по высоте в R- и L-поляризации можно использовать проекции центров источников на солнечную поверхность вблизи лимбов. Центр более высокого источника будет смещен к лимбу относительно более низкого источника. Как и в отношении размеров источников, здесь также наблюдались различные случаи. Для АО 10810 центры источников в е-моды сдвинуты к лимбу относительно центров источников в о-моды, т. е. источник излучения в е-моды расположен выше источника излучения в о-моды.

Однако для АО 08217, 08263 и 10944 наблюдался сдвиг источника в е-моды к центру диска относительно источника в о-моды. Это означает, что источник в о-моды расположен выше источника в е-моды.

Таким образом, поведение микроволнового излучения одиночных солнечных пятен является более сложным, чем это описывается классической моделью, и требует дальнейшего изучения по данным наблюдений с высоким пространственным разрешением.

Гельфрейх Г.Б., Лубышев Б.И. О структуре локальных источников S-компоненты радиоизлучения Солнца // *Астрон. журн.* 1979. Т. 56. С. 562–573.

Злотник Е.Я., Кунду М., Уайт С. Модель атмосферы над солнечным пятном по радиоданным // *Изв. вузов. радиофизика.* 1996. Т. 39. С. 372–389.

Коржавин А.Н., Опейкина Л.В., Петерова Н.Г. Переходная область над солнечными пятнами по наблюдениям на микроволнах // *Астрофиз. бюлл.* 2010. Т. 65. С. 63–77.

Топчило Н.А., Петерова Н.Г., Борисевич Т.П. Корона над крупным одиночным пятном по наблюдениям в R- и L-поляризации на микроволнах // *Астрон. журн.* 2010. Т. 87. С. 75–92.

Alissandrakis C.E., Kundu M.R. Observations of ring structure in a sunspot associated source at 6 centimeter wavelength // *Astrophys. J.* 1982. V. 253. P. L49–L52.

Brosius J.W., Willson R.F., Holman G.D., Schmelz J.T. Coronal magnetic structures observing campaign. IV. Multiwaveband observations of sunspot and plage-associated coronal emission // *Ibid.* 1992. V. 386. P. 347–358.

Lang K.R., Willson R.F. Polarized horseshoes around sunspots at 6 centimeter wavelength // *Ibid.* 1982. V. 255. P. L111–L117.

Vourlidas A., Bastian T.S., Aschwanden M.J. The structure of the solar corona above sunspots as inferred from radio, X-ray, and magnetic field observations // *Ibid.* 1997. V. 489. P. 403–425.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*