

УДК 523.947;523.98-357;523.982

О РЕГИСТРАЦИИ 4-Й ГАРМОНИКИ ГИРОЧАСТОТЫ В МИКРОВОЛНОВЫХ СПЕКТРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ НАД ПЯТНАМИ

© 2019 г. Т. И. Кальтман^{1, *}, В. М. Богод^{1, 2}

¹Санкт-Петербургский филиал специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*arles@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2018 г.

После доработки 31.03.2018 г.

Принята к публикации 20.04.2018 г.

Спектральные поляризационные наблюдения радиоисточников над солнечными пятнами ведутся на радиотелескопе РАТАН-600 регулярно. При детальном анализе спектров обнаруживаются новые эффекты. В данной работе исследуется проявление радиоизлучения 4-й гармоники гирочастоты в микроволновых спектрах, получаемых с 1% частотным разрешением в диапазоне 3–18 ГГц. Регистрация необыкновенной моды в коротковолновой части спектра сопоставляется с модельными расчетами излучения 2–5 гармоник гирочастоты на фоне теплового тормозного излучения флоккул, окружающих пятенную структуру активной области. Анализируются уярчение необыкновенной моды в коротковолновой части спектра и изломы в спектрах интенсивности излучения. Приводятся примеры интерпретации наблюдательного материала РАТАН-600 с возможным диагностированием излучения 4-й гармоники гирочастоты.

DOI: 10.1134/S0023420619010047

ВВЕДЕНИЕ

Спектры микроволнового излучения в активных областях над пятнами являются важным инструментом для изучения магнитных полей в короне. Космические обсерватории дают полный обзор структуры фотосферных магнитных полей на видимой и обратной стороне Солнца. Современная техника достигла впечатляющих успехов в создании магнитографов высокого разрешения [1, 2]. Однако исследование структуры и величины магнитного поля в короне является трудной проблемой ввиду высокой температуры плазмы, затрудняющей использование методов оптической спектрометрии. Применение крупных радиотелескопов с пространственным разрешением менее размеров активной области позволяет получить информацию о корональных магнитных полях по наблюдениям радиоисточников над пятнами непосредственно на диске. Корональная магнитометрия сегодня представляет актуальную проблему физики Солнца [3]. Измерение магнитных полей в короне по радиоданным неоднократно обсуждалось в литературе, например, в [4–9].

В результате многих модельных вычислений показано, что излучение радиоисточников над пятнами определено, в основном, тепловым циклотронным механизмом на 2–3 гармониках гирочастоты и тепловым free-free излучением [10, 11].

Суть радиоастрономических методов измерения магнитного поля в солнечных источниках основана на том факте, что радиоизлучение, генерированное в присутствии магнитного поля, циркулярно поляризовано, а знак и степень поляризации зависит от типа механизма излучения, температуры и плотности плазмы, где излучение возникло и распространялось. В случае, когда механизм эмиссии определен, поляризационные измерения радиоизлучения обеспечивают возможность определения напряженности магнитного поля (например, [12, 13]).

В работе [5] впервые показано применение спектров поляризационного излучения радиоисточников над пятнами для оценки величин корональных магнитных полей на основе циклотронного механизма на 2 и 3 гармониках гирочастоты. Здесь были применены поляризационные наблюдения на пяти длинах волн в диапазоне 2–4 см на радиотелескопе РАТАН-600. Основным выводом, сделанный по статистическим измерениям, показал, что магнитное поле над пятном на границе хромосфера-корона всего на 20–30% ниже его фотосферных значений. По наблюдениям на разных радиотелескопах установлено [9, 14–18], что надежно регистрируется излучение на второй и третьей гармониках гирочастоты.

На радиотелескопе РАТАН-600 ежедневно проводятся спектрально-поляризационные наблюдения всех активных областей, присутствующих

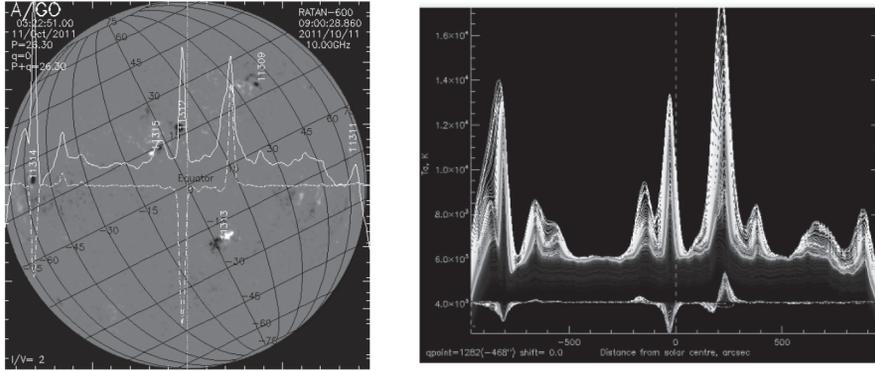


Рис. 1. Пример наблюдения диска Солнца 11.X.2011 г. с одномерной диаграммой на РАТАН-600. Слева радиоскан на частоте 10 ГГц в сопоставлении с изображением магнитограммы диска Солнца с учетом позиционного угла, в интенсивности (сплошная линия) и в поляризации (пунктир). Справа приведен многоволновый скан диска (см. www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=rat_search.ion) в интенсивности I (верхний набор кривых), и поляризации V (нижний набор кривых), диапазон частот 1–18 ГГц.

щих на диске Солнца [19]. В настоящее время, на этом инструменте значительно улучшены характеристики аппаратуры [20]. Стал доступен мгновенный детальный анализ спектра поляризации (1%) радиоизлучения во всем микроволновом диапазоне частот. На этой основе определенный прогресс получен в создании методов, регистрирующих высотную структуру магнитных полей над пятнами в переходной зоне хромосфера-корона [21–25].

В данной статье мы обсуждаем детальные микроволновые спектры АО по правой и левой круговым поляризациям с 1% частотным разрешением в широком диапазоне частот, которые соответствуют излучениям обыкновенной и необыкновенной мод на низких гармониках гирочастоты. Вклад гармоник в общее излучение формирует вид спектра по обеим модам излучения. В связи с тем, что в ряде спектров регистрируются уярчения необыкновенной моды в коротковолновой части спектра и изломы при переходе на более длинные волны, представляет интерес изучить возможность проявления излучения 4-й гирогармоники. Модельные расчеты и приведенная интерпретация наблюдательного материала указывают на прямое обнаружение излучения 4-й гармоника гирочастоты.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Мы используем многоволновые поляризационные наблюдения [26] на радиотелескопе РАТАН-600 с одномерным пространственным разрешением выше или равным размерам исследуемых радиоисточников над пятнами. Регулярные наблюдения на РАТАН-600 перекрывают частотный диапазон от 1 до 18 ГГц с 1% частотным разрешением в режиме одновременной регистрации на всех 112 частотах. На рис. 1 представлен

пример регистрации многоволнового скана диска Солнца. Наблюдения ежедневно выполняются в антенной системе Южный сектор с перископом [20], а горизонтальный и вертикальный размеры диаграммы НРВW (Half Power Beam Width) определяются соотношениями:

$$\text{НРВW}_h(\text{arcsec}) = 8.5\lambda \text{ (см)},$$

$$\text{НРВW}_v(\text{arcmin}) = 7.5\lambda \text{ (см)}.$$

Таким образом, в диапазоне длин волн длиннее 4 см на сканах РАТАН-600 регистрируется излучение радиоисточников в пределах всего диска Солнца. Для одновременной регистрации спектров по обеим круговым поляризациям используется широкополосный рупор [20] с единым фазовым центром во всем диапазоне частот (0.7–3 ГГц) и (3–18 ГГц). Высокое спектральное разрешение солнечного приемного комплекса с пространственным разрешением 15 угл. сек на 1.7 см, с одновременной регистрацией правой и левой круговой поляризации, позволяет диагностировать пространственные и частотные особенности излучения плазмы в солнечных активных и спокойных областях на уровне верхней хромосферы и нижней короны.

На рис. 1 в ходе одного наблюдения с одномерной диаграммой радиотелескопа регистрируется весь многочастотный спектр, дающий одновременную информацию обо всех радиоисточниках на диске Солнца в интенсивности $I = I(R) + I(L)$ и круговой поляризации $I = I(R) - I(L)$. Исследуемая область NOAA 11312 располагалась в центре диска Солнца, в ней регистрировался значительный поляризационный сигнал циклотронного излучения. При этом доступна также раздельная информация о спектрах $I(R)$ и $I(L)$ (см. рис. 2), что делает возможным определять тип волны излучения (о- или е-мода) при сопоставлении с фо-

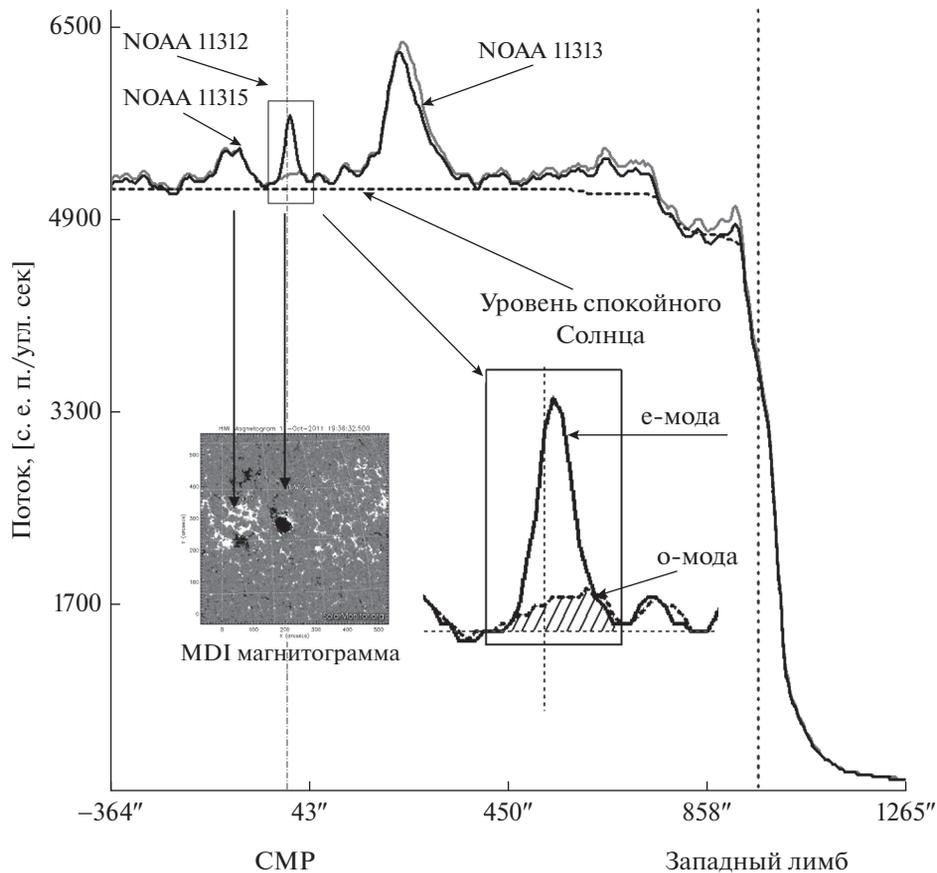


Рис. 2. Пример скана диска Солнца на волне 1.90 см для правой R (серая линия) и левой L (черная) поляризаций. Справа показано положение западного лимба. Пунктиром показано выделение уровня спокойного Солнца как нижней огибающей по всему скану.

тосферной магнитограммой для каждого радиоисточника.

На рис. 2 представлено выделение циклотронного радиоисточника NOAA 11312. В центре приведено отождествление положений радиоисточников NOAA 11315 и 11312 с положением пятен на MDI/SDO магнитограмме и приведено увеличенное изображение сканов NOAA 11312 в обеих модах. Яркое излучение узкого источника e -моды указывает на его циклотронную природу, тогда как тормозное излучение o -моды имеет меньшую интенсивность без четкой структуры. Отсутствие поляризации в источниках NOAA 11313 и 11315 указывает на отсутствие циклотронного излучения на короткой волне.

На рис. 2 видно, что излучение активной компоненты радиоизлучения, включающей радиоисточники над пятнами, флоккулы, волокна, радиогрануляционную структуру и др., происходит на фоне мощного сигнала спокойного Солнца. Для адекватной регистрации всех структур необходим большой динамический диапазон и высокая чувствительность по потоку излучения. В на-

стоящее время эти параметры на РАТАН-600 при полосе частот канала 100 МГц составляют по динамическому диапазону более 60 дБ от уровня собственных шумов и около 0.01 с. е. п. соответственно.

Особую проблему представляют вопросы выделения уровня спокойного Солнца. При исследовании узких и ярких одиночных активных областей вклад неточного определения уровня спокойного Солнца небольшой, однако, при исследовании широких структур типа широких флоккулов, гало [27], небольшие неточности в определении этого уровня Солнца могут существенно исказить результат. В связи с этим, в каждом отдельном случае для коррекции необходима дополнительная информация типа фотосферных магнитограмм, карт кальцевых флоккулов и др.

На коротких волнах (1.5–2.5 см, в зависимости от величины фотосферного магнитного поля) интенсивность радиоизлучения источников уменьшается до уровня спокойного Солнца. Процедура выделения слабых радиоисточников на фоне большого сигнала спокойного Солнца представ-

11.X.2011 г. 9:00:28.860

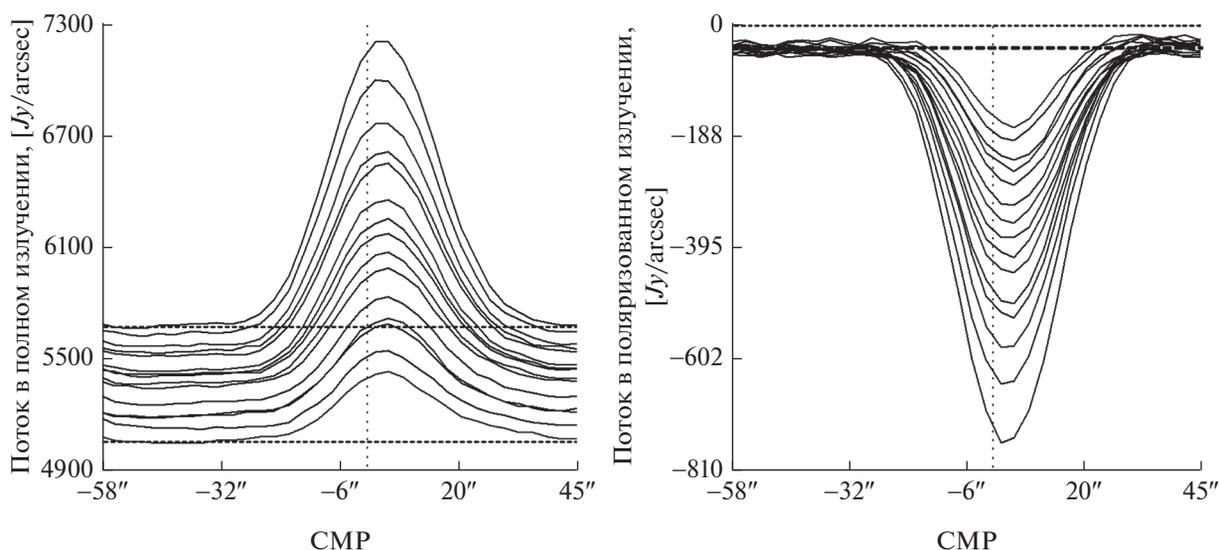


Рис. 3. Сканы активной области NOAA 11312 на коротких волнах сантиметрового диапазона: слева в интенсивности $I = I(R) + I(L)$, справа в поляризации $V = I(R) - I(L)$. Пунктиром показаны уровни спокойного Солнца для крайних волн.

ляет определенную сложность. В данном случае была применена единая методика с использованием большого числа одновременно регистрируемых каналов, которая весьма эффективна для выделения крупномасштабного сигнала спокойного Солнца. При этом учитывалась монотонная зависимость от длины волны антенной температуры Солнца, измеряемой в центре диска $T_a(\lambda)$. Величина невязки по антенной температуре $\Delta T_a(\lambda_i) / [T_a(\lambda_i) + T_a(\lambda_{i+1})] \approx \Delta \lambda_i / (\lambda_i + \lambda_{i+1})$ составляла величину, не превышающую величину частотного разрешения порядка 2%.

2. НАБЛЮДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРА NOAA 11312 В КОРОТКОВОЛНОВОМ СМ ДИАПАЗОНЕ

На рис. 2 показано выделение на волне 1.9 см радиоисточника NOAA 11312 в двух (e- и o-) модах излучения, соответствующих правой и левой поляризациям. На этой длине волны регистрируется циклотронное излучение только e-моды, тогда как o-мода излучает в тормозном (free-free) излучении. На это указывает и широкий размер источника o-моды. На рис. 3 показано резкое возрастание интенсивности и поляризованного излучения с длиной волны в диапазоне от 1.90 до 2.33 см на 15 частотах. А на рис. 4 приведены отдельные спектры излучения e-моды и o-моды. Спектр излучения e-моды более интенсивный и начинает расти на частотах ниже 16 ГГц и имеет излом на частоте 13.5 ГГц. Спектр излучения o-моды ме-

нее интенсивный, чем e-моды, и рост его излучения начинается с более низкой частоты (около 12 ГГц). В соответствии с принятыми теоретическими представлениями, уровень излучения o-моды предполагается ниже уровня e-моды. На рис. 4 представляет интерес рассмотреть излом в спектре на частоте около 13 ГГц. Множество спектров обеих мод для различных активных областей (см. Дискуссию) указывает на реальность существования такого излома. А проведенные в главе 3 модельные расчеты подтверждают наличие такого излома при сложении спектров излучения 4-й и 3-й гармоник гирочастоты.

Проведем оценку возможности измерения максимального значения коронального магнитного поля по различным гармоникам радиоизлучения, применяя методику работы [11], в которой использовалось предположение о регистрации поляризованного излучения источника над пятном на уровне нижней короны. Эта методика заключалась в экстраполяции линии резкого наклона спектра V в области коротких сантиметровых волн на ось минимального излучения, т.е. free-free уровень. В отличие от работы [5], мы используем здесь значительно большее число длин волн, отдельные спектры правой и левой круговых поляризаций, а также информацию по параметрам Стокса I и V . Кроме того, использование этих возможностей позволяет определять корональное магнитное поле по каждой моде отдельно. Известно, что в плазме с магнитным полем вращательное движение нерелятивистских электронов приводит к гиромангнитному излуче-

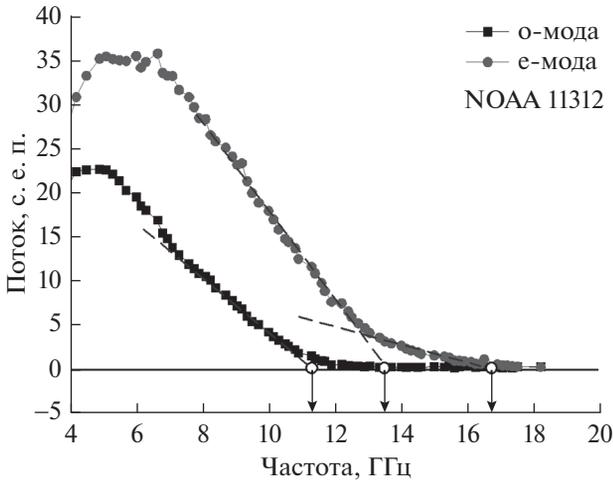


Рис. 4. Спектры обыкновенного (о-моды) и необыкновенного излучения (е-моды) для активной области NOAA 11312. Стрелками показаны оценки магнитного поля по 4-й, 3-й и 2-й гармоникам гирочастоты.

рактически характеризуется высокой степенью поляризации, достигающей величин, близких к 100%. Последнее обусловлено генерацией необыкновенной волны в более высоких и, соответственно, в более горячих слоях переходной зоны. Излучение генерируется в гирорезонансном слое с пространственной толщиной $\Delta l = L_B \frac{v_T}{c}$, где L_B – длина шкалы магнитного поля и v_T – тепловая скорость электронов [11].

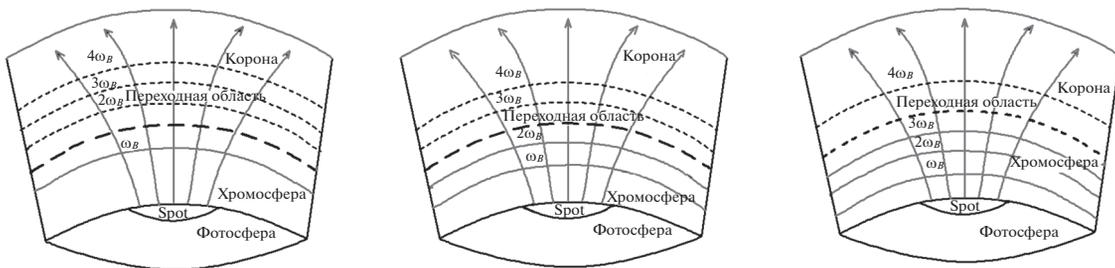
На рис. 5 приведено возможное объяснение спектров, показанных на рис. 4. Если рассматривать спектры обеих мод как постепенный выход гироуровней в корону с увеличением длины волны, то первыми в корону выходят верхние гироуровни 3 и 4. Для 4 гироуровня довольно заметная для регистрации оптическая толщина (0.1–1.0) может возникать при углах отклонения от меридиана уже порядка 10° (см. результаты расчетов в главе 3). Уровни более высокого порядка имеют весьма малую оптическую толщину и здесь не рассматриваются. На рис. 5 справа показана ситуация, когда 4-й гироуровень достиг области корональных температур, тогда как 3 и 2 гироуровни еще находятся при хромосферных температурах и не влияют на суммарное излучение радиисточника. На рис. 5 в центре (для более длинной волны, чем правый рисунок) показан случай, когда в корону проникает 3-й гироуровень. Этот момент на рис. 4 в спектре е-моды соответствует началу резкого роста излучения в диапазоне частот ниже 14 ГГц, чем и объясняется излом в спектре е-моды. Таким образом, в области частот между 12 и 17 ГГц излучает только необыкновенная мода. На рис. 5 слева 2-й гироуровень достигает области корональных температур. Соответственно, начинает расти излучение в обыкновенной моде, и на рис. 4 на частотах ниже 13 ГГц растет циклотронное излучение о-моды. В дальнейшем, в диапазоне более длинных волн (низких частот) интенсивность излучения радиисточника над пятном обязано совместному действию обеих мод и всех перечисленных гармоник, при этом доля излуче-

нию с частотой $f_B = \omega_B/2\pi = 2.8 \times 10^6 B$, где $\omega_B = eB/mc$ – круговая циклотронная частота, определяемая величиной магнитного поля. Гиромангнитное излучение происходит на основной частоте и ее гармониках $s = f/f_B$.

Циклотронное излучение солнечных микроволновых пятенных источников эффективно на низких гармониках гирочастоты, из которых только для 2 и 3 гармоник создаются условия для преимущественного излучения. Простые вычисления связывают величину магнитного поля B с номером гармоники в зависимости от частоты следующим образом [11]:

$$\begin{aligned} B(v = 2v_B) &= 180f \text{ (ГГц)}, \\ B(v = 3v_B) &= 120f \text{ (ГГц)}, \\ B(v = 4v_B) &= 90f \text{ (ГГц)}. \end{aligned}$$

Циклотронное излучение в зоне высокого градиента кинетической температуры электронов ха-



2, 3, 4-гироуровни

3 и 4-гироуровни

4-гироуровень

Рис. 5. Объяснение спектров рис. 4 в соответствии с теорией циклотронного излучения [11].

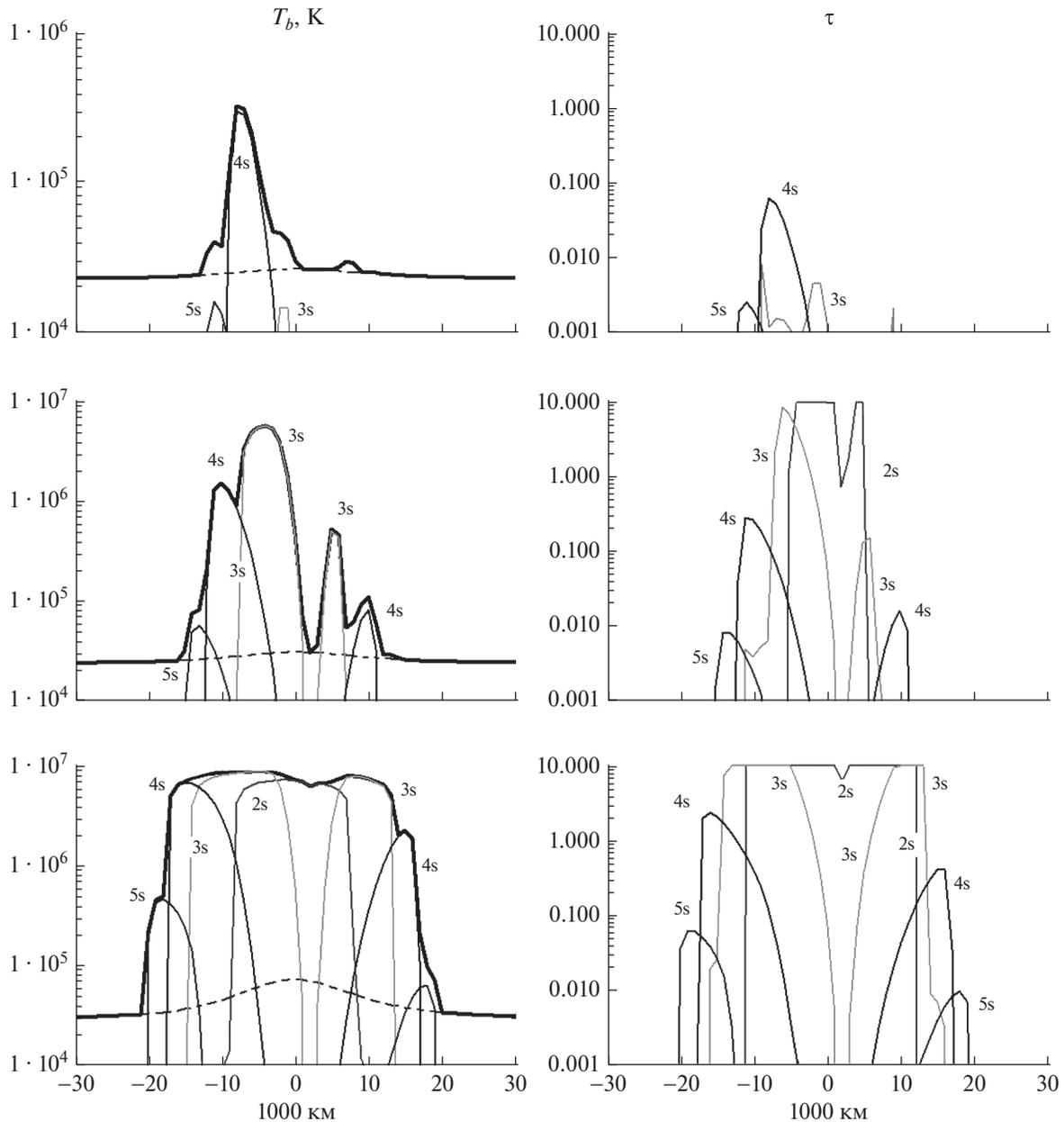


Рис. 6. Расчет яркостной температуры (слева) и оптической толщины (справа) на частотах 14,2, 12,0 и 8 ГГц (сверху вниз) вдоль диаметра пятна. Разными тонами показан вклад разных гармоник и теплового тормозного излучения.

ния 4-й гармоники довольно мала по сравнению с излучением 2-й и 3-й.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА КОРОНАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАД ПЯТНОМ

В работах [10, 11] показано, что мощное микроволновое излучение над пятнами объясняется циклотронным излучением на низких гармониках гирочастоты, при этом основной вклад дают оптически толстые 2-я гармоника гирочастоты в

обыкновенной моде и 3-я гармоника гирочастоты в необыкновенной моде. Наблюдательное обнаружение излучения на более высоких гармониках затруднено вследствие их малого вклада. Соотношение вкладов гармоник гирочастоты зависит, кроме длины волны и моды излучения, от электронной концентрации, температуры, магнитного поля, угла между силовыми линиями магнитного поля и направлением распространения излучения [11]. Вклады гармоник значительно варьируются в зависимости от условий солнечной короны. Ниже мы моделируем проявление радиоизлучения

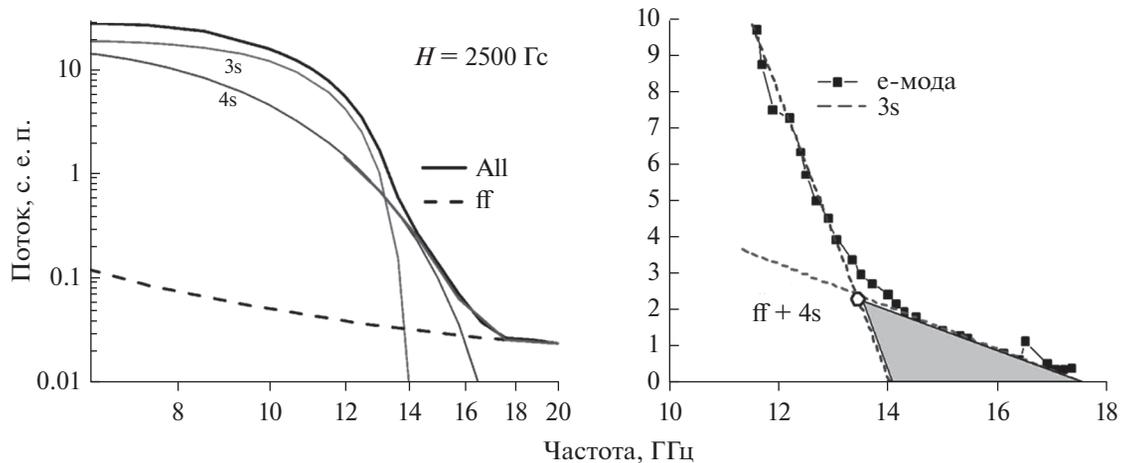


Рис. 7. Слева: модельный спектр излучения, показан вклад 3 и 4 гармоник и теплового тормозного (ff) излучения. Справа: зарегистрированный на РАТАН-600 спектр потока излучения необыкновенной моды для активной области NOAA 11302.

4-й гармоники гирочастоты в микроволновых спектрах. Рассчитывается циклотронное и тормозное излучение источника над пятном, для распределения магнитного поля которого взята дипольная модель.

В расчетах для распределения кинетической температуры и электронной концентрации с высотой использовалась модель активной области Сельхорста [28]. Для коэффициентов гирорезонансного и теплового тормозного поглощения использовались полные формулы [11]. Яркостная температура излучения T_b рассчитывалась интегрированием уравнения переноса вдоль луча зрения от корональных высот до фотосферы через 1–5 гирорезонансные слои пятенного источника.

Расчет яркостной температуры и оптической толщины для необыкновенной моды вдоль диаметра пятна представлен на рис. 6. Модель магнитного поля задана диполем, погруженным под фотосферу на 2×10^9 см, величина фотосферного поля на оси диполя 2500 Гс. Пятно отнесено от центра диска на 10° восточной долготы, чтобы избежать излучения вдоль силовых линий: окно прозрачности максимально в центре диска.

На рис. 6 показаны вклады 3 и 4 гармоник (3s и 4s) и теплового тормозного излучения в полное излучение (показано более темной линией) пятенного источника на трех частотах: на самой высокой из них 14.2 ГГц оптическая толщина 4 гармоники около 0.01–0.1. Этого достаточно, чтобы набрать яркостную температуру до $3 \cdot 10^5$ К, что превышает уровень тормозного излучения, при этом 3-я гармоника еще не вышла на корональные высоты, а 5-я хоть и вышла, но имеет незначительную оптическую толщину, и обе они (третья и пятая) не превышают уровень тормозного излучения. На более низких частотах основной вклад переходит к 3 гармонике (как видно на рис. 6, это

происходит примерно на 12 ГГц). Постепенно, с уменьшением частоты, все гирорезонансные слои 2–5 гармоник выходят в корону (нижний пример для частоты 8 ГГц), основное излучение генерируется на 3-й гармонике, в центре пятна вдоль силовых линий магнитного поля излучает вторая гармоника. Четвертая гармоника остается полупрозрачной, она дает небольшой вклад в основном на периферии пятна.

Таким образом, на частотах 18–12 ГГц происходит переход от тормозного излучения к доминирующему гирорезонансному по мере поднятия гироуровней в горячие слои верхней переходной зоны. Для необыкновенной моды наибольший относительный вклад четвертой гармоники происходит, когда 4 гироуровень находится в горячем слое, а 3-й – еще при холодной температуре. Во всем рассмотренном диапазоне 6–18 ГГц 4-я гармоника остается оптически тонкой.

Для той же модели на рис. 7 слева продемонстрирован расчетный спектр излучения (рассчитана область 40×40 тысяч км). Виден характерный излом модельного спектра вблизи частот 14–15 ГГц, подобный излому наблюдаемых на РАТАН-600 спектрах активных областей. Как показало моделирование, этот эффект связан со сменой эффективной гармоники. При уменьшении величины модельного магнитного поля излом спектра соответственно сдвигается в сторону длинных частот, а при увеличении магнитного поля – в сторону коротких частот (см. рис. 8).

4. ДИСКУССИЯ

Учет влияния 4-й гармоники позволяет уточнить методику определения магнитного поля по 3-й гармонике [5] и дает новую возможность проверять определяемую величину магнитного поля

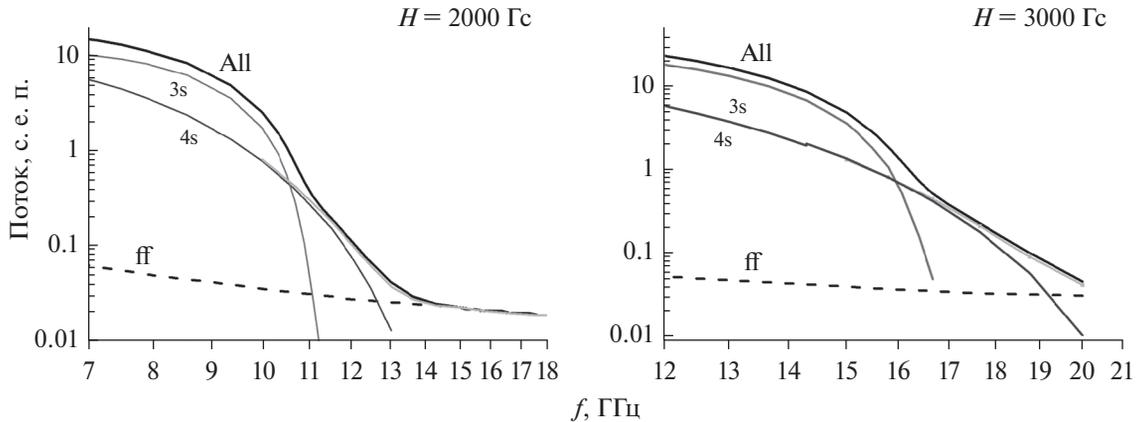


Рис. 8. Расчетные спектры излучения для разных значений фотосферного магнитного поля H на оси диполя: 2000 и 3000 Гс.

по 4-гармонике. Оценку коронального магнитного поля можно провести, применяя известную методику работы [5], в которой использовалось предположение о регистрации поляризованного излучения источника над пятном на уровне нижней короны. Эта методика заключается в экстраполяции линии резкого наклона спектра в области коротких сантиметровых волн на ось минимального излучения, т.е. free-free уровень. В отличие от работы [5], мы используем здесь значительно большее число длин волн, отдельные спектры правой и левой круговых поляризаций. По более подробному наблюдательному спектру мы имеем возможность точнее определять величину магнитного поля.

Расположенные в магнитном поле пятенного источника гирорезонансные уровни излучают на разных высотах. Подробные спектры поляризованного излучения содержат информацию о параметрах плазмы на этих высотах, что способствует детальному изучению высотной магнитной структуры и атмосферы над пятном, при соответствующем диагностическом моделировании [29], в недостаточном исследованной верхней переходной зоне, в частности, изучению высокого градиента температуры.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировано проявление радиоизлучения 4-й гармоники гирочастоты в микроволновых спектрах, получаемых с 1% частотным разрешением в диапазоне 3–18 ГГц.

Регистрация необыкновенной моды в коротковолновой части спектра сопоставлена с модельными расчетами излучения 2–4 гармоник гирочастоты на фоне теплового тормозного излучения флоккул, окружающих пятенную структуру активной области.

Объяснен характерный излом на высокочастотном участке роста спектров активных областей, наблюдаемых на РАТАН-600: как показало моделирование, этот эффект связан со сменой эффективной гармоники.

Приведены примеры интерпретации наблюдательного материала РАТАН-600 при обнаружении излучения 4-й гармоники гирочастоты в виде уярчения необыкновенной моды в высокочастотной части спектра.

Работа выполнена в рамках Государственного задания: № АААА-А17-117011810013-4, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-02-00045, и Программой ПРАН № 28 “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей”, проект 1Д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lin H., Kuhn J.R., Coulter R.* Coronal magnetic field measurements // *Astrophysical J.* 2004. V. 613. I. 2. P. L177.
2. *Tomeczyk S., Zhang J., Bastian T. et al.* Preface // 2013. *Solar Phys.* V. 288. P. 463.
3. *Aschwanden M.J.* Outstanding Problems in Solar Physics // *J. Astrophys. Astr.* 2008. V. 29. P. 3.
4. *Bogod V., Gelfreikh G.* Measurements of the magnetic field and the gradient of temperature in the solar atmosphere above a flocculus using radio observations // *Solar Physics.* 1980. V. 67. P. 29.
5. *Akhmedov S.B., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N.* The measurement of magnetic fields in the solar atmosphere above sunspots using gyroresonance emission // *Solar Phys.* 1982. V. 79. P. 41.
6. *Alissandrakis C.E., Kundu M.R.* Center-to-limb variation of a sunspot-associated microwave source // *A&A.* 1984. V. 139. P. 271.
7. *Gelfreikh G.B., Pilyeva N.A., Ryabov B.I.* On the Gradient of Coronal Magnetic Fields from Radio Observations // *Solar Phys.* 1997. V. 170. P. 253.

8. *Grebinskij A., Bogod V., Gelfreikh G. et al.* Microwave tomography of solar magnetic fields // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 2000. V.144. P. 169.
9. *White S.M.* Radio Measurements of Coronal Magnetic Fields // *Proceedings of the International Scientific Conference on Chromospheric and Coronal Magnetic Fields (ESA SP-596)* / Ed. Innes D.E., Lagg A. & Solanki S.K. Published on CDROM. 2005. id.10.1.
10. *Kakinuma T., Swarup G.* Model for the Sources of the Slowly Varying Component of Microwave Solar Radiation // *Astrophys. J.* 1962. V. 136. P. 975.
11. *Zheleznyakov V.V.* Radio Emission of the Sun & Planets. Planets Pergamon Press. 1970.
12. *Gelfreikh G.B.* Microwave diagnostics of solar magnetic fields // 1982. IN: *The dynamics of current sheets and the physics of solar activity (A83-32526 14-92)*. Riga, Izdatel'stvo Zinatne. 1982. P. 116–124.
13. *Alissandrakis C.E., Kundu M.R., Lantos P.* A model for sunspot associated emission at 6 CM wavelength // *A&A.* 1980. V. 82. P. 30.
14. *Hurfurd G.J., Gary D.E., Bastian T.S., White S.M.* FASR – A Frequency-Agile Solar Radiotelescope, American Astronomical Society. 194th AAS Meeting, id.76.03 // *Bulletin of the American Astronomical Society.* 1999. V. 31. P. 956.
15. *Bastian T.S., Gary D.E., White S. et al.* Radio Coronal Magnetography of a Large Active Region // *American Astronomical Society.* 2015. meeting #1, id.113.01.
16. *Alissandrakis C.E., Gelfreikh G.B., Borovik V.N. et al.* Spectral observations of active region sources with RATAN-600 and WSRT // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 270. P. 509.
17. *Alissandrakis C.E., Borgioli F., Chiuderi D.F. et al.* Coronal Magnetic Fields from Microwave Polarization Observations // *Solar Physics.* 1996. V. 167. Issue 1–2. P. 167.
18. *Casini R., White S.M., Judge P.G.* Magnetic Diagnostics of the Solar Corona: Synthesizing Optical and Radio Techniques // *Space Science Reviews.* 2017. V. 210. P. 145.
19. *Bogod V.M.* RATAN-600 radio telescope in the 24th solar-activity cycle. I. New opportunities and tasks // *Astrophysical Bulletin.* 2011. V. 66. P. 190.
20. *Tokhchukova S.Kh., Korzhavin A.N., Bogod V.M. et al.* Computation of the horizontal size of the RATAN-600 beam pattern for the “Southern Sector with a Flat Reflector” mode with allowance for the parameters of primary feeds // *Astrophysical Bulletin.* 2014. V. 69. P. 356.
21. *Bogod V.M., Stupishin A.G., Yasnov L.V.* On Magnetic Fields of Active Regions at Coronal Heights // *Solar Physics.* 2012. V. 276. P. 61.
22. *Bogod V.M., Yasnov L.V.* On the comparison of radio-astronomical measurements of the height structure of magnetic field with results of model approximations // *Astrophysical Bulletin.* 2009. V. 64. P. 372.
23. *Bogod V.M., Yasnov L.V.* Determination of the Structure of the Coronal Magnetic Field Using Microwave Polarization Measurements // *Solar Physics.* 2016. V. 291. P. 3317.
24. *Kaltman T.I., Bogod V.M., Stupishin A.G., Yasnov L.V.* The altitude structure of the coronal magnetic field of AR 10933 // *Astronomy Reports.* 2012. V. 56. P. 790.
25. *Nita G.M., Fleishman G.D., Jing J. et al.* Three-dimensional structure of microwave source from solar rotation stereoscopy versus magnetic extrapolations // *Astrophysical J.* 2011. V. 737. № 82.
26. *Bogod V.M., Alesin A.M., Pervakov A.A.* RATAN-600 radio telescope in the 24th solar-activity cycle. II. Multi-octave spectral and polarization high-resolution solar research system // *Astrophysical Bulletin.* 2011. V. 66. P. 205.
27. *Peterova N.G., Opeikina L.V., Topchilo N.A.* “Halo” type sources from microwave observations with high angular resolution // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014. V. 54. P. 1053.
28. *Selhorst C.L., Silva-Válio A., Costa J.E.R.* Solar atmospheric model over a highly polarized 17 GHz active region // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 488. P. 1079.
29. *Stupishin A.G., Kaltman T.I., Bogod V.M., Yasnov L.V.* Modeling of Solar Atmosphere Parameters Above Sunspots Using RATAN-600 Microwave Observations // *Solar Physics.* 2018. V. 293.