# О РЕГИСТРАЦИИ 4-Й ГАРМОНИКИ ГИРОЧАСТОТЫ

**В МИКРОВОЛНОВЫХ СПЕКТРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ НАД ПЯТНАМИ**

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.

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. Основной вывод, 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 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 гармоники 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 HPBW (Half Power Beam Width) определяются соотношениями:

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 фотосферной 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 е-моды указывает на его циклотронную природу, тогда как тормозное излучение о-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 настоящее 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 представляет 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 *Ta*( ).λ Величина невязки по антенной температуре

Δ λ*Ta*( *i*) [*Ta*(λ + λ*i*) *Ta*( *i*+1)] ≈ Δλ λ +λ*i*( *i 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 (е- и о-) модах излучения, соответствующих правой и левой поляризациям. На этой длине волны регистрируется циклотронное излучение только е-моды, тогда как о-мода излучает в тормозном (free-free) излучении. На это указывает и широкий размер источника о-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 раздельные спектры излучения е-моды и о-моды. Спектр излучения е-моды более интенсивный и начинает расти на частотах ниже 16 ГГц и имеет излом на частоте 13.5 ГГц. Спектр излучения о-моды менее интенсивный, чем е-моды, и рост его излучения начинается с более низкой частоты (около 12 ГГц). В соответствии с принятыми теоретическими представлениями, уровень излучения о-моды располагается ниже уровня е-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, раздельные 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 раздельно. Известно, что в плазме с магнитным полем вращательное движение нерелятивистских электронов приводит к гиромагнитному излучению с частотой *fB* =ω π=*B*2 2.8 ×106*B*, где ω =*B eB mc* – круговая циклотронная частота, определяемая величиной магнитного поля. Гиромагнитное излучение происходит на основной частоте и ее гармониках *s* = *f fB* .

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]:

Циклотронное излучение в зоне высокого градиента кинетической температуры электронов 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 Δ =*l LB*v*T* , где *LB* – длина *c* 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 довольна заметная для регистрации оптическая толща (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 толщу 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 радиоисточника. 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 радиоисточника над пятном обязано совместному действию обеих мод и всех перечисленных гармоник, при этом доля излучения 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 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 *Tb* 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 × 109 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 · 105 K, 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 Гц), 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 горячим 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).

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 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, раздельные 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 недостаточно исследованной верхней переходной зоне, в частности, изучению высокого градиента температуры.

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.