

УДК 523.98-337/77

ЭФФЕКТИВНЫЕ ГИРОРЕЗОНАНСНЫЕ СЛОИ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ АТМОСФЕРЫ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВЫСОТЫ

© 2020 Л. В. Яснов^{1,2*}, В. М. Богод^{3**}, А. Г. Ступишин^{1***}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 2 ноября 2018 года; после доработки 8 июля 2019 года; принята к публикации 8 июля 2019 года

Мы представляем метод определения номеров гирорезонансных слоев, наиболее эффективно излучающих в переходной области атмосферы активных областей на Солнце. Он основан на определении частоты в спектре излучения необыкновенной волны активной области, на которой резко возрастает градиент этого спектра. Проанализированы результаты наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 29 активных областей. Магнитное поле в переходной области определялось по частоте перегиба в спектре антенных температур на необыкновенной моде при условии излучения на третьей гармонике гирочастоты. Отношение напряженности фотосферного магнитного поля к напряженности магнитного поля в переходной области (1.52–2.28) существенно больше, чем полученное в работе Ахмедова и др. в 1982 г.: там поле уменьшалось в переходной области лишь на 10–20%. Высоты переходной области определялись по реконструированному магнитному полю в нелинейном бессиловом приближении, и показано, что они находятся в диапазоне 1.00–3.57 Мм.

Ключевые слова: *Солнце: магнитное поле — Солнце: радиоизлучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле активных областей играет определяющую роль в генерации различных видов солнечной активности. Поэтому уточнение знаний о структуре магнитного поля представляет важную научную и практическую задачу. Один из путей ее решения — экстраполяция фотосферного магнитного поля в хромосферу и корону на основе нелинейного бессилового приближения. Но этот метод имеет известные ограничения (De Rosa et al. 2009, Metcalf et al. 2008, Schrijver et al. 2006; 2008). Более прямой метод определения характеристик магнитного поля в высоких слоях солнечной атмосферы — анализ спектра и высотной структуры поляризованного радиоизлучения активных областей (Akhmedov et al. 1982, Alissandrakis et al. 1993, Alissandrakis and Kundu 1984, Alissandrakis et al. 1980, Brosius et al. 1997, Gary and Hurford 1994, Gary et al. 1993, Gelfreikh et al. 1987, Lang et al. 1993a; b, Lee et al. 1993, Shibasaki 1986, White et al. 1991). В работе Wang et al. (2015) с этой

целью анализируются наблюдения на Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA) в широком диапазоне длин волн. При этом предполагается, что высотная структура электронной температуры и плотности известна (Mok et al. 2005). Конечно, такое предположение существенно ограничивает справедливость полученных результатов. В работе Kaltman et al. (2012) магнитная структура, экстраполированная от фотосферного поля, анализировалась на основе спектральных наблюдений на РАТАН-600 путем подбора адекватных моделей зависимости электронной температуры и плотности от высоты. Другая методика анализа коронального магнитного поля основана на методах радиостереоскопии (Aschwanden and Bastian 1994a; b, Bogod et al. 2012, Bogod and Yasnov 2009; 2016, Nita et al. 2011). Этот метод также имеет существенные ограничения, связанные с нестабильностью антенных характеристик и радиоизлучения активных областей со временем.

Минимум предположений использовался в методе, предложенном в работе Akhmedov et al. (1982). В этом методе напряженность магнитного поля в нижней короне активных областей определяется путем выявления частоты, на которой

*E-mail: leonid.yasnov@mail.ru

**E-mail: vbog@sao.ru

***E-mail: agstup@yandex.ru

поляризация излучения на высоких частотах равна нулю. Для этого находится точка пересечения экстраполированной в сторону низких частот прямой для спектра с быстрым ростом интенсивности радиоизлучения с осью частот. В работе Akhmedov et al. (1982) использовалось ограниченное число длин волн (пять в диапазоне 2–4 см) и проводилось сравнение с продольным фотосферным магнитным полем, которое может быть заметно меньше (особенно для активных областей, расположенных на больших расстояниях от центрального меридиана Солнца). Мы проведем аналогичный анализ на современном уровне экспериментальных данных с использованием поляризационных наблюдений на РАТАН-600 в диапазоне 6–18 ГГц с частотным разрешением около 1%.

Переход с длиной волны от почти постоянных хромосферных значений к высоким корональным температурам должен приводить к заметному перелому спектра излучения. Поэтому более точно, с нашей точки зрения, находить такие переломные особенности спектра и по их частоте определять магнитное поле в переходной области. Будем также исходить не из спектров потоков поляризованного излучения, то есть из спектра параметра Стокса V , как это было сделано в работе Akhmedov et al. (1982), а из спектра антенных температур для каждой поляризованной компоненты. Определение полей в переходной области по антенным температурам имеет преимущества перед нахождением их по потокам. Это является следствием того, что антенные температуры непосредственно связаны с яркостной температурой, а именно ее рост в переходной области и необходимо зарегистрировать, и, самое главное, точность нахождения антенной температуры из наблюдений существенно выше, чем точность определения потоков. При расчете соотношения полей на фотосфере и в переходной области мы будем исходить из векторных измерений фотосферных полей по данным SDO/HMI. Очевидно, что продольная компонента фотосферного поля, которая использовалась в статье Akhmedov et al. (1982), существенно зависит от структуры поля и от местонахождения активной области и может быть заметно меньше модуля поля. Как авторы работы Akhmedov et al. (1982), так и мы в основном будем анализировать источники с высокой степенью поляризации в коротковолновом диапазоне частот.

Представляет несомненный интерес оценка высоты переходных областей в активных областях. Для этого проведем экстраполяцию фотосферного магнитного поля до высот в несколько Мм и по ней найдем высоту переходной области по определенному в ней магнитному полю. Для восстановления магнитного поля мы используем данные

SDO/Heliospheric Magnetic Imager (SDO/HMI)¹. Сначала мы разрешаем неопределенность 180-градусной поперечной составляющей магнитного поля (Leka et al. 2009, Metcalf 1994) и экстраполируем магнитное поле в хромосферу и корону в приближении потенциального поля (Alissandrakis 1981, Nakagawa and Raadu 1972). Затем мы используем эту потенциальную экстраполяцию как начальное условие итерационного метода для восстановления нелинейного бессилового поля в активной области работу (см. работу Wiegelmann 2004).

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проверим на моделях возможность определения напряженности магнитного поля по перегибам в спектре каждой поляризованной компоненты излучения. Отметим, что максимум антенной температуры непосредственно отражает именно интенсивность излучения в центре активной области. Распределение электронной плотности и температуры по высоте возьмем из модели Selhorst et al. (2008). Будем проводить расчеты для модели магнитного поля в виде диполя таким образом, чтобы поле на фотосфере было около 3000 Гс, а глубина погружения диполя под фотосферу — 10–20 Мм. Методика таких расчетов подробно приведена в работе Yasnov (2014). В такой модели поле на уровне переходной области в выбранной нами модели уменьшается приблизительно в 1.7 раза. Такая величина близка к значению, полученному ниже, для областей, которые излучали на уровне переходной области на второй и третьей гармониках гирочастоты для о- и е-моды соответственно. На рис. 1 приведён относительный спектр интенсивности для центральной части данной модели. Поскольку пространственное распределение интенсивности, особенно в центральной части, имеет достаточно сильную изрезанность, то проводилось ее усреднение по диаграмме направленности РАТАН-600. Такое же усреднение имеет место и при регистрации антенной температуры.

Точки пересечения аппроксимирующих линий на спектрах для о-моды f_{co} и е-моды f_{ce} , их отношение f_{ce}/f_{co} , B_{tr} — напряженность магнитного поля в переходной области для соответствующего номера гармоники s , B_{ph} — напряженность магнитного поля на фотосфере, а также отношение B_{ph}/B_{tr} приведены для этого спектра в таблице 1 (модель 1). Соотношение частот изгибов составляет 1.48. Это обстоятельство, а также и то, что поле на третьей гармонике на е-моды и поле на второй гармонике на о-моды близки друг к другу, позволяет считать расчетное поле в переходной

¹<http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html>

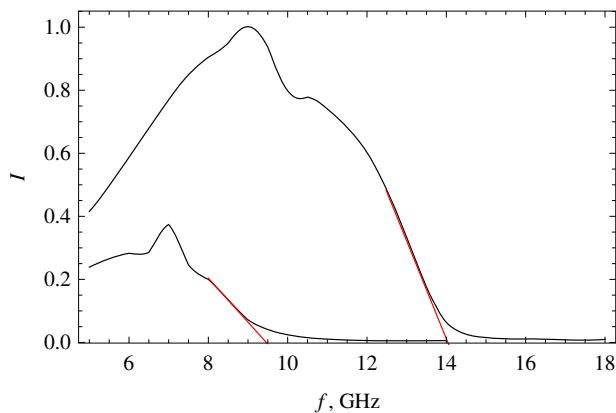


Рис. 1. Нормированные на максимум спектры интенсивности I в центральной части модели с магнитным диполем с полем на фотосфере в 3000 Гс, глубиной погружения под фотосферу 16 Мм. Распределения температуры и плотности заданы моделью Selhorst et al. (2008). Спектры с большей интенсивностью на рис. 1–4 соответствуют е-моду.

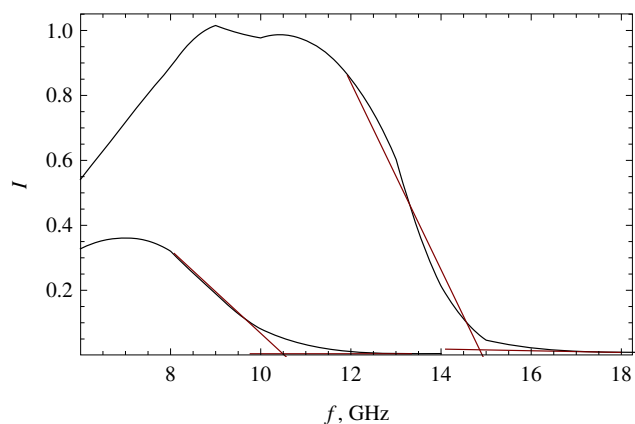


Рис. 2. Нормированные на максимум спектры интенсивности I в центральной части модели с магнитным диполем с полем на фотосфере в 3000 Гс, глубиной погружения под фотосферу 16 Мм. Плотность увеличена в пять раз по сравнению с моделью Selhorst et al. (2008).

области близким к значению 1686 Гс. Расчетное поле несколько меньше поля на оси диполя, около 1750 Гс, на высоте переходной области (3–3.3 Мм). Это незначительное отличие, скорее всего, связано с усреднением интенсивности излучения по диаграмме направленности, при котором захватывались области диполя с меньшими значениями магнитного поля.

Покажем, что даже существенное изменение модели не приведет к заметному результату в определении магнитного поля в переходной области по третьей и второй гармоникам. На рис. 2 изображен относительный спектр интенсивности при увеличении плотности в рассматриваемой модели в пять раз. Данные для этого спектра приведены в таблице 1 (модель 2).

Тот факт, что поле на третьей гармонике для е-моды и поле на второй гармонике для о-моды близки по значению, позволяет рассматривать вычисленное поле в переходной области близким к значению 1800 Гс. Напомним, что поле на оси диполя на высоте переходной области (3–3.3 Мм) составляет около 1750 Гс. Отметим, что вычисленное поле оказалось более близким к указанной величине для частоты перегиба для е-моды. В этих расчетах появилась особенность, связанная с тем, что поля, определенные по четвертой и третьей гармоникам, достаточно схожи, и можно было бы предположить, что эти гирорезонансные слои (ГРС) также вносят значительный вклад в излучение. Но это не так, и определение полей в переходной области может основываться только на предположении эффективного излучения на третьей и второй гармониках в е-моду и о-моду соответственно.

Проанализируем также модель с достаточно сильным изменением магнитного поля с высотой, положив глубину погружения диполя равной 10 Мм (рис. 3). В этом случае поле на оси диполя на высотах 3–3.3 Мм имеет напряженность 1240–1370 Гс. Уменьшение поля в переходной области частично компенсируем увеличением плотности в десять раз. Данные для этого спектра приведены в таблице 1 (модель 3). Существует близкое совпадение полей на четвертой гармонике для е-моды (996 Гс) и на третьей гармонике для о-моды (981 Гс). Опять существует соблазн идентифицировать такие поля с полем в переходной области. Но поле намного больше на оси диполя на высотах переходной области (около 1240–1370 Гс). То есть снова более точное значение поля в области перехода получается из значения частоты перегиба на е-моду при условии излучения на третьей гармонике (1328 Гс).

Приведем еще один пример моделирования применительно к одной из областей, описанной в следующем разделе. Как показывают результаты экстраполяции поля для области NOAA 11289 с использованием нелинейного бессилового приближения, поле в центральной части этой области очень точно аппроксимируется магнитным диполем с полем на фотосфере 2900 Гс и глубиной погружения диполя в 18 Мм. Для этого диполя проведем, как и ранее, расчеты по модели Selhorst et al. (2008). Данные для этого спектра приведены в таблице 1 (модель 4).

Поле на высотах 3–3.3 Мм на оси диполя в этой модели 1740–1820 Гс. То есть опять более точное значение поля в переходной области получается по частоте перегиба на е-моду при условии излучения

Таблица 1. Частоты перегиба для е-моды и о-моды; $B_{tr} = 357 f/s$

№ модели	f_{co} , ГГц	f_{ce} , ГГц	f_{ce}/f_{co}	B_{tr} , Гс, о-мода	B_{tr} , Гс, е-мода	B_{ph}/B_{tr}	
1	9.5	14.10	1.48		2516 для $s = 2$	$3000/1677 = 1.79$	
					1695 для $s = 2$		1677 для $s = 3$
					1130 для $s = 3$		1258 для $s = 4$
2	10.47	14.77	1.41		2636 для $s = 2$	$3000/1757 = 1.71$	
					1868 для $s = 2$		1757 для $s = 3$
					1245 для $s = 3$		1318 для $s = 4$
3	8.25	11.16	1.34		1992 для $s = 2$	$3000/1328 = 2.26$	
					1472 для $s = 2$		1328 для $s = 3$
					981 для $s = 3$		996 для $s = 4$
4	9.51	14.62	1.53		2609 для $s = 2$	$2900/1740 = 1.67$	
					1697 для $s = 2$		1740 для $s = 3$
					1131 для $s = 3$		1305 для $s = 4$

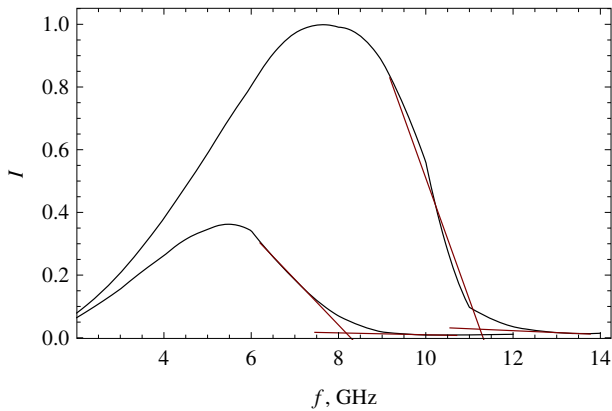


Рис. 3. Нормированные на максимум спектры интенсивности I в центральной части модели с магнитным диполем с полем на фотосфере в 3000 Гс, глубиной погружения под фотосферу 10 Мм. Плотность увеличена в десять раз по сравнению с моделью Selhorst et al. (2008).

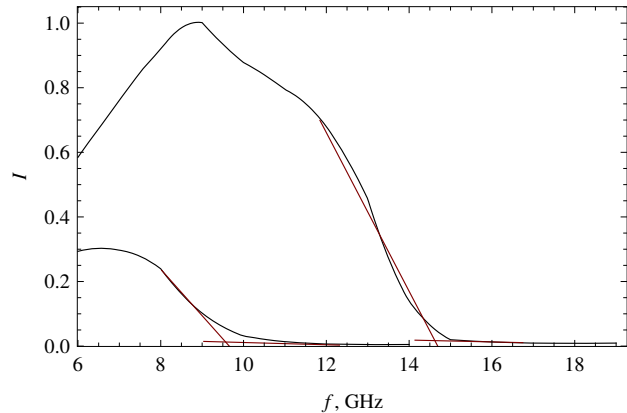


Рис. 4. Нормированные на максимум спектры интенсивности I активной области NOAA 11289 в центральной части модели с магнитным диполем с полем на фотосфере в 2900 Гс, глубиной погружения под фотосферу 18 Мм. Распределения температуры и плотности заданы моделью Selhorst et al. (2008).

на третьей гармонике. Учитывая это обстоятельство, проведем соответствующий анализ излучения ряда активных областей.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Методика определения частоты перегиба в спектре излучения следующая. На спектрах антенных температур излучения в о- и в е-модах проводятся аппроксимирующие прямые на высоких и низких частотах. Точка их пересечения соответствует частоте достаточно резкого изменения

характера спектра, и эта частота — f_c — принимается равной частоте излучения ГРС, который начинает проникать в переходную область, то есть в область резкого роста электронной температуры с высотой. По этой частоте вычисляется напряженность магнитного поля при условии, что номер гирогармоники принимает значение от 2 до 4. Более подробно проанализируем методику определения магнитного поля в переходной области на примере активных областей NOAA 12036 и NOAA 11312.

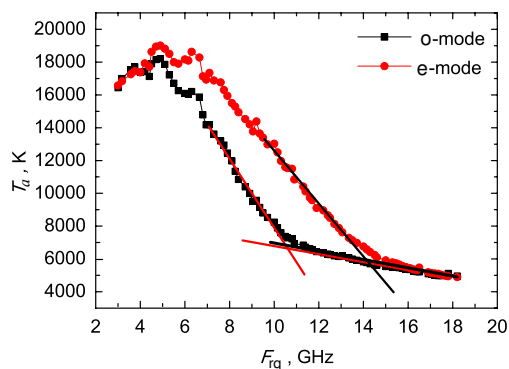


Рис. 5. Спектр антенной температуры T_a для восточной части активной области NOAA 12036 за 15 апреля 2014 г. Прямые линии здесь и далее — линейная аппроксимация высокочастотных и низкочастотных участков спектра.

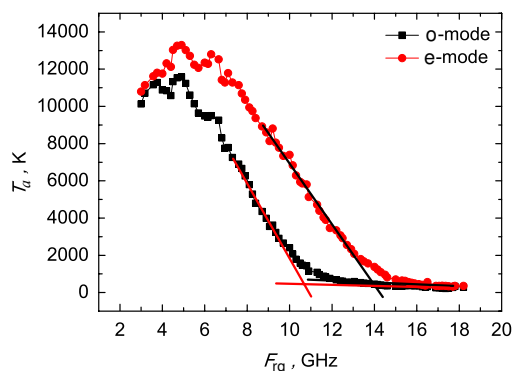


Рис. 6. Спектр антенной температуры T_a для NOAA 12036 для восточной части активной области за вычетом антенной температуры спокойного Солнца за 15 апреля 2014 г.

3.1. Магнитное поле в переходной области для NOAA 12036 и NOAA 11312

На рис. 5 приведены спектры антенной температуры излучения активной области NOAA 12036 для ее восточной части за 15 апреля 2014 г. На спектре проведены линейные аппроксимации (красные и черные прямые линии) в высокочастотной и низкочастотной частях соответственно.

Точки пересечения аппроксимирующих линий на спектре температур антенны для о-моды f_{co} и е-моды f_{ce} , их отношение f_{ce}/f_{co} , B_{tr} , а также B_{ph}/B_{tr} приведены в таблице 2. В ней также дается оценка ошибок определения соответствующих величин. Далее, анализируя другие активные области, мы не будем давать оценок ошибок из-за их достаточно малых значений. Видно, что напряженность магнитного поля в переходной области для обеих мод совпадает (около 1250 Гс), если излучение на необыкновенной моде происходит на четвертой гармонике, а на обыкновенной моде — на третьей гармонике. Эта особенность проявляется в большинстве исследованных нами областей. Но, в соответствии с результатами моделирования, будем определять магнитное поле в переходной области по частоте перегиба в спектре е-моды при условии излучения на третьей гармонике гирочастоты. Напряженность максимального магнитного поля на фотосфере определялась по данным SDO/HMI². Поле на фотосфере 2587 Гс. Таким образом, отношение напряженностей магнитного поля на фотосфере к полю в переходной области — $2587/1669 = 1.55$.

На высоких частотах существенный вклад в антенную температуру активной области вносит

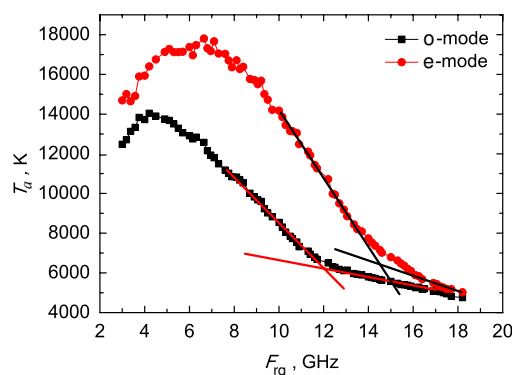


Рис. 7. Спектр антенной температуры T_a для NOAA 11312 за 10 октября 2011 г.

излучение участков спокойного Солнца, окружающих источник. Поэтому проведем соответствующие расчеты за вычетом антенной температуры излучения спокойного Солнца.

Точки пересечения аппроксимирующих линий на спектре антенных температур на рис. 6 соответствуют: 14.27 ГГц на е-моды (1698 Гс на третьей гармонике, 1273 Гс на четвертой гармонике) и 10.77 ГГц на о-моды (1922 Гс на второй гармонике, 1281 Гс на третьей гармонике). Отличие полей, определенных по третьей гармонике на е-моды, около 1.7%.

Рассмотрим активную область NOAA 11312. Она интересна высокой интенсивностью излучения и связана с униполярным источником. Это позволяет достаточно точно определить потоки излучения на высоких частотах, на которых в таком случае нет существенного мешающего влияния других близких источников.

На рис. 7, так же, как и на рис. 6, приведен спектр антенных температур.

Точки пересечения аппроксимирующих линий на спектре антенных температур соответствуют:

²<http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html>

Таблица 2. Частоты перегиба для е-моды и о-моды и напряженность магнитного поля B_{ph} на фотосфере для NOAA 12306; $B_{tr} = 357 f/s$

f_{co} , ГГц	f_{ce} , ГГц	f_{ce}/f_{co}	B_{tr} , Гс, о-мода	B_{tr} , Гс, е-мода	B_{ph}/B_{tr}
10.49 ± 0.06	14.03 ± 0.06	1.337	1872 ± 10 для $s = 2$	1669 ± 7 для $s = 3$	$2587/(1669 \pm 7) = 1.550 \pm 0.007$
			1229 ± 7 для $s = 3$	1252 ± 5 для $s = 4$	

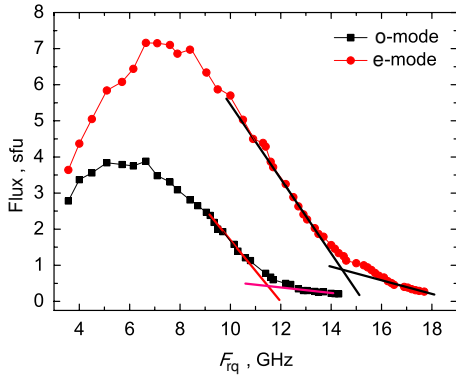


Рис. 8. Спектры потоков для NOAA 11312 за 10 октября 2011 г.

14.52 ГГц на е-моды (1727 Гс на третьей гармонике, 1295 Гс на четвертой гармонике) и 12.02 ГГц на о-моды (2145 Гс на второй гармонике, 1430 Гс на третьей гармонике). Видно, что, как и в NOAA 12036, проявляется интересный эффект, связанный с тем, что напряженности магнитного поля для обеих мод достаточно близки (около 1360 Гс), если полагать, что излучение на необыкновенной моде происходит на четвертой гармонике, а на обыкновенной моде — на третьей гармонике. Но опять поле в переходной области полагаем равным полю, рассчитанному по третьей гармонике для е-моды, то есть равным 1727 Гс. Поле на фотосфере 3005 Гс. Таким образом, отношение напряженностей магнитного поля на фотосфере к полю в переходной области — $3005/1727 = 1.74$. Представляет интерес соответствующий анализ по спектрам потоков. На рис. 8 приведены спектры потоков для NOAA 11312 за 10 октября 2011 г.

Точки пересечения аппроксимирующих линий на спектре потоков соответствуют: 14.45 ГГц на е-моды (1719 Гс на третьей гармонике, 1289 Гс на четвертой гармонике) и 11.48 ГГц на о-моды (2049 Гс на второй гармонике, 1366 Гс на третьей гармонике). Видно, что, как и в NOAA 12036, имеет место эффект, связанный с тем, что напряженности магнитного поля в переходной области для обеих мод достаточно близки (около 1327 Гс), если излучение на необыкновенной моде происходит на четвертой гармонике, а на обыкновенной моде — на третьей гармонике. Но, как и ранее, поле в пе-

Таблица 3. Поток для обеих мод на частотах, соответствующих этим модам (f_e и f_o), и их отношение (f_e/f_o) для NOAA 11312

Поток, sfu	f_o , ГГц	f_e/f_o
0.511	12	1.320
0.722	11.5	1.331
0.995	11	1.342
1.315	10.5	1.356
1.667	10	1.376
2.035	9.5	1.403
2.402	9	1.437
2.750	8.5	1.481
3.059	8	1.537

реходной области полагаем равным полю, рассчитанному по третьей гармонике для е-моды, то есть равным 1719 Гс. Таким образом, поля в переходной области, рассчитанные по антенным температурам и по потокам, практически равны (отличие в 0.5%).

Отметим, что наклон высокочастотных частей спектра заметно отличается для разных мод излучения. Он несколько меньше для о-моды. Это должно приводить к тому, что на больших высотах эффективно излучающим ГРС будет не только слой, соответствующий третьей гармонике гирочастоты на е-моды, но и ГРС, соответствующий второй гармонике гирочастоты на о-моды. Приравняв потоки для обеих мод на частотах, соответствующих этим модам (f_e и f_o), получим, что соотношение этих частот будет меняться с частотой, например, f_c , или потоком. Соответствующие данные приведены в таблице 3.

Значения f_e/f_o для низких частот близки к $3/2 = 1.5$. Таким образом, эти расчеты показывают, что выше высоты переходной области соотношение частот излучения соответствует третьей и второй гармоникам гирочастоты. То есть на более низких частотах поле может определяться и по второй гармонике гирочастоты на о-моды. То, что на более высоких частотах значение f_e/f_o близко

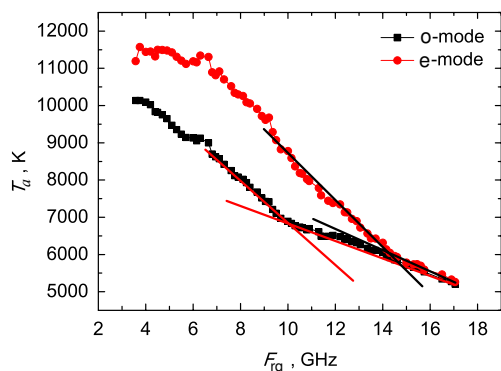


Рис. 9. Спектр антенной температуры T_a для NOAA 11671 за 15 февраля 2013 г.

к $4/3$, может означать, что на них есть заметный вклад в излучение о-моды третьей гирогармоники. Более точные расчеты по моделированию радиоизлучения активных областей должны учитывать это существенное обстоятельство.

Приведем теперь пример, когда поля, как бы определенные по четвертой и третьей гармоникам гирочастоты на е-моды и о-моды соответственно, существенно различаются.

3.2. Магнитное поле в переходной области для NOAA 11671

На рис. 9 приведены спектры антенной температуры излучения активной области NOAA 11671 за 15 февраля 2013 г. На спектре также проведены линейные аппроксимации в высокочастотной и низкочастотной областях спектра (красные и черные прямые линии).

Точки пересечения аппроксимирующих линий на спектре антенных температур соответствуют: 14.14 ГГц на е-моды (1694 Гс на третьей гармонике, 1270 Гс на четвертой гармонике) и 10.06 ГГц на о-моды (1795 Гс на второй гармонике, 1197 Гс на третьей гармонике).

В этой активной области различие полей, полученных по четвертой и третьей гармоникам на е- и о-моды соответственно, существенно различается. Тем самым мы имеем как бы другой класс источников. Поле на фотосфере 2720 Гс. Поле в переходной области, определенной по третьей гармонике на е-моды — 1694 Гс. Следовательно, соотношение полей $2720/1694 = 1.61$. Другой класс спектров представляют источники, где частоты перегибов спектров совпадают на третьей гармонике для е-моды и на второй гармонике на о-моды.

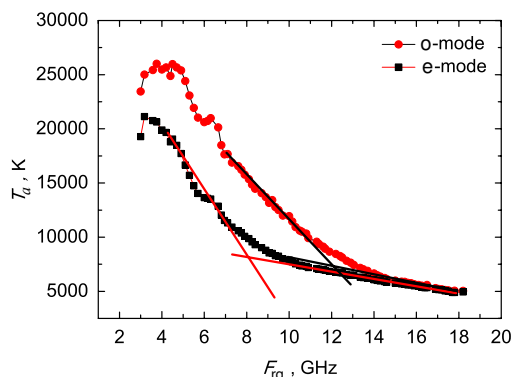


Рис. 10. Спектры антенных температур для NOAA 12036 за 17 апреля 2014 г.

3.3. Магнитное поле в переходной области для NOAA 12036 за 17 апреля 2014 г.

Точки пересечения аппроксимирующих линий на спектре антенных температур для NOAA 12036 соответствуют: 12.04 ГГц на е-моды (1432 Гс на третьей гармонике, 1075 Гс на четвертой гармонике) и 8.04 ГГц на о-моды (1435 Гс на второй гармонике, 956 Гс на третьей гармонике). В этой активной области разница в полях показывает, что излучение возникает как на третьей гармонике в е-моды, так и на второй гармонике в о-моды. Поле на фотосфере равно 2610 Гс. Следовательно, отношение полей на фотосфере и в переходной области составляет $2610/1433 = 1.82$.

3.4. Магнитное поле в переходной области и их высоты для других источников

В таблице 4 приведены результаты аналогичного анализа для других активных областей. В таблице указаны частоты пересечения аппроксимирующих прямых в спектрах антенных температур f_{ce} и f_{co} , напряженность магнитного поля в переходной области B_{tr} для соответствующего номера гармоники и отношение магнитных полей на фотосфере B_{ph} к полю в переходной области, определенное по f_{ce} при условии излучения на третьей гармонике гирочастоты B_{ph}/B_{tr} .

В пятом столбце приведено отношение частот перегибов спектра f_{ce}/f_{co} . Отметим, что это отношение должно быть близко к $4/3 = 1.333$, если излучение на е-моды идет с четвертого гироразряда, а на о-моды — с третьего гироразряда, либо, что более реально, имеет место существенное добавление в излучение на о-моды третьего гирорезонансного слоя. При излучении с третьего и второго уровней соотношение должно быть близко к $3/2 = 1.5$. Первые 19 активных областей можно отнести к классу, в котором имеет место существенное добавление в излучение на о-моды

Таблица 4. Дата и номер области, частоты пересечения аппроксимирующих линий в спектрах антенных температур f_{co} и f_c для о-моды и е-моды соответственно, напряженность магнитного поля в переходной области B_{tr} для соответствующего номера гармоники s , отношение магнитных полей на фотосфере B_{ph} к полю в переходной области B_{ph}/B_{tr} и высота переходной области h_{tr}

№	NOAA	Дата	f_{co} , ГГц	f_{ce} , ГГц	f_{ce}/f_{co}	B_{tr} , Гс	B_{ph} , Гс	B_{ph}/B_{tr}	h_{tr} , Мм
1	11665	Feb 3, 2013	10.9	13.7	1.257	1630	2800	1.72	2.22
2	12241	Dec 19, 2014	11.1	14.6	1.315	1740	2670	1.65	2.64
3	12436	Oct 23, 2015	9.69	12.63	1.303	1500	2800	1.87	2.87
4	11289	Sep 12, 2011	10.89	14.41	1.323	1710	2870	1.68	3.30
5	12034	Apr 15, 2014	11.25	14.80	1.315	1761	2771	1.57	1.95
6	12036	Apr 15, 2014	10.49	14.03	1.337	1669	2587	1.55	1.59
7	12305	Mar 28, 2015	10.83	14.30	1.320	1701	3085	1.81	3.15
8	12585	Sep 3, 2016	9.18	12.36	1.346	1470	2780	1.89	2.83
9	12567	Jul 18, 2016	10.78	14.40	1.335	1713	2648	1.55	1.81
10	12565	Jul 18, 2016	11.10	14.75	1.329	1755	2950	1.68	2.43
11	12585	Sep 5, 2016	9.55	13.22	1.384	1573	2830	1.80	2.64
12	12585	Sep 4, 2016	9.15	11.31	1.236	1345	2650	1.97	3.13
13	12585	Sep 4, 2016	9.42	11.65	1.237	1386	2820	2.03	3.23
14	11166	Mar 9, 2011	9.01	10.98	1.218	1306	2985	2.28	3.57
15	12526	Mar 30, 2016	10.42	13.68	1.312	1627	3007	1.85	2.73
16	12489	Jan 29, 2016	10.02	13.43	1.340	1598	3070	1.92	3.25
17	12473	Dec 26, 2015	10.40	14.19	1.364	1688	3010	1.78	2.69
18	12434	Oct 18, 2015	8.71	11.06	1.270	1316	2600	1.98	3.08
19	12628	Jan 24, 2017	10.19	13.70	1.344	1630	3130	1.92	2.52
20	11423	Feb 29, 2012	10.42	14.63	1.404	1740	2640	1.52	1.29
21	11671	Feb 15, 2013	10.06	14.24	1.415	1694	2720	1.61	1.61
22	12032	Apr 15, 2014	11.07	14.40	1.384	1713	2953	1.72	2.05
23	12033	Apr 15, 2014	10.62	14.71	1.385	1750	2664	1.52	1.76
24	12035	Apr 15, 2014	10.51	14.80	1.408	1761	2756	1.57	1.76
25	12036	Apr 17, 2014	8.04	12.04	1.497	1432	2610	1.82	2.26
26	11313	Oct 10, 2011	8.83	12.61	1.428	1500	2385	1.59	1.00
27	12506	Mar 1, 2016	6.45	10.39	1.61	1236	2471	2.00	2.51
28	12473	Dec 26, 2015	7.63	9.10	1.192	1082	2081	1.92	1.86
29	12524	Mar 22, 2016	11.10	12.54	1.129	1492	2865	1.92	2.85
		Средние величины	9.75	12.90	1.32	1534	2766	1.79 ± 0.20	2.40 ± 0.66

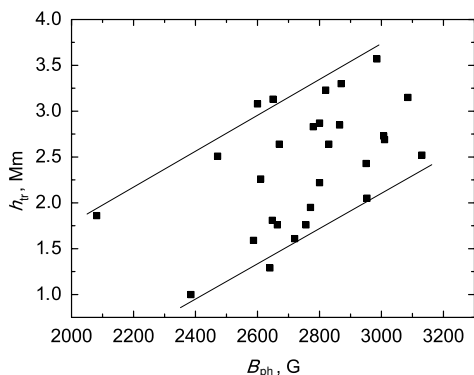


Рис. 11. Зависимость высоты переходной области h_{tr} от напряженности поля на фотосфере B_{ph} .

третьего гирорезонансного слоя. Отношение полей B_{ph}/B_{tr} для этих активных областей находится в пределах 1.55–2.28, что существенно больше, чем в работе Akhmedov et al. (1982), где поле уменьшалось в переходной области лишь на 10–20%. В последующих строках таблицы (строки 20–27) приведены данные для активных областей, для которых соотношение f_{ce}/f_{co} заметно больше, чем для первого класса. Скорее всего, это связано с более слабым излучением на о-моду третьего гирорезонансного слоя. Отношение полей B_{ph}/B_{tr} для этого класса активных областей находится в пределах 1.52–2.00. Особый класс связан с источниками в активных областях NOAA 12473 и NOAA 12524 (строки 28 и 29 таблицы 4), где f_{ce}/f_{co} близко к 1. Отношение полей B_{ph}/B_{tr} для этих активных областей равно 1.92. Среднее значение B_{ph}/B_{tr} равно 1.79 ± 0.20 .

На рис. 11 показана зависимость между высотой переходной области h_{tr} и максимальной напряженностью магнитного поля на фотосфере B_{ph} . Можно видеть, что наблюдается заметный тренд роста h_{tr} с увеличением B_{ph} . Но в целом заметный разброс высот переходной области говорит о том, что не существует единой модели атмосферы активной области.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы обнаружили много активных областей с соотношением частот перегиба f_{ce}/f_{co} близким к $4/3$. Можно было бы полагать, что это соответствует случаю, когда о-мода излучается, в основном, на третьем ГРС, а е-мода — на четвертом ГРС. Но у источников с высокой степенью поляризации на коротких волнах излучение происходит, скорее всего, в основном на третьей гармонике гирочастоты для е-моды и на второй гармонике для о-моды с существенным добавлением излучения с третьего ГРС при его нахождении в переходной области

или в самом основании короны. Это связано с высокой температурой в области их излучения. Так, например, в работе Selhorst et al. (2008) показывается, что для источника с сильной поляризацией на коротких волнах (17 ГГц) необходимо задавать высокую корональную температуру около $T = 8 \times 10^6$ К. С учетом того, что оптическая толщина ГРС увеличивается с ростом температуры, это и должно приводить к дополнительному излучению с третьего ГРС на о-моду. Действительно, излучение третьего ГРС на о-моду пропорционально $T\tau$, где T — температура слоя, а τ — его оптическая толщина. Слой прозрачен, поэтому $\tau \sim T^2$. Следовательно, при попадании этого слоя в область, где температура увеличивается на два порядка, эффективность его излучения увеличивается на шесть порядков. При этом яркостная температура второго ГРС на о-моду остается неизменной, поскольку он все еще расположен в хромосфере. Это и приводит к заметному добавлению излучения с третьего ГРС к излучению второго ГРС. Область дополнительного излучения ГРС на третьей гармонике для о-моды может занимать ограниченный диапазон частот до тех пор, пока второй ГРС на о-моду не войдет в область переходной области нижней короны. Как, например, показано в таблице 3 для NOAA 11312, на более низких частотах, когда и второй ГРС оказывается в короне, соотношение частот опять становится равным $3/2$. То есть ни о каком интенсивном излучении четвертого ГРС говорить не приходится. Анализ модели 3 также показывает, что, несмотря на то, что f_{ce}/f_{co} в этом случае равно $4/3$, измерять поле в переходной области нужно по частоте перегиба на необыкновенной волне.

Отношение напряженности фотосферного магнитного поля к напряженности магнитного поля в переходной области (до 2.28 при среднем значении 1.79) существенно больше, чем в работе Akhmedov et al. (1982), где поле уменьшалось в переходной области лишь на 10–20%. Большая высота переходной области в модели Selhorst et al. (2008) лучше соответствует большому отношению фотосферного поля и поля в переходной области, нежели малая высота в модели Mok et al. (2005). И хотя высоты переходной области (около 2.40 ± 0.66 Мм) больше соответствуют модели Selhorst et al. (2008), но заметный разброс этих высот говорит о том, что не существует единой модели атмосферы активных областей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за замечания, которые позволили улучшить статью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 8-29-21016-мк и № 18-02-00045), а также выполнена в рамках Государственного задания № АААА-А17-117011810013-4, и в рамках программы ПРАН № 28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей», проект 1Д.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin, *Sol. Phys.* **79** (1), 41 (1982).
2. C. E. Alissandrakis, *Astron. and Astrophys.* **100** (1), 197 (1981).
3. C. E. Alissandrakis, G. B. Gelfreikh, V. N. Borovik, et al., *Astron. and Astrophys.* **270** (1-2), 509 (1993).
4. C. E. Alissandrakis and M. R. Kundu, *Astron. and Astrophys.* **139** (2), 271 (1984).
5. C. E. Alissandrakis, M. R. Kundu, and P. Lantos, *Astron. and Astrophys.* **82** (1-2), 30 (1980).
6. M. J. Aschwanden and T. S. Bastian, *Astrophys. J.* **426**, 425 (1994a).
7. M. J. Aschwanden and T. S. Bastian, *Astrophys. J.* **426**, 434 (1994b).
8. V. M. Bogod, A. G. Stupishin, and L. V. Yasnov, *Sol. Phys.* **276** (1-2), 61 (2012).
9. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Astrophysical Bulletin* **64** (4), 372 (2009).
10. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Sol. Phys.* **291** (11), 3317 (2016).
11. J. W. Brosius, J. M. Davila, R. J. Thomas, and S. M. White, *Astrophys. J.* **488** (1), 488 (1997).
12. M. L. De Rosa, C. J. Schrijver, G. Barnes, et al., *Astrophys. J.* **696** (2), 1780 (2009).
13. D. E. Gary and G. J. Hurford, *Astrophys. J.* **420**, 903 (1994).
14. D. E. Gary, Y. Leblanc, G. A. Dulk, and L. Golub, *Astrophys. J.* **412**, 421 (1993).
15. G. B. Gelfreikh, N. G. Peterova, and B. I. Riabov, *Sol. Phys.* **108** (1), 89 (1987).
16. T. I. Kaltman, V. M. Bogod, A. G. Stupishin, and L. V. Yasnov, *Astronomy Reports* **56** (10), 790 (2012).
17. K. R. Lang, R. F. Willson, J. N. Kile, et al., *Astrophys. J.* **419**, 398 (1993a).
18. K. R. Lang, R. F. Willson, J. N. Kile, et al., *Astrophys. J.* **419**, 398 (1993b).
19. J. W. Lee, G. J. Hurford, and D. E. Gary, *Sol. Phys.* **144** (1), 45 (1993).
20. K. D. Leka, G. Barnes, A. D. Crouch, et al., *Sol. Phys.* **260** (1), 83 (2009).
21. T. R. Metcalf, *Sol. Phys.* **155** (2), 235 (1994).
22. T. R. Metcalf, M. L. De Rosa, C. J. Schrijver, et al., *Sol. Phys.* **247** (2), 269 (2008).
23. Y. Mok, Z. Mikić, R. Lionello, and J. A. Linker, *Astrophys. J.* **621** (2), 1098 (2005).
24. Y. Nakagawa and M. A. Raadu, *Sol. Phys.* **25** (1), 127 (1972).
25. G. M. Nita, G. D. Fleishman, J. Jing, et al., *Astrophys. J.* **737** (2), 82 (2011).
26. C. J. Schrijver, M. L. De Rosa, T. R. Metcalf, et al., *Sol. Phys.* **235** (1-2), 161 (2006).
27. C. J. Schrijver, M. L. De Rosa, T. Metcalf, et al., *Astrophys. J.* **675** (2), 1637 (2008).
28. C. L. Selhorst, A. Silva-Válio, and J. E. R. Costa, *Astron. and Astrophys.* **488** (3), 1079 (2008).
29. K. Shibasaki, *Astrophys. and Space Sci.* **119** (1), 21 (1986).
30. Z. Wang, D. E. Gary, G. D. Fleishman, and S. M. White, *Astrophys. J.* **805** (2), 93 (2015).
31. S. M. White, M. R. Kundu, and N. Gopalswamy, *Astrophys. J.* **366**, L43 (1991).
32. T. Wiegmann, *Sol. Phys.* **219** (1), 87 (2004).
33. L. V. Yasnov, *Sol. Phys.* **289** (4), 1215 (2014).

Effective Gyroresonance Layers in the Transition Region of the Active Region of the Solar Atmosphere. Magnetic Fields and Heights

L. V. Yasnov, V. M. Bogod, and A. G. Stupishin

We present a method of determination of numbers of gyroresonance layers most effectively radiating in the transition region of the active solar atmosphere. It is based on determination of frequency in the spectrum of an extraordinary wave of an active region, at which the gradient of this spectrum abruptly rises. Observations of 29 active regions carried out at the RATAN-600 radio telescope have been analyzed. The magnetic field in the transition region was determined from the frequency of bending point in the spectrum of antenna temperatures in an extraordinary mode under condition of emission in the third harmonic of the gyrofrequency. The relation between the photospheric magnetic field strength and the magnetic field strength in the transition region (1.52–2.28) is substantially greater than previously obtained, namely, the field is decreased only by 10–20% in the transition region. The heights in the transition region were determined from the reconstructed magnetic field in the nonlinear force-free approximation, and are in the range of 1.00–3.57 Mm.

Keywords: *Sun: magnetic fields—Sun: radio radiation*