

УДК 523.9-77; 523.98-77

О СВОЙСТВАХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НАД НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ РАДИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2012 В. М. Богод¹, Т. И. Кальтман¹, Л. В. Яснов²

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, 196140 Россия

²Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Поступила в редакцию 2 мая 2012 года; принята в печать 6 августа 2012 года

В этой работе мы продолжаем исследования радиоисточников, расположенных над нейтральной линией радиального магнитного поля в солнечных активных областях, так называемые NLS (neutral line associated sources). Природа NLS пока еще далека от понимания. Для их изучения мы используем спектральные возможности нового широкодиапазонного поляризационного приемного комплекса РАТАН-600. На примерах нескольких активных областей были рассмотрены спектры радиоизлучения NLS источников в широком диапазоне изменения их размеров. Установлены связи потока радиоизлучения NLS с величиной градиента квазипродольного магнитного поля на фотосфере. Сделаны оценки высотного расположения NLS относительно циклотронных радиоисточников. Обнаружены тонкие спектральные особенности излучения NLS, которые подтверждают наличие в их источниках токового слоя. Заметное отсутствие поляризации излучения у таких источников связывается с их расположением вблизи вершин корональных арок.

Ключевые слова: *Солнце: корона—Солнце: солнечные пятна—Солнце: магнитная топология—Солнце: радиоизлучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

История обнаружения радиоисточников над нейтральной линией, разделяющей противоположные полярности магнитного поля, связана с использованием крупных радиотелескопов для изучения детальной структуры активных областей (АО) на Солнце. Такие источники были обнаружены на крупном инструменте апертурного синтеза WSRT [1], их наблюдательные свойства описаны в [2]. Это относительно стабильные, яркие, довольно компактные микроволновые источники, проекция которых на фотосферное магнитное поле совпадала с его нейтральной линией. Несколько позже в совместных наблюдениях на радиотелескопах VLA и РАТАН-600 были обнаружены “пекулярные” радиоисточники [3, 4], положение которых и их основные свойства были близки к NLS-источникам. В начале 80-х на РАТАН-600 годов в регулярных многоволновых наблюдениях активных областей на Солнце, отличающихся высокой вспышечной активностью, была найдена связь между появлением “пекулярных” источников радиоизлучения и возникновением эруптивных событий. В коротковолновой части сантиметрового диапазона их излучение доминировало

над остальными деталями активных областей. Характерные размеры этих источников составляли 10–30". Они отличались большими значениями яркостных температур (до 10 МК) на волнах 3–4 см, высоким спектральным индексом на коротких см-волнах, слабой или умеренной степенью поляризации. К таким результатам пришли авторы работ [3, 5, 6]. Выполненное совместное исследование на РАТАН-600 и WSRT [7] показало, что оба типа объектов подобны и их названия равнозначны.

В вышеупомянутых работах указывалось, что эти источники возникали преимущественно в АО со сложной магнитной структурой фотосферного поля и располагались преимущественно в местах расположения волокон. При этом часто отмечалась связь NLS-источников со вспышечной активностью [1, 6–13].

В научной литературе до сих пор широко обсуждается вопрос о механизмах излучения NLS-источников. В работе [7] предложена интерпретация радиоизлучения над нейтральными линиями как гирорезонансное излучение небольшой популяции нетепловых электронов (10^{30} – 10^{31}), рас-

пределенных по степенному закону с показателем степени распределения $\delta = 3$.

В работе [11] появлению NLS предшествует ступенчатый выход нового магнитного потока. Авторы стараются объяснить существование NLS излучением нетепловых среднерелятивистских электронов со степенным спектром, показатель которого равен 4–5. При этом они указывают на трудную проблему сохранения длительной стабильности генерации такого излучения. Поскольку температура гиросинхротронного излучения может достигать 10^8 – 10^{10} К, что не наблюдается, то предложено существование поглощающего экрана в виде большого количества мелкомасштабных неоднородностей в неравновесной корональной плазме.

В исследовании Сомова [14] рассматривался вопрос о дополнительном нагреве плазмы в таких источниках, что интерпретировалось как проявление высокотемпературных токовых слоев на предвспышечной стадии активной области. Высокая яркостная температура “пекулярных” источников может свидетельствовать также о том, что они связаны с процессом пересоединения магнитных силовых линий в токовом слое, приводящем к нагреву плазмы и ускорению частиц [6].

В другой работе [15], проведено сопоставление радиокарт NoRH и реконструированных фотосферных магнитограмм. Найдено хорошее совпадение положений NLS-радиоисточников с линией раздела магнитных полярностей и показано, что всплытие нового магнитного потока часто приводит к их возникновению. Авторы указывают на трудности интерпретации излучения NLS-источников циклотронным излучением на третьей гармонике гирочастоты и привлекают для объяснения четвертую гармонику аналогично работе [16], что может быть близким к наблюдениям при углах менее 60° между направлением магнитного поля и лучом зрения. Авторы, однако, признают, что природа излучения NLS все еще неясна.

В работе [16] проведены модельные расчеты, которые указывают на возможное существование мощных электрических токов с сильным сдвигом в районе нейтральной линии, что связывается с сильным нагревом.

Из приведенного обзора ясно, что исследование природы излучения NLS продолжает оставаться актуальным. Сейчас очевидно, что из-за отсутствия адекватных инструментов, наблюдения NLS продолжают оставаться уникальными и данная работа может дать дополнительную информацию об их свойствах.

Следует отметить, что кроме компактных NLS-источников есть широкий источник эмиссии размером приблизительно равным целой активной области, центроид излучения которого также приходится на линию раздела полярностей магнитного

поля. Этот источник идентифицирован как большое плазменное уплотнение, ограниченное магнитосферой активной области [17]. В работах [7, 18] этот объект выделен в отдельный класс и был назван источником “гало”. Было показано, что “гало” дает существенный вклад в полную эмиссию источника: около 50% для типичного случая [19], а иногда и до 95% [9]. В работах [20] характер спектра плотности потока гало интерпретировался как гиросинхротронное излучения субрелятивистских электронов.

Связь эволюции NLS со вспышечной активностью неоднократно отмечалась и работах с использованием радиогелиографов SSRT и NoRH. Однако, как мы показываем в данной работе, для адекватных наблюдений таких объектов нужны также регулярные спектральные наблюдения поляризованного излучения с высоким пространственным разрешением. В общем случае желательно при этом иметь двумерное пространственное разрешение.

Радиотелескоп RATAN-600 сегодня обладает рядом свойств, которые позволяют приблизиться к такому перечню требований. В данной работе рассмотрены несколько активных областей, для которых использовался подробный спектральный анализ поляризованного излучения в широком диапазоне волн на новом аппаратном комплексе RATAN-600 [21, 22]. Его основные наблюдательные параметры таковы: широкий диапазон одновременно перекрываемых частот 0.75–18.2 ГГц, высокое спектральное разрешение около 1%, число частотных каналов 112 по каждой из круговых поляризаций, временное перекрытие 4 часа вблизи местного полудня с использованием азимутального разворота одномерной диаграммы направленности, что позволяет менять угол сканирования активной области. Максимальное число азимутальных сканов в течение дня достигает 61. В данной работе мы приводим наблюдения NLS в широком диапазоне их размеров и сообщаем некоторые новые их свойства. Поскольку источники NLS и гало находятся над линией раздела магнитных полярностей, то делается попытка рассмотреть их излучение с единых позиций.

2. КОМПАКТНЫЙ И ЯРКИЙ NLS В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 10956

На Рис. 1 приведены результаты сравнения скана, полученного на радиотелескопе RATAN-600 на волне 2.96 см, со структурой магнитного поля на фотосфере. Видно, что в радиодиапазоне можно выделить несколько источников поляризованного

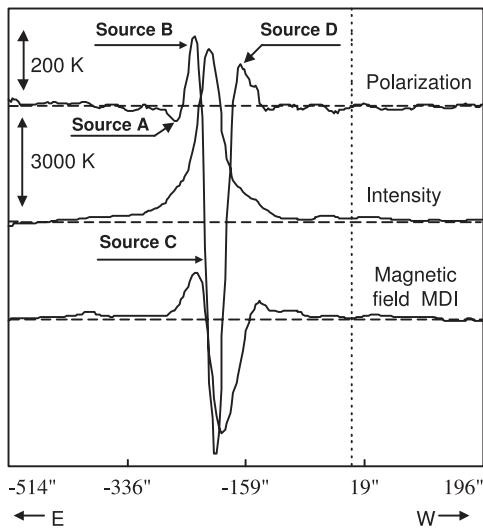


Рис. 1. Сопоставление радиосканирования активной области NOAA 10956 в антенной температуре в круговой поляризации (верхний рисунок) и интенсивности (средний рисунок). Вертикальные масштабы этих сканов представлены слева. Нижний рисунок представляет собой результат свертки магнитограммы по данным магнитографа MDI спутника SOHO с 1-D диаграммой РАТАН-600 на волне 2.96 см. Обозначены источники в канале поляризации А, В, С, D и их связь с магнитным полем на фотосфере. Пунктирная вертикальная линия обозначает центр диска Солнца.

излучения (параметр Стокса V), которые обозначены буквами А, В, С и D. При этом в канале интенсивности выделение радиоисточников затруднено из-за недостаточно высокого пространственного разрешения инструмента. Была освоена методика выделения радиоисточников процедурой гаусс-анализа [23]. Такая процедура, в принципе, является некорректной, и для повышения ее корректности были применены дополнительные технические возможности. Во-первых, были использованы данные о точном положении источников поляризованного излучения на многоволновых сканах, которые потом применялись для определения мест положения гауссиан радиоисточников в каналах интенсивности. Во-вторых, для повышения корректности процедуры гаусс-анализа использовалось такое качество многоволновых наблюдений, как монотонность спектра, которое применялось для проверки процедуры выделения каждого выделенного радиоисточника. Опыт выделения указывает на реальную однозначность процедуры, если известно число радиоисточников, их положение и минимальная величина остаточного фонового сигнала после определения гауссиан.

На Рис. 1 сканы диска Солнца в интенсивности $I = I(R) + I(L)$ и круговой поляризации $V = I(R) - I(L)$ сопоставлены с фотосферным магнитным полем по данным магнитографа MDI

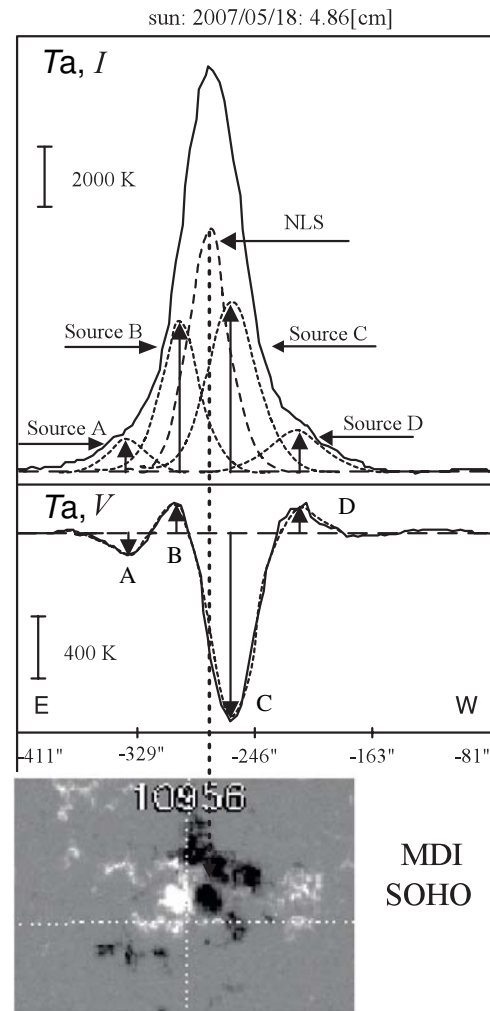


Рис. 2. Сканы активной области NOAA 10956 со сложной структурой на волне 4.86 см в интенсивности (вверху) и в круговой поляризации (внизу), сопоставлены с картой магнитных полей магнитографа MDI SOHO. Северная полярность магнитного поля представлена темным цветом. Проведена процедура гаусс-анализа, в результате которой выделены циклотронные источники В и С, флоккульные радиоисточники А и D и неполяризованный радиоисточник над линией раздела полярностей, связываемый с NLS.

спутника SOHO. Предварительно проведена процедура свертки двумерной магнитной карты с диаграммой направленности РАТАН-600 на волне 2.96 см. Видно, что формы сканов магнитного поля и круговой поляризации подобны, хотя положения их максимумов для источника С отличаются на величину эффекта проекции. Перейдем теперь к анализу NLS-источника в активной области NOAA 10956.

На Рис. 2 показано разделение радиоизлучения активной области NOAA 10956 на отдельные радиоисточники с помощью гаусс-анализа. Приведены сканы активной области NOAA 10956 на

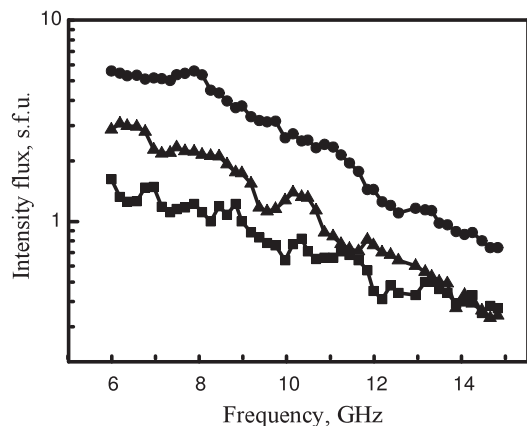


Рис. 3. Спектры потоков интенсивности циклотронных радиоисточников В, С и NLS-источника NOAA 10956. Здесь: кружки означают спектр NLS-источника, треугольники — спектр циклотронного источника С, квадратики относятся к циклотронному источнику В.

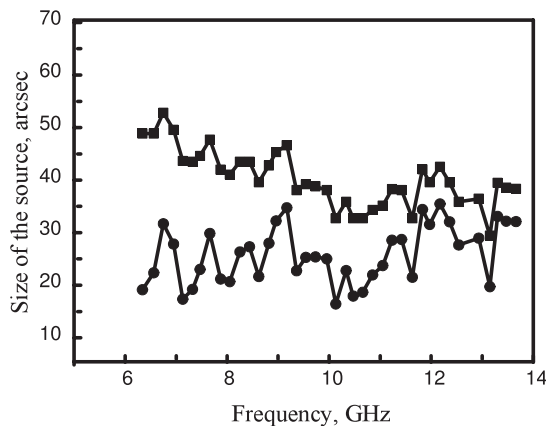


Рис. 4. Оценка размеров NLS-источника: верхняя кривая — наблюдаемый размер, нижняя кривая — истинный размер источника, после коррекции за размер диаграммы.

волне 4.86 см в интенсивности (вверху) и в круговой поляризации (внизу). Скан в поляризации совмещен с картой магнитных полей магнитографа MDI SOHO. Радиоисточники А и D имеют слабую поляризацию и характеризуют радиоизлучение окружающего флоккульного поля. Источник С является циклотронным с сильной отрицательной поляризацией и четко совпадает по положению с пятном северной полярности магнитного поля. Измеренное значение продольного магнитного поля по спектру поляризации составляет 2550 Гс. Менее интенсивный источник В также циклотронный с поляризацией положительного знака. На скане интенсивности нанесены радиоисточники А, В, С и D. При этом в центре обнаруживается существование сильного неполяризованного радиоисточника

NLS, интенсивности которого равны в каналах *R* и *L*. Положение этого радиоисточника проецируется на границу раздела полярностей магнитного поля (показано пунктиром со стрелкой). На Рис. 3–6 приведены результаты сопоставления параметров источников В, С и NLS.

На Рис. 3 приведены спектры потоков В, С и NLS-источников активной области NOAA 10956 за 18 мая 2007 г., когда источник находился вблизи меридиана Солнца. Видно, что поток NLS-источника на низких частотах в 2–3 раза больше потоков поляризованных источников В и С. Спектр NLS-источника имеет показатель степени $\delta = 3-4$.

На Рис. 4 приведена оценка размеров NLS-источника. В диапазоне 6–14 ГГц размеры источника практически постоянны и составляют 20–30". Для определения пространственного положения NLS в картинной плоскости относительно других радиоисточников активной области NOAA 10956 проанализируем координаты их центроидов по интегральному излучению правой *R* и левой *L* круговых поляризаций. Для этого использованы наблюдения в азимутах $+24^\circ$ (время наблюдения $7^{\text{h}} 27^{\text{m}} 45^{\text{s}}$ UT) и -24° (время наблюдения $10^{\text{h}} 52^{\text{m}} 20^{\text{s}}$ UT). В течение этого отрезка времени (около $3^{\text{h}} 25^{\text{m}}$) спектры средних положений центроидов излучения циклотронных радиоисточников В и С (см. Рис. 5) несколько изменились, тогда как положения источников *R* и *L*, отражающих излучение NLS, менялись менее резко.

На Рис. 5–6 показано изменение положений источников В, С, *R*, *L*, их средние значения и отклонения от средних значений. На Рис. 6 видно, что разности среднего положения источников *R* и *L* (куда входит, как основная составляющая, излучение NLS) совпадают со средними положениями циклотронных источников В и С при двух крайних азимутальных направлениях диаграммы антенны ПАТАН-600. Такое совпадение возможно, если NLS находится на одной линии с источниками В и С на этих частотах и находится приблизительно по середине между ними. Провалы на 9–10 ГГц вызваны поведением поляризованных источников В и С. Положение NLS источника, как следует из Рис. 5 и 6, меняется более плавно, чем положение источников В и С. Размеры источника NLS во всем диапазоне длин волн практически постоянны и равны 20–30". Нахождение NLS на одной линии с источниками В и С скорее всего означает, что он расположен в вершине силовых линий, связывающих источники В и С. Далее мы покажем, что такой вывод подтверждается и слабой поляризацией этого источника.

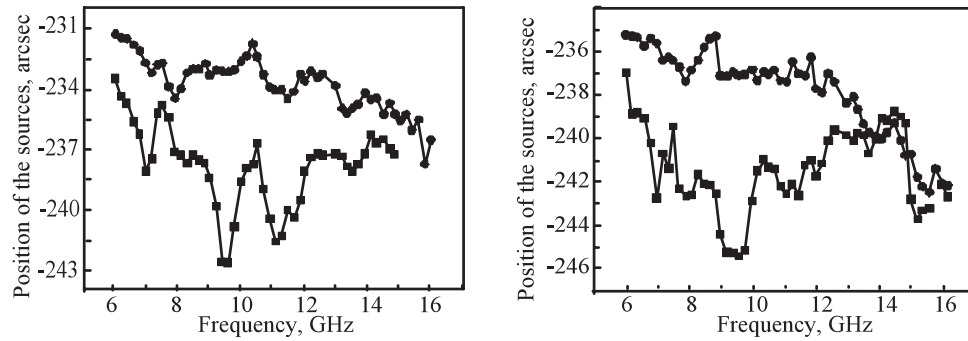


Рис. 5. Спектры средних положений циклотронных источников В, С (нижние кривые) и неполяризованных источников R, L (верхние) при их регистрации в крайних азимутах $+24^\circ$ (левый рисунок) в $7^{\text{h}} 27^{\text{m}} 45^{\text{s}}$ и -24° (правый рисунок) в $10^{\text{h}} 52^{\text{m}} 20^{\text{s}}$ 18 мая 2007 г.

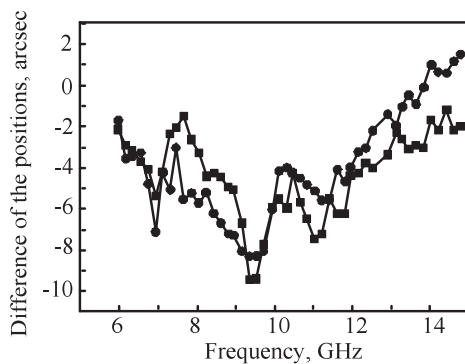


Рис. 6. Спектры разности средних положений поляризованных источников В, С и неполяризованных источников R и L в виде $(B + C)/2 - (R + L)/2$ при наблюдениях в двух азимутах $+24^\circ$ (квадраты) и -24° (кружки) от меридиана для наблюдений 18 мая 2007 г. активной области NOAA 10956.

3. КОМПАКТНЫЙ И ЯРКИЙ NLS В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 11358

Спектрально-поляризационные наблюдения являются инструментом для определения механизма излучения деталей структуры активной области, ее активности и размеров. Рассмотрим структуру активной области NOAA 11358. На Рис. 7 показаны сканы в интенсивности I двух последовательных дней наблюдений. Положения максимумов разнополярированных циклотронных источников в скане поляризации перенесены на скан интенсивности и проведен гаусс-анализ, по результатам которого обнаружен радиоисточник (В) между положениями циклотронных источников (А) и (С). Радиосканы в интенсивности сопоставлены со структурой фотосферного магнитного поля.

Из Рис. 7 видно, что источник В (NLS) был стабилен в течение двух дней и его интенсивность превышала амплитуды разных источников. Сопоставление со структурой фотосферного магнитного поля в линии 4500 \AA по данным спутника SDO

показывает, что циклотронные источники А и D связаны с пятнами, в то время как источник В (NLS) проецируется на межпятенную область.

Спектры степени поляризации, представленные на Рис. 8, показывают явное отличие циклотронных источников С и D от NLS-источника В, у которого нет поляризованного излучения на частотах выше 10 ГГц.

На Рис. 9 представлен спектр потока излучения NLS-источника с довольно низким показателем степени частотного спектра $\delta = 0.7$.

4. NLS, СВЯЗАННЫЙ С ТОКОВЫМ СЛОЕМ

В октябре 2003 года была проведена комплексная программа изучения природы вспышечно-продуктивных активных областей NOAA 10486 и NOAA 10488 [24, 25]. Активная область NOAA 10486 имела площадь 2610 м.д.п. (миллионных долей площади полушария) и большое число пятен (около 108). Магнитный класс — $\beta\gamma\delta/\beta\gamma\delta$. В этой АО 31 октября произошли вспышки классов M и C. В работе [15] по наблюдениям на частоте 17 ГГц было показано, что в активной области NOAA 10486 существовал NLS, который находился в основании токового слоя, который в свою очередь являлся ответственным за генерацию вспышек в этой области. Целесообразно рассмотреть радиоизлучение этой активной области в более широком диапазоне длин волн. Картина диска Солнца в западном полушарии была сложной из-за присутствия нескольких АО: NOAA 10486, NOAA 10488 и NOAA 10489. Для пространственного разделения этой активной области от области NOAA 10488 мы использовали азимутальные наблюдения, в которых угол наклона диаграммы к диску Солнца был оптимальным. Для этого были выбраны наблюдения в крайнем положительном азимуте $+29^\circ$, при этом излучение активной области NOAA 10486 было пространственно отделено от активной области NOAA 10488.

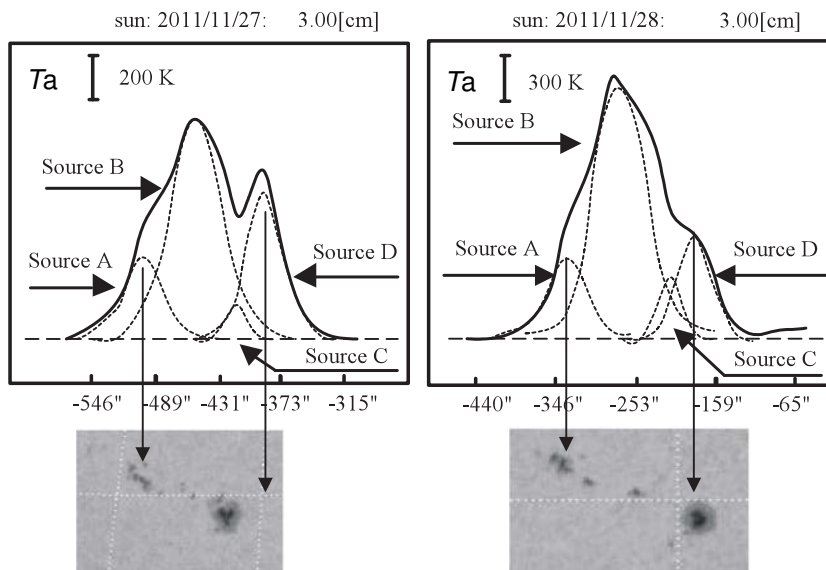


Рис. 7. Скан на 3.0 см NOAA 11358 в канале I для 27 ноября 2011 г. (слева) и для 28 ноября 2011 г. (справа). Слева направо вписаны источники A, B, C и D. Внизу приведено сопоставление со структурой фотосферного магнитного поля по данным спутника SDO AIA в линии 4500 Å.

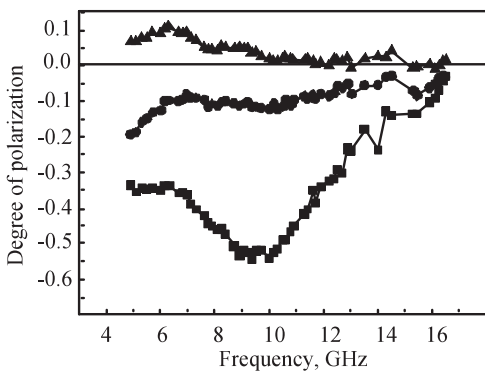


Рис. 8. Спектры степени поляризации по антенным температурам в точках максимумов излучения источников B (треугольники), C (кружки) и D (квадраты) для активной области NOAA 11358 для 28 ноября 2011 г.

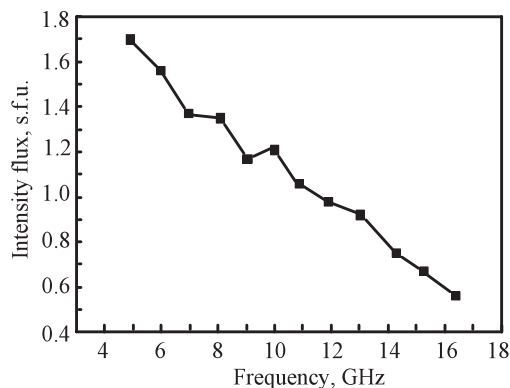


Рис. 9. Спектр потока NLS (источник B) для активной области NOAA 11358 для 28 ноября 2011 г. Показатель степени частотного спектра $\delta = 0.7$.

На Рис. 10 обращает на себя внимание вид скана на волне 5.26 см (частота 5.7 ГГц): в месте, совпадающем с положением крупной NOAA 10486, поляризация имеет положительный знак, отличающийся от соседних волн. При этом источник с восточной стороны (слева, NOAA 10487), приведенный в качестве опорного, не меняет характер кривой на этой частоте.

На Рис. 11а имеется резкий переход от минусовых значений параметра V на волнах 6.5 см и 4.93 см к плюсовым значениям на 5.26 см. Такие эффекты могут быть связаны с проявлением токового слоя, либо с тонкоструктурными особенностями атмосферы активных областей [26]. Наличие на высоких частотах сильного поляризованного

потока обычно связывается с выходом нового магнитного потока [25].

Из Рис. 12 видно, что особенность на 5.26 см связана с относительным уменьшением излучения левой поляризации на частотах 5.7, 6.08 и 6.5 ГГц в канале L . Таким образом, в этом узком частотном диапазоне начинает преобладать обыкновенное излучение.

По данным [15] в активной области NOAA 10486 существует NLS-источник с токовым слоем по одноволновым наблюдениям на ССРТ. Обнаруженная в спектре поляризации, по данным РАТАН-600, тонкая частотная особенность на частоте 5.7 ГГц сохранялась в течение нескольких дней с 25 октября по 1 ноября 2003 г.

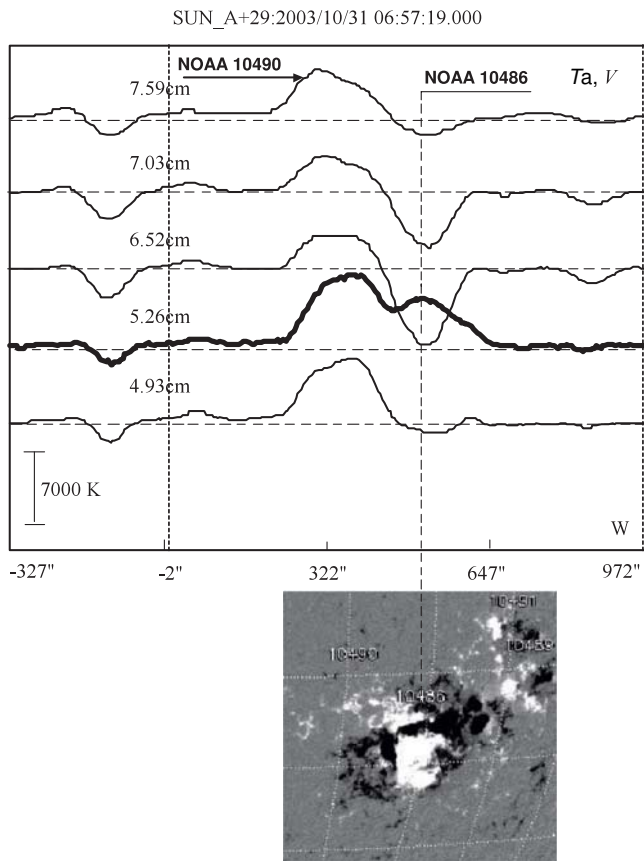


Рис. 10. Сканы активной области NOAA 10486 в поляризованном излучении за 31 октября 2003 г. на нескольких длинах волн совмещены с магнитограммой активной области по данным спутника SOHO MDI. Наблюдения выполнены в азимуте $+29^\circ$. Кривая на волне 5.26 см выделена толстой линией. На этой волне в районе темной перемычки через область магнитного поля южной полярности (светлым цветом) регистрируется инверсия знака круговой поляризации. Пунктиром показаны центр диска Солнца и западный лимб.

В работе [1] указывается на существование областей с излучением преимущественно обыкновенного типа при внедрении в них магнитного поля противоположной полярности по сравнению с преобладающим полем. Излучение этих областей связывается с наличием на луче зрения либо горячих петель, либо горячих токовых слоев CS [26]. Исходя из того, что спектральный диапазон измерения избытка обыкновенного излучения определяется полосой используемого приемного устройства, в данной работе была оценена нижняя граница размера этой области по лучу зрения: $\Delta x = 10^6$ см. Эта оценка была получена по соотношению

$$\Delta\omega/\omega \cong 2\Delta x/L_H,$$

где $\Delta\omega$ — частотная полоса, в которой преобладает обыкновенный тип излучения, L_H — характерный

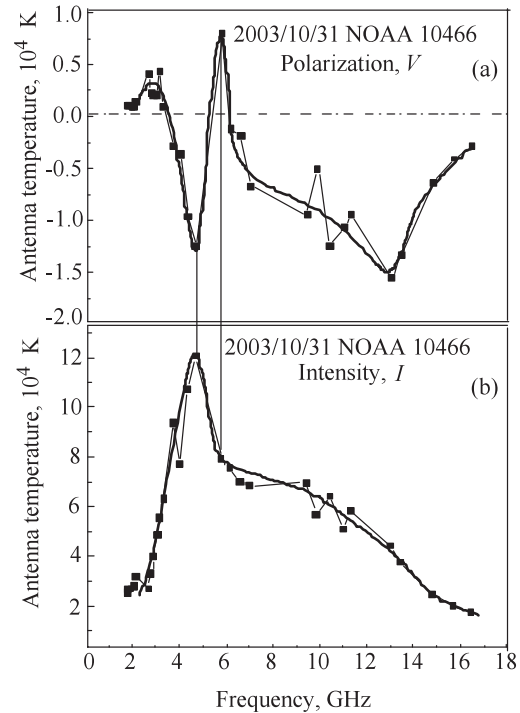


Рис. 11. Спектр антенной температуры NOAA 10486 по V (a) и по I (b) за 31 октября 2003 г. в широком диапазоне частот в точке скана, где имеется положительный максимум на частоте 5.7 ГГц в канале V . Следует отметить наличие отрицательного поляризованного потока с ростом частоты. Для выделения особенностей спектра кривые на обоих рисунках аппроксимированы полиномом третьей степени.

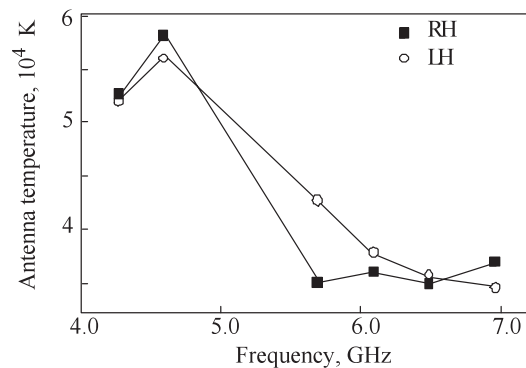


Рис. 12. Спектры антенной температуры по R и по L за 31 октября 2003 г. в точке скана, где имеется максимум правой поляризации на 5.26 см.

масштаб магнитного поля равный $L_H = 10^9$ см. Наблюдения велись на длине волны $\lambda = 6.16$ см. В нашем случае, при наличии спектральных наблюдений, мы получаем более корректную оценку Δx . Из Рис. 11а и 12 следует, что $\Delta\omega/\omega \cong 0.1$, тогда также принимая $L_H = 10^9$ см, получим

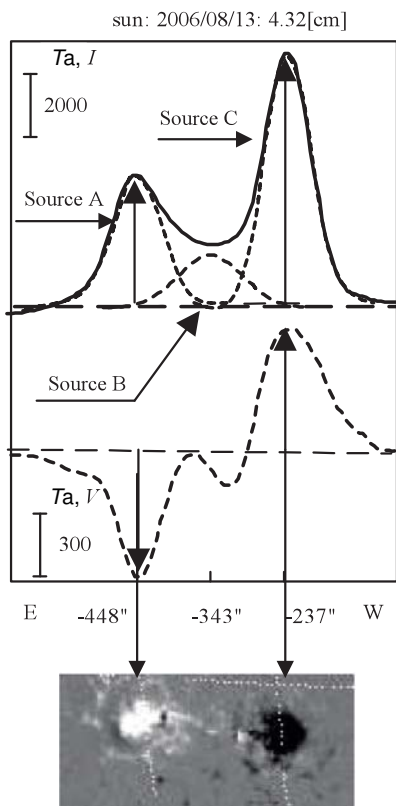


Рис. 13. Скан активной области NOAA 10904 в каналах I (верхний) и V (нижний) на волне 4.32 см совмещенный с картой магнитного поля по данным MDI SOHO.

$\Delta x = 5 \times 10^7$ см. Таким образом, наша оценка указывает на величину Δx в 50 раз большую.

5. ГАЛО КАК ПРОТЯЖЕННЫЙ NLS

Рассмотрим теперь другой тип источников, располагающихся над линией раздела магнитных полярностей — гало. В качестве примера рассмотрим наблюдения активной области NOAA 10904 12 и 13 августа 2006 г.

На Рис. 13 видно, что по сравнению с циклотронными источниками А и С, источник В — не поляризован (слабо поляризован). Это — протяженный NLS или гало, расположенное над линией раздела магнитных полярностей. Его размеры существенно больше размеров источников А и С, он покрывает практически всю активную область, а расстояние между циклотронными источниками А и С значительно увеличено.

На Рис. 14 приведены спектры радиоисточников активной области NOAA 10904. Здесь источник В — гало, расположенное над линией раздела полярностей. Яркостная температура этого источника на 1–1.5 порядка ниже, чем соседних источников.

На Рис. 15 приведены параметры активной области NOAA 10904 на следующий день, 13 августа 2006 г. Видно, что спектры размеров источников А, В и С существенно различаются. При сильном изменении исправленных размеров для источника А (в два раза), источники В и С имеют относительно постоянные размеры: около $20''$ для источника С и в пределах 100 – $130''$ для источника В.

Спектры положений радиоисточников (Рис. 15 и 16) использовались для определения геометрии их положений относительно друг друга. Так по измерениям в разные дни следует, что сначала (12 августа) NLS-гало (источник В) был ближе к источнику А, потом (13 августа) расстояние до С и А источников стали одинаковыми. Такое состояние, скорее всего, связано с усилением во времени источника С и с постепенным распадом источника А. Вершина аркады, в которой находился источник NLS-гало, тем самым приблизилась к источнику С. Таким образом, наиболее вероятной интерпретацией в этом случае будет расположение источника NLS-гало в верхней части корональной арки (или аркады). Но низкая яркостная температура указывает на то, что основное излучение этого источника возникает в нижних корональных арках.

Спектр потока для NLS-гало (источник В) на длинных волнах для 13 августа 2006 г. близок к спектрам потока для циклотронных источников А и С. В связи с этим были рассмотрены тепловые механизмы излучения источников NLS-гало. На это также указывает и стабильность излучения источника В, по крайней мере, в течение суток. Энергичные электроны не могут существовать долго, так как из-за столкновений с ионами они быстро термализуются. Время термализации [27] может быть оценено, как

$$\tau_{\text{coll}} = 0.8 E_{\text{keV}}^{3/2} / n_{e14} \text{ сек.},$$

где E_{keV} — энергия электронов в keV, n_{e14} — плотность электронов в 10^{14} м^{-3} . Так для типичной величины энергии нетеплового радиоизлучения около 100 keV и корональной плотности $n_{e14} = 10$ время термализации составляет всего 80 секунд. Трудно себе представить, чтобы электроны с одинаковыми характеристиками (по близости наклонов спектра) стабильно генерировались в течение десятков часов.

Возникает вопрос, почему при отсутствии поляризации (значение параметра V для NLS-гало близко к нулю) спектр потока этого источника (В) растет с длиной волны при относительно постоянстве его размеров 100 – $130''$.

Для интерпретации природы данного типа источников мы привлекаем циклотронный механизм генерации радиоволн, который может обеспечить

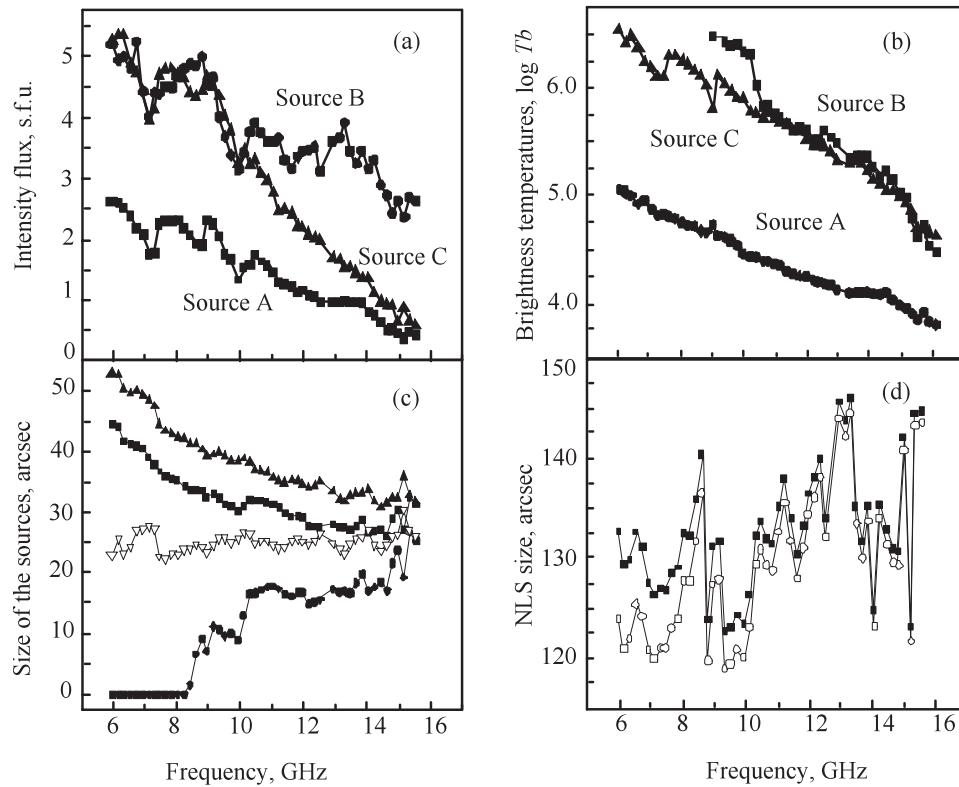


Рис. 14. Приведены: (а) спектры потоков интенсивности для циклотронных источников А и С в сопоставлении с NLS; (б) спектры яркостных температур тех же радиоисточников; (в) спектры размеров на скане для источника А (наблюденные — треугольники темные) и исправленные за сглаживание диаграммой направленности (треугольники белые), то же представлено для источника С (прямоугольники — наблюдения, а кружки — коррекция за диаграмму); (д) спектры размеров на скане для источника В (темные квадратики — наблюдения, белые — коррекция). Измерения сделаны для активной области NOAA 10904 12 августа 2006 г.

рост потока с ростом длины волны при малой степени поляризации в силу квазипоперечности генерации волн в вершине корональной арки. Покажем это соответствующими расчетами.

6. ОСОБЕННОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ КВАЗИПОПЕРЕЧНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

Рассмотрим радиоизлучение плоского слоя с характерным масштабом магнитного поля L_b под различными углами θ на частоте $\omega = 3\omega_H$, соответствующей третьей гармонике гирочастоты. В этом слое зададим электронную температуру T , электронную плотность n_e и магнитное поле B . Рассчитаем яркостную температуру $T_B = (T_e + T_o)/2$ и степень поляризации $P = (T_e - T_o)/(T_e + T_o)$, где T_e и T_o — яркостные температуры необыкновенной и обыкновенной волны. При этом $T_e = T(1 - \exp(-\mu_e L_b))$, $T_o = T(1 - \exp(-\mu_o L_b))$, где $\mu_{e,o}$ — коэффициенты поглощения соответствующей волны. Для расчета коэффициентов воспользуемся точными

выражениями для них, приведенными в [28]. Проведем расчет при следующих параметрах слоя: $T_B = 10^6$ К, $n_e = 10^9$ см $^{-3}$, $L_b = 10^9$ см при напряженности магнитного поля $B = 2023$ Гс, что соответствует 17 ГГц, и для $B = 238$ Гс, что соответствует 2 ГГц. Получим зависимости T_B и P от угла θ между лучом зрения и магнитным полем, что может характеризовать излучение корональной арки на разных расстояниях от ее вершины. На Рис. 17 приведены зависимости T_B и P от угла θ .

На нём видно, что на углах от 60° до 85° может быть существенное увеличение яркостной температуры и уменьшение степени поляризации (практически до нуля). Причем при увеличении температуры этот диапазон углов расширяется, что хорошо соответствует характеристикам излучения NLS-гало (источник концентрируется вблизи вершины корональной арки и степень его поляризации мала). При радиусе кривизны арки, равном половине расстояния между источниками, область малой степени поляризации будет иметь размеры на частотах вблизи 2 ГГц около $120''$. Это достаточно хорошо соответствует приведенному выше размеру источника NLS-гало. При высокой разрешающей

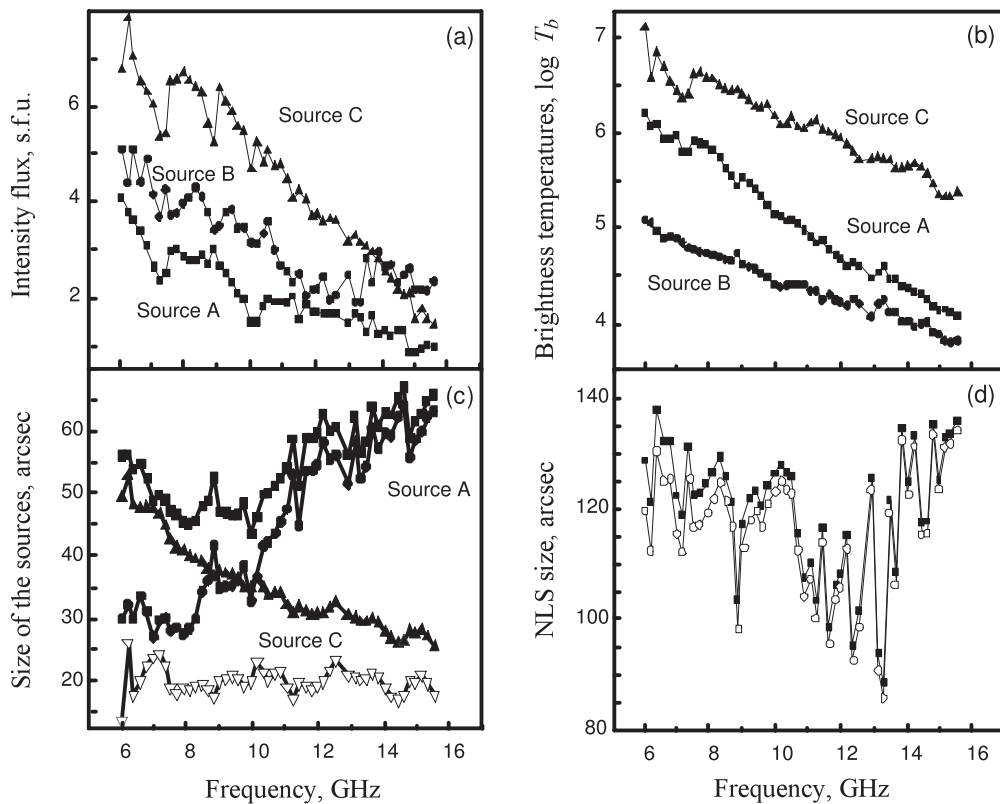


Рис. 15. Приведены измерения для активной области NOAA 10904 13 августа 2006 г. Подпись аналогична Рис. 14.

способности радиотелескопа, по-видимому, можно было бы обнаружить на самой вершине арки (в диапазоне углов $\pm 3^\circ$) уменьшение яркостной температуры приблизительно в два раза с одновременным увеличением степени поляризации до 100%. При радиусе кривизны арки от 1×10^9 см до 5×10^9 см размер этой области будет составлять от $1''5$ до $8''$.

Отметим, что указанные особенности слабо зависят от частоты, то есть и от напряженности магнитного поля. Таким образом, теория циклотронного излучения дает возможность объяснить основные особенности излучения NLS, которые заключаются в малой степени их поляризации (по разным оценкам до 30%) при росте интенсивности с длиной волны. Ранее в некоторых цитированных выше работах эти особенности для источников типа гало связывались с нетепловым механизмом генерации радиоволн. При этом, однако, игнорировалось, что такой источник должен быть крайне нестабильным (в силу неустойчивостей, приводящих к генерации энергичных электронов), и его характеристики должны существенно отличаться от характеристик тепловых источников, так как они определяются не тепловой плазмой, а характеристиками энергичных частиц.

Рассмотрим более реальную модель активной

области, аналогичную той, которая анализировалась в работе [29].

В качестве простейшего приближения, как и в работах [30, 31], была выбрана модель тора. Мы будем производить расчеты только для центральных частей такой модели. Этот подход будет справедлив и для любых других, в том числе и плоских, образований, которые могут встречаться на луче зрения. Формы силовых линий представляют собой полуокружности. В работах [30, 31] обсуждены достоинства и недостатки такой модели магнитного поля, поэтому на этом останавливаться не будем.

Магнитное поле, взятое в приближении [32], уменьшается в плоскости yh при удалении от центра основания петли с координатами $x, y = 0$ по закону

$$B(h, y) = \frac{B_{\text{ph}}}{\left(1 + \sqrt{h^2 + y^2/d}\right)^3},$$

где параметр d задавался таким образом, чтобы магнитное поле на оси тора было равным B_0 . B_{ph} — максимальное магнитное поле на фотосфере.

Пусть R_0 — радиус петли (расстояние от точки $x, y = 0$ до оси петли, a — толщина тора).

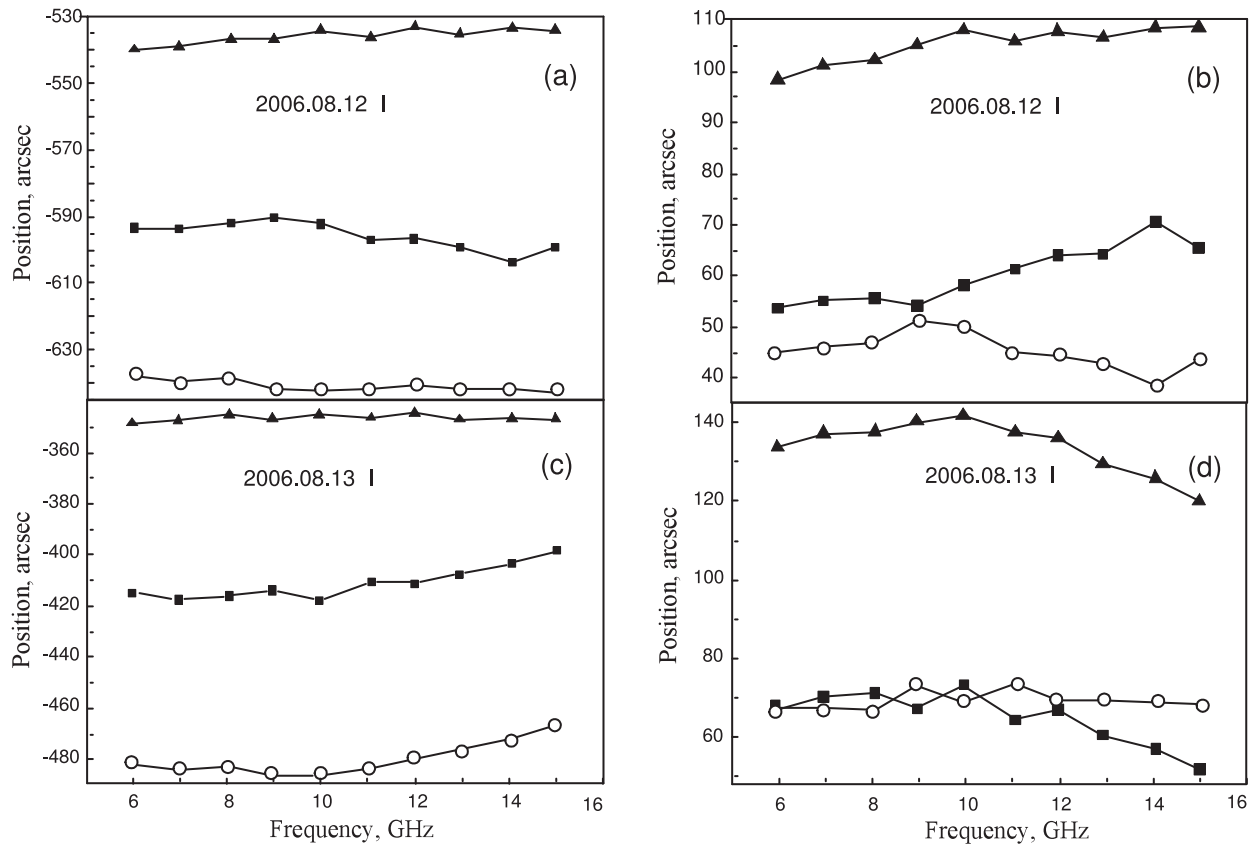


Рис. 16. Спектры положений центров источников активной области NOAA 10904 за два дня наблюдений 12 августа 2006 г. (вверху) и 13 августа 2006 г. (внизу). Здесь показано: (а) — спектры положений источника А (треугольники), В (кружки) и С (белые кружки) для 12 августа 2006 г.; (с) — то же для 13 августа 2006 г.; (b) — разности положений источников (С – А) (треугольники), (С – В) (квадратики) и (В – А) (белые кружки) в каналах *I* за 12 августа 2006 г.; (d) — то же самое определено для 13 августа 2006 г.

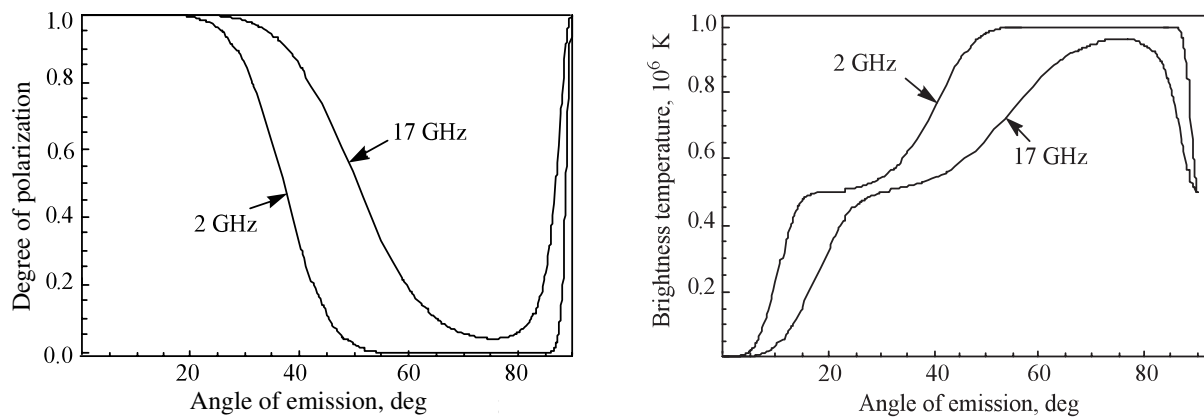


Рис. 17. Расчетные зависимости яркостной температуры T_B и степени поляризации P от угла θ для $T_B = 10^6$ К, $n_e = 10^9$ см $^{-3}$, $L_b = 10^9$ см, для $B = 2023$ Гс, что соответствует 17 ГГц, и $B = 238$ Гс, что соответствует 2 ГГц.

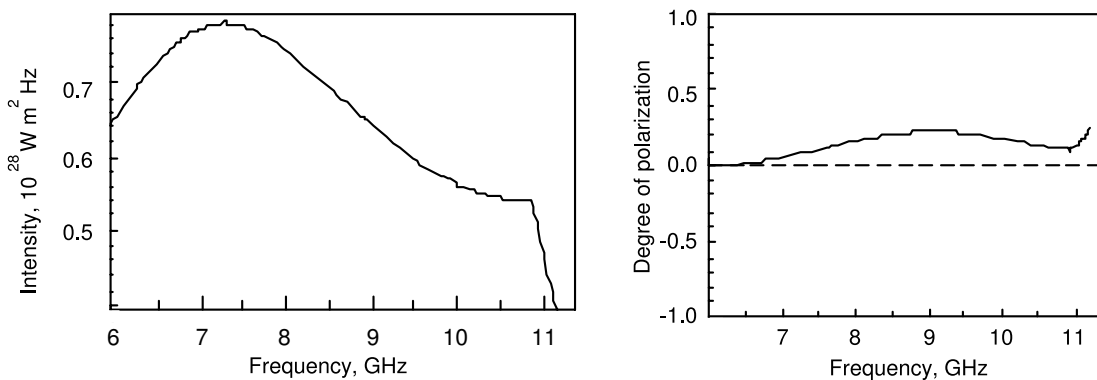


Рис. 18. Расчетные спектры для интенсивности I и степени поляризации P вблизи центра петли ($y = 0.2 \times 10^9$) для $R_0 = 9 \times 10^8$, $a = 4 \times 10^8$, $N_0 = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $h_{\text{ch}} = 0.5 \times 10^8 \text{ см}$, $h_c = 1.0 \times 10^8 \text{ см}$, $T_a = 5$, $B_0 = 900 \text{ Гс}$, $B_{\text{th}} = 1500 \text{ Гс}$, $T_{\text{ch}} = 10^4 \text{ К}$, $T_c = 10^6 \text{ К}$.

Формы силовых линий магнитного поля совпадают с линиями равного магнитного поля, определяющими гирорезонансные уровни $f = sf_B$ (f — частота волны, f_B — электронная гирочастота), в которых генерируется циклотронное излучение заданной частоты. T_a — температура петли, расположенной вдоль силовой линии магнитного поля, предполагается повышенной в торе по сравнению с фоновой температурой T_0 . Распределение кинетической температуры задается следующим образом:

$$T = T_0 \left(1 + T_a \exp \left(-\frac{(R_0 - \sqrt{y^2 + h^2})^2}{a^2} \right) \right).$$

Здесь T_0 определяет фоновую температуру атмосферы:

$$T_0(h) = \begin{cases} T_{\text{ch}}, & h > h_{\text{ch}}; \\ \frac{T_c(h - h_{\text{ch}}) + T_{\text{ch}}(h_c - h)}{h_c - h_{\text{ch}}}, & h_{\text{ch}} \leq h \leq h_c; \\ T_c, & h > h_c; \end{cases}$$

где h_{ch} и h_c представляют собой условные границы хромосферы и короны, между которыми температура нарастает от хромосферных значений T_{ch} до корональных температур T_c . Конкретный характер изменения температуры в переходной от хромосферы к короне области несущественен для наших целей, поскольку не влияет на вид частотного спектра циклотронного излучения петли.

Изменение электронной концентрации с высотой принято соответствующим барометрическому закону:

$$N_q(h) = \begin{cases} N_0 \exp \left(-\frac{h}{5 \times 10^3 T_{\text{ch}}} \right), & h \leq h_a; \\ N_0 \exp \left(-\frac{h}{5 \times 10^3 T_{\text{ch}}} \right) \\ \times \exp \left(-\frac{h - h_a}{5 \times 10^3 T_c} \right), & h > h_a; \end{cases}$$

$$N(h) = N_q(h) \times \left(1 + N_a \exp \left(-\frac{x^2 + (R_0 - \sqrt{y^2 + h^2})^2}{a^2} \right) \right),$$

$$\text{где } h_a = \frac{h_{\text{ch}} + h_c}{2}.$$

Здесь мы учли существенное различие распределений электронной плотности в хромосфере и короне, представляемых барометрическим законом в соответствии с различием температур. Принятое значение N_0 (около $N_0 = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) дает разумные значения электронной плотности петли на уровнях верхней хромосферы и короны, откуда и возникает анализируемое излучение.

Тепловое циклотронное излучение рассчитывалось, как и выше, по формулам из [28]. На Рис. 18 приведены спектры для интенсивности I и степени поляризации P вблизи центра петли ($y = 0.2 \times 10^9$) для $R_0 = 9 \times 10^8$, $N_0 = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $B_0 = 900 \text{ Гс}$, $a = 4 \times 10^8$, $h_{\text{ch}} = 0.5 \times 10^8 \text{ см}$, $h_c = 1.0 \times 10^8 \text{ см}$, $T_a = 5$, $B_{\text{th}} = 1500 \text{ Гс}$, $T_{\text{ch}} = 10^4 \text{ К}$, $T_c = 10^6 \text{ К}$.

Видно, что хотя в некоторой части спектра происходит увеличение интенсивности с ростом длины волны, тем не менее, степень поляризации по всему

спектру не превышает значение в 20% по абсолютной величине.

Таким образом, в петельных структурах удается получить низкую степень поляризации вместе с ростом интенсивности с длиной волны, что может быть использовано для объяснения излучения источников NLS-гало с помощью теплового циклотронного излучения. Естественно, количество параметров в модели, которая может дать приемлемый результат, велико, поэтому затруднительно решить обратную задачу и тем самым выбрать какой-то определенный набор этих параметров. Проведенные расчеты с использованием других моделей с разными параметрами позволяют выбрать главные из них. Конечно, основная характеристика — это положение источника в вершине корональных арок. Второе — малое различие (около 20–30%) в величинах напряженности фотосферного магнитного поля и коронального магнитного поля [33]. Ясно, что это условие легко выполняется, так как источник находится над областью фотосферы, где поле относительно мало, а в короне из-за кривизны петель и иногда их слабой расходимости [34] поле может иметь напряженность достаточной величины.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на примерах исследования спектральных характеристик излучения нескольких активных областей в широком диапазоне длин волн с высоким пространственным разрешением показано, что радиоисточники над линией раздела магнитных полярностей возникают в широком диапазоне размеров и потоков излучения. В зависимости от расстояния между расположением противоположных магнитных полей яркостная температура этих радиоисточников может меняться от $T = 10^5$ К до $T = 10^7$ К с показателем спектра от 4 до 0.7, а их размеры могут варьироваться от десятков угловых секунд до нескольких угловых минут, покрывая всю активную область в дециметровом диапазоне и превращаясь в так называемое гало. Наиболее вероятной гипотезой для источников NLS будет их расположение в верхней части корональных арок (или аркад).

В поляризованном излучении активной области NOAA 16476 имеется существенная особенность в спектре поляризованного излучения. Она проявляется в том, что на волне 5.26 см антенная температура в канале V положительна в отличие от температуры на соседних длинах волн. При этом происходит резкий переход от положительных антенных температур к отрицательным (инверсия температур) при изменении длины волны от 5.26 см до 6.52 см. Показано, что такое поведение спектра связано с относительным уменьшением вклада

необыкновенного типа излучения на частотах 5.7, 6.08 и 6.5 ГГц. Особенности в спектре излучения могут возникнуть при наличии на луче зрения горячих областей с размерами около 5×10^7 см. Появление таких областей может быть связано с образованием “моста” между отрицательными фотосферными полями через область положительного поля, соответственно с увеличением градиента магнитного поля и с последующим образованием токового слоя.

Дана интерпретация радиоизлучения источников над линией раздела магнитных полярностей. Она состоит в учете расположения этих источников в верхней части корональной арки (или аркады), высокой стабильности существования и близости их спектров спектрам соседних циклотронных источников. Предложенная интерпретация описывается в рамках циклотронного механизма генерации радиоволн и согласуется со слабой поляризацией источников NLS, в том числе и гало. Проведенный модельный расчет спектров излучения источников, находящихся в вершине корональной арки, то есть в условиях квазипоперечного распространения, позволяет получить спектральные характеристики излучения, качественно соответствующее излучению NLS-гало.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данной работе была оказана финансовая поддержка в рамках гранта РФФИ 11-02-00072, программ ПАН-22 и ПАН-4 (проект 8) и программы целевой поддержки РАТАН-600 от Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.518.11.7062 и 16.552.11.7028).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. R. Kundu and C. E. Alissandrakis, *Solar Phys.* **94**, 249 (1984).
2. C. E. Alissandrakis and M. R. Kundu, *Astrophys. J.* **253**, 249 (1982).
3. Sh. B. Akhmedov, V. N. Borovik, G. B. Gelfreikh, et al., *Astrophys. J.* **301**, 460 (1986).
4. V. M. Bogod, G. B. Gelfreikh, R. F. Wilson, et al., *Solar Phys.* **141**, 303 (1992).
5. Н. А. Драке, А. Н. Коржавин, В. М. Плотников, *Кинематика и физика небесных тел* **5** (1), 63 (1989).
6. В. Н. Borovik, С. М. Ватрушин и А. Н. Коржавин, *Астрофиз. иссл. (Изв. САО)* **28**, 123 (1989).
7. C. E. Alissandrakis, G. B. Gel'freikh, V. N. Borovik, et al., *Astronom. and Astrophys.* **270**, 509 (1993).
8. K. T. Strong, C. E. Alissandrakis, and M. R. Kundu, *Astrophys. J.* **277**, 865 (1984).
9. S. B. Akhmedov, V. M. Bogod, V. N. Borovik, et al., in *Proceedings of the International Workshop, Irkutsk, USSR, 1985* (Nauka, Novosibirsk, 1985), p. 76.

10. F. Chiuderi Drago, C. E. Alissandrakis, and M. Hagyard, *Solar Phys.* **112**, 89 (1987).
11. R. A. Sych, A. M. Uralov, and A. N. Korzhavin, *Solar Phys.* **144**, 59 (1993).
12. A. M. Uralov, R. A. Sych, V. L. Shchepkina, et al., *Solar Phys.* **183**, 359 (1998).
13. A. M. Uralov, H. Nakajima, V. G. Zandanov, and V. V. Grechnev, *Solar Phys.* **197**, 275 (2000).
14. B. V. Somov, *Astronom. and Astrophys.* **163**, 210 (1986).
15. A. M. Uralov, V. V. Grechnev, G. V. Rudenko, et al., *Solar Phys.* **249**, 315 (2008).
16. J. Lee, S. M. White, N. Gopalswamy, and M. R. Kundu, *Solar Phys.* **174**, 175 (1997).
17. K. R. Lang, R. F. Willson, J. N. Kile, et al., *Astrophys. J.* **419**, 398 (1993).
18. T. I. Kaltman, A. N. Korzhavin, N. G. Peterova, et al., *ASP Conf. Ser.* **155**, 140 (1998).
19. N. G. Peterova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **38**, 133 (1994).
20. T. I. Kaltman, A. N. Korzhavin, and N. G. Peterova, *Solar Phys.* **242**, 125 (2007).
21. V. M. Bogod, A. M. Alesin, and A. A. Pervakov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 2, 223 (2011).
22. В. М. Богод, С. Х. Тохчукова, *Солнечно-земная физика* **16**, 45 (2011).
23. Л. Н. Иванов, *Астрофиз. иссл. (Изв. САО)* **11**, 213 (1979).
24. I. S. Veselovsky, M. I. Panasyuk, S. I. Avdyushin, et al., *Cosmic Research* **42**, 435 (2004).
25. V. M. Bogod and S. Kh. Tokhchukova, *Cosmic Research* **44**, 506 (2006).
26. V. V. Zhelezniakov, E. Ia. Zlotnik, *Sov. Astron.* **24**, 448 (1980).
27. Б. А. Трубников, *Введение в теорию плазмы*, Ч. 1 (МИФИ, Москва, 1969).
28. В. В. Железняков, *Излучение в астрофизической плазме (Янус-К, Москва, 1997)*.
29. L. V. Yasnov, T. I. Kaltman, and V. M. Bogod, *Astron. Rep.* **55**, 82 (2011).
30. E. Ya. Zlotnik, T. I. Kaltman, and O. A. Sheiner, *Astron. Lett.* **33**, 168 (2007).
31. E. Ya. Zlotnik, T. I. Kaltman, and O. A. Sheiner, *Astron. Lett., Astron. Lett.* **33**, 327 (2007).
32. T. Takakura, *Solar Phys.* **26**, 151 (1972).
33. S. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin, *Solar Phys.* **79**, 41 (1982).
34. J. A. Klimchuk, *Solar Phys.* **193**, 53 (2000).

On Properties of Microwave Sources Located Above the Neutral Line of Radial Magnetic Field

V.M. Bogod, T.I. Kaltman, L.V. Yasnov

In this study we continue our investigation of the radio sources located above the neutral line of the radial magnetic field in solar active regions, i.e., the so-called neutral line associated sources (NLS). The nature of NLS is still far from being understood. To study it, we use the spectroscopic capabilities of the new broadband polarimetric facility of the RATAN-600 radio telescope. We study the radio spectra of NLS sources in several solar active regions over a wide range of variations of their sizes. We find the NLS radio emission fluxes to be related to the gradient of the quasi-longitudinal magnetic field in the photosphere. We estimate the vertical positions of NLS relative to the cyclotron radio sources. We find fine spectral features in the NLS emission, which confirm the presence of a current sheet in their sources. We associate the appreciable lack of polarization in such sources with their location near the tops of the coronal arches.

Keywords: *Sun: corona—Sun: sunspots—Sun: magnetic topology—Sun: radio radiation*