

УДК 523.98

ОСОБЕННОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕЧНО-ПРОДУКТИВНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

¹В.М. Богод, ^{1,2}В.С. Котельников, ²Л.В. Яснов

ОСОБЕННОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕЧНО-ПРОДУКТИВНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

¹В.М. Богод, ^{1,2}В.С. Котельников, ²Л.В. Яснов

Введение

В работе анализируются новые явления, обнаруженные в радиоизлучении вспышечно-продуктивных активных областей Солнца, по данным многоволновых спектрально-поляризационных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 в период с 2000 по 2004 г.

Во-первых, – эффект двойной инверсии знака поляризации, когда перед вспышкой дважды происходит смена знака поляризации радиоизлучения активной области при изменении частоты в узком частотном диапазоне.

Во-вторых, – эффект микроволнового «потемнения», заключающийся в наблюдаемом систематическом уменьшении радиояркости активной области за несколько суток до вспышки [1].

Описание наблюдений

В активной области NOAA 9077, в которой 14 июля 2000 г. возникла вспышка «День Бастилии», отмечаются две особенности радиоизлучения, возникающие перед вспышкой: уменьшение потока радиоизлучения, особенно четко проявляющееся в сантиметровом диапазоне спектра, и двойная смена знака поляризации в коротковолновой части микроволнового диапазона.

В данной работе мы построили спектральные характеристики радиоизлучения только той части активной области NOAA 9077, где происходила смена знака поляризации. Как выяснилось при сопоставлении данных наблюдений, это и была область возникновения вспышки «День Бастилии».

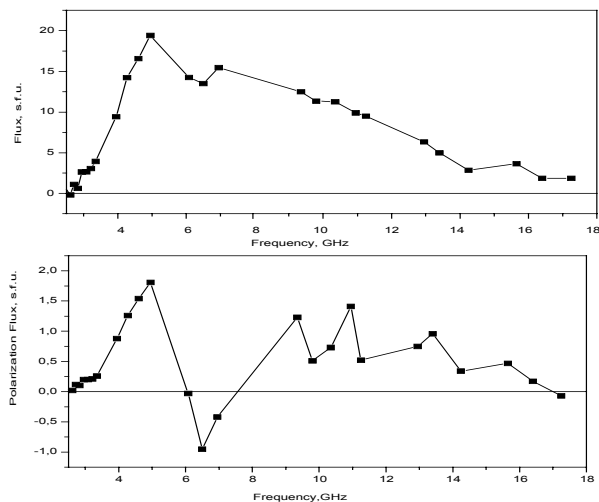


Рис. 1. приведены спектры радиоизлучения в интенсивности и поляризации той части активной области Солнца, где происходила смена знака поляризации за 13 июля 2000 г.

Приведем еще один пример с инверсией знака поляризации во вспышечно-продуктивной активной области. На рис. 2 приведены спектры потоков интенсивности и поляризации радиоизлучения активной области NOAA 9415 за 11–15 апреля 2001 г. Здесь видна двойная смена знака поляризации в частотном диапазоне от 9 до 11 ГГц в период с 13 по 15 апреля (с отрицательного на положительный). Также видно, что и в данном случае имеет место уменьшение потока радиоизлучения перед вспышкой, которая произошла 15 апреля.

Еще одним примером эффекта микроволнового потемнения являются события, произошедшие в активной области NOAA 10696 в период с 7 по 10 ноября 2004 г. На рис. 3 изображен поток интенсивности радиоизлучения АО 10696 на волне 2.24 см и полная площадь пятен этой активной области в период со 2 по 13 ноября 2004 г.

Анализ возможных причин деполяризации

Проведем анализ возможных причин деполяризации излучения и получим некоторые оценки физических параметров областей, в которых может происходить такая инверсия поляризации.

Нами было исследовано несколько механизмов, которые могли привести к двойной смене знака поляризации [2]:

-линейное взаимодействие волн в области квази-поперечного магнитного поля;

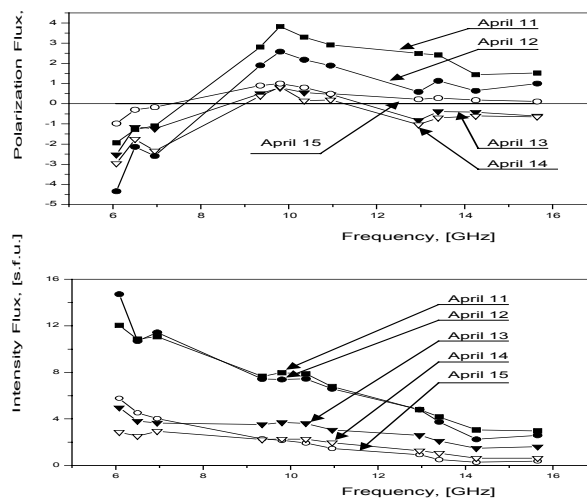


Рис. 2. Спектры потоков интенсивности и поляризации радиоизлучения активной области NOAA 9415 за 11–15 апреля 2001 г. На верхнем рисунке наблюдается двойная инверсия поляризации для 13 и 14 апреля перед вспышкой X14.0 15 апреля в диапазоне 9–11 ГГц. На нижнем рисунке видно падение сигнала интенсивности от дня ко дню перед мощной вспышкой.

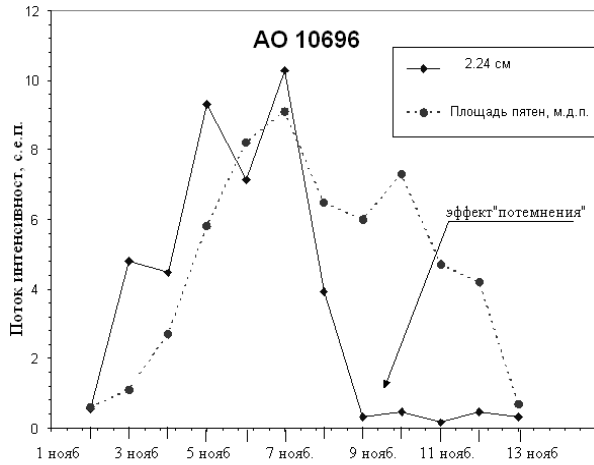


Рис. 3. Сравнение потока интенсивности радиоизлучения на волне 2.24 см и величины площади группы NOAA 10696 в период со 2 ноября 2004 г. по 13 ноября 2004 г. Видно резкое уменьшение сигнала интенсивности перед вспышкой X2.5 10 ноября.

- линейное взаимодействие волн в области квази-нулевого магнитного поля,
- рассеяние радиоволн на волнах высокочастотной плазменной турбулентности,
- распространение радиоволн в атмосфере с наличием холодных или горячих волокон по отношению к фоновой плазме,
- распространение радиоволн через токовые слои с различной структурой,
- генерация радиоволн в магнитных «ямах».

Было показано, что наиболее вероятным из них является генерация радиоволн в магнитных ямах, в которых направление магнитных силовых линий меняет свой знак по отношению к наблюдателю.

Такая ситуация может, например, иметь место при прогибе магнитных силовых линий под воздействием, например, волокна. Такая топология магнитного поля может быть реализована и в сложной структуре магнитного поля. При перемещении, например, третьего гирорезонансного уровня на склон такой магнитной «ямы» знак вращения необыкновенной волны по отношению к наблюдателю совпадет со знаком вращения обыкновенной волны на втором гирорезонансном уровне, находящимся вне «ямы», что и приведет к смене знака поляризации. Если полагать, что зависимость напряженности магнитного поля от высоты описывается формулой

$$H(h) = 2500 \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + (7.7 \cdot 10^8)^2}} \right) \text{ Гс, а смена знака}$$

поляризации происходит в 10 % частотном интервале вблизи длин волн 4–5 см, то протяженность «ямы» во фронтальной плоскости должна составить величину около $1.2 \cdot 10^8$ см. Отметим, что при этом параметр Стокса I не должен претерпевать существенных изменений с частотой, что соответствует нашим наблюдениям. В этой модели имеет место и слабая зависимость частотного диапазона смены знака поляризации при перемещении активной области по диску Солнца.

При распространении радиоволн к наблюдателю при такой структуре магнитного поля неизбежно произойдет пересечение с областью квазиперпендикулярного магнитного поля, и знак поляризации сохранится, если это будет область изотропного распространения радиоволн. Условие изотропного распространения, при котором знак вращения электромагнитной волны останется неизменным при изменении знака направления магнитного поля по лучу зрения,

вытекает из $G_{\perp} = \frac{\omega_p^2 \omega_B^3}{c \omega^4 |d\alpha/dz|}$ при $G_{\perp} \ll 1$:

$$H < \frac{\omega^{4/3}}{7.8 \cdot 10^6} \left(\frac{d\alpha/dz}{n_e} \right)^{1/3},$$

где ω_p – плазменная частота, ω_B – гирочастота, α – угол между направлением распространения излучения и магнитным полем, n_e – концентрация электронов. При изменении α от 10 до 45 градусов на расстоянии около 10^9 см и при изменении n_e в пределах $10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-3}$ изотропное распространение радиоволн с длинами волн 4–5 см имеет место для $H < 10 \div 30$ Гс. Таким образом, магнитный жгут, в котором имеет место прогиб магнитных силовых линий, должен быть окружен магнитным полем с $H < 10 \div 30$ Гс. Гирорезонансный уровень, соответствующий третьей гармонике гирочастоты на $\lambda = 4.5$ см, имеет магнитное поле напряженностью около 700 Гс. Таким образом, для сохранения знака поляризации необходимо, чтобы прогиб магнитных силовых линий сохранялся в диапазоне от $H = 700$ Гс до $H = 10 \div 30$ Гс. Это условие, по-видимому, накладывает существенное ограничение на данную модель двойной смены знака поляризации.

Уменьшение интенсивности радиоизлучения активной области перед вспышкой и ее связь с фотосферными магнитными полями

Заметное уменьшение интенсивности микроволнового излучения активной области за несколько суток до мощной вспышки по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 было впервые обнаружено для события 12 Мая 1997 г. в NOAA 8038 [3].

Ниже мы остановимся на анализе этого явления в активной области NOAA 9077.

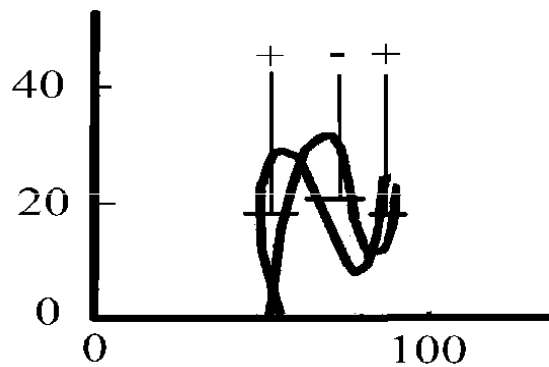


Рис. 4. Схема распространения необыкновенной (или обыкновенной) волны при прогибе магнитных силовых линий. Символы + и – означают разные знаки вращения волны, шкалы осей проградуированы в секундах дуги.

В работе [4] проанализирована динамика фотосферного поля перед вспышкой “День Бастилии” за 10-14 июля 2000 г. Основной результат этой работы отображен на рис. 5, где представлены результаты расчетов продольного тока J_z по непотенциальной составляющей магнитного поля, продольная спиральность или скрученность тока - $J_z \cdot B_z$, где B_z - индукция продольного магнитного поля, и плотность магнитной энергии в источнике, пропорциональной $|\mathbf{B}_s|^2$, где $\mathbf{B}_s = \mathbf{B}_o - \mathbf{B}_f$, \mathbf{B}_o - наблюдаемый вектор магнитного поля, \mathbf{B}_f - линейная экстраполяция бессилового поля из наблюдаемого поля. На этом же рисунке помещены результаты наблюдений антенной температуры этого источника на волне 7.03 см. по наблюдениям на РА-ТАН-600. Отметим, что и на других волнах наблюдается аналогичная динамика радиоизлучения. На более длинных волнах она менее выражена, на более коротких волнах антенная температура изменяется со временем сильнее. Таким образом, выбранная волна характеризует некоторую среднюю динамику излучения.

Важность расчетов характеристик непотенциальности магнитного поля обусловлена тем, что именно с ней связывают энергию, реализуемую во вспышках. Авторы работы [4] пришли к выводу, что существенные изменения в непотенциальном магнитном поле, произошедшие с 13 по 14 июля, привели к пересоединению магнитных силовых линий, которое в свою очередь явилось непосредственной причиной вспышки.

Наши результаты показывают, что изменения в непотенциальном магнитном поле отражаются адекватным образом и на величине антенной температуре. Уменьшение плотности магнитной энергии в источнике, по-видимому, приводит к понижению по высоте в солнечной атмосфере гирорезонансных уровней, а, следовательно, к понижению их электронной температуры и в конечном итоге к уменьшению интенсивности излучения. Однако то, что радиоизлучение начало реагировать на предвспышечные процессы в активной области существенно раньше фотосферного магнитного поля указывает на то, что этот процесс более отчетливо проявляется в хромосферных и корональных магнитных полях. Не исключено и то, что и сам предвспышечный процесс начинается сначала в более высоких областях солнечной атмосферы, и только затем проявляется в фотосферных магнитных полях.

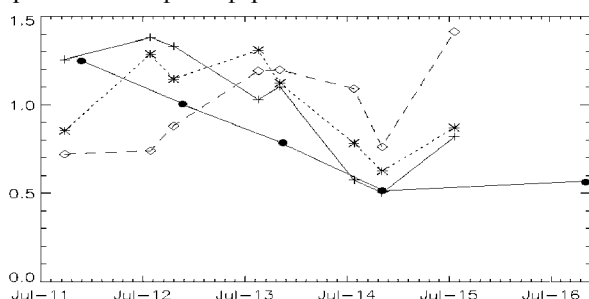


Рис. 5. Изменение продольного тока (сплошная линия с крестиками), скрученность тока (линии из точек), плотность магнитной энергии в источнике (пунктир), антенная температура на волне 7.03 см (сплошная линия с черными кружками). Все данные нормализованы на 1.45×10^{13} А, 5.76×10^{13} G² m, 4.81×10^{23} erg cm⁻¹, и 2700K соответственно для тока, скрученности тока, энергии и антенной температуры.

Можно также предложить более простую и, возможно, более близкую к реальности картину уменьшения потока радиоизлучения перед мощной вспышкой. Для этого промоделируем магнитное поле перед вспышкой в дипольном приближении. Основная особенность динамики фотосферного магнитного поля перед вспышкой “День Бастилии” по данным наблюдений, например, в [4] заключалась в росте магнитного поля положительного знака в системе двух наиболее близких и наиболее мощных пятен. Это приводило к выравниванию напряженностей магнитных полей этих пятен, и соответственно к росту градиента магнитного поля в области между этими пятнами. В этой области и возникла вспышка. Будем учитывать это при моделировании.

Магнитное поле на фотосфере зададим системой диполей как это сделано в работе [5]. Оси X и Y расположены в плоскости фотосферы, а ось Z по нормали к ней (направлена вверх). Единицей длины является размер активной области $L_0 = 260\,000$ км. Единицей магнитного поля является среднее магнитное поле над фотосферой $B_0 = 300$ Гс, а единицей дипольного магнитного момента является $M_0 = B_0 L_0^3$. В таблице указаны дипольные моменты M_u и местоположение диполей.

Таблица

| Значения и позиции диполей | | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Номер | X | Y | Z | M_u |
| 1 | 0.14 | -0.135 | 0.5 | -0.007 |
| 2 | 0.14 | -0.135 | 0.6012 | 0.005 |
| 3 | 0.2964 | -0.135 | 0.5 | 0.01 |
| 4 | 0.365 | -0.135 | 0.4888 | -0.016 |
| 5 | 0.4629 | -0.135 | 0.5 | 0.0132 |
| 6 | 0.6485 | -0.135 | 0.5 | -0.013 |
| 7 | 0.815 | -0.135 | 0.5 | 0.0051 |

Картина магнитных полей на фотосфере, представленная в таблице, несколько отличается от соответствующей картины, полученной в [4], но для нашего моделирования важно, что и в том и другом случае есть два близких к друг другу магнитных холма с наибольшей напряженностью магнитного поля разного знака (в таблице это диполи № 4 и № 5).

На рис. 6 представлены расчеты интегрирования модуля магнитного поля в плоскости $Y = const$ на высотах $Y = h = 0.2 - 0.6 L_0$.

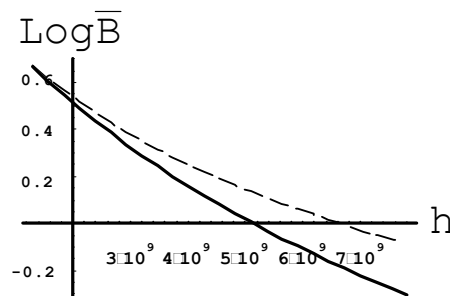


Рис. 6. Расчеты интегрирования модуля магнитного поля в плоскости $Y = const$ для различных высот. Пунктирная линия соответствует данным таблицы. Сплошная линия соответствует увеличенному дипольному моменту (0.016) для диполя № 5.

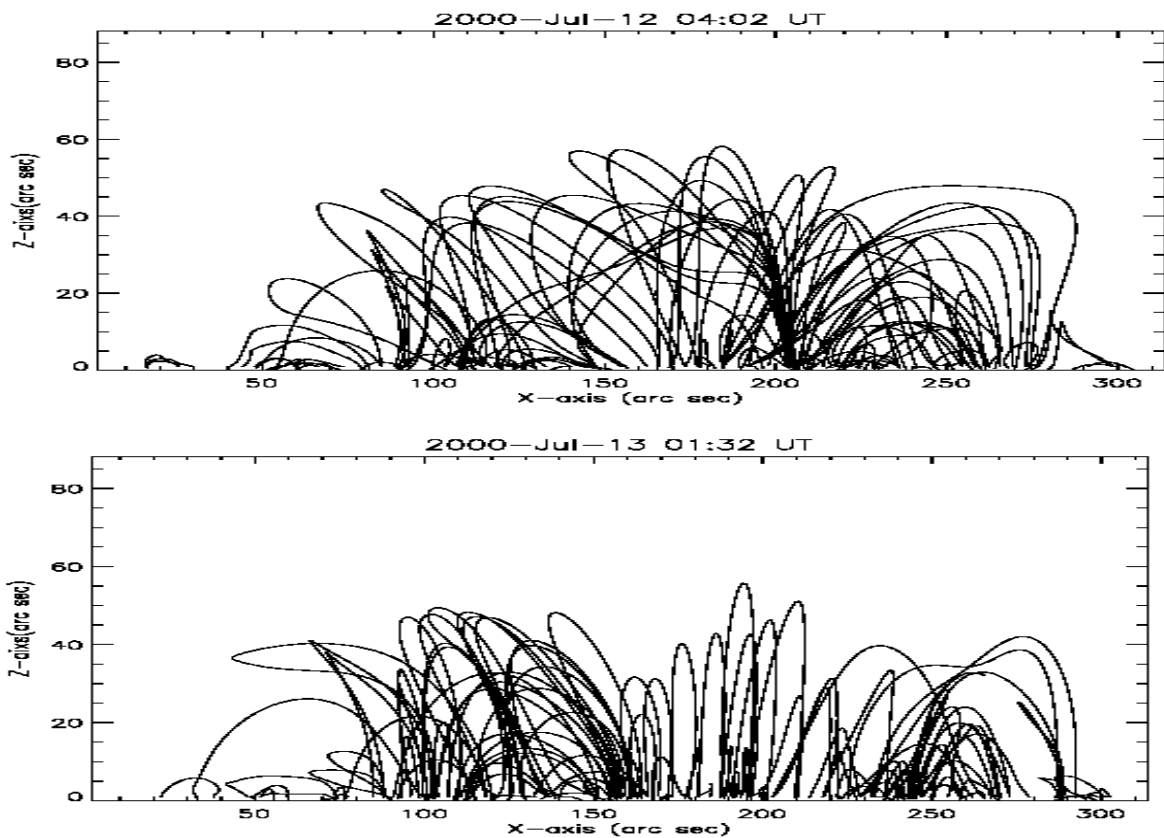


Рис. 7. Структура силовых линий в центральной части активной области NOAA9077 за 12 и 13 июля 2000 г.

Из рис. 6 видно, что, несмотря на то, что мы увеличили дипольный момент для диполя № 5 и сравняли его с дипольным моментом диполя № 4 напряженность магнитного поля на высотах генерации радиоизлучения уменьшилась. Это, естественно, и должно привести к уменьшению интенсивности радиоизлучения.

Об уменьшении напряженности магнитного поля говорит и структура восстановленного магнитного поля по фотосферным данным по методике, изложенной в [6]. На рис. 7 заметно уменьшение высоты силовых линий в центральной части активной области 13 июля по сравнению с 12 июля.

Выводы

Было показано, что наиболее вероятной моделью, описывающей двойную инверсию знака поляризации в узком частотном диапазоне, является модель с генерацией радиоволн в магнитных ямах, в которых направление магнитных силовых линий меняет свой знак по отношению к наблюдателю.

В работе [4] было показано, что существенные изменения в непотенциальном магнитном поле, произошедшие с 13 по 14 июля 2000 года, привели к пересоединению магнитных силовых линий, которое в свою очередь явилось непосредственной причиной мощной протонной вспышке, которая произошла 14 июля 2000 г.

Результаты наших исследований показывают, что существенные изменения в непотенциальном магнитном поле отражаются адекватным образом и на величине антенной температуры. Уменьшение плотности магнитной энергии в источнике приводит

к понижению по высоте в солнечной атмосфере гирорезонансных уровней, а следовательно, к понижению их электронной температуры и к конечному итоге уменьшению интенсивности радиоизлучения. Однако то, что радиоизлучение начало реагировать на предвспышечные процессы в активной области существенно раньше фотосферного магнитного поля указывает на то, что этот процесс более отчетливо проявляется в хромосферных и корональных магнитных полях. Не исключено, что и сам предвспышечный процесс начинается сначала в более высоких областях солнечной атмосферы, и только затем проявляется в фотосферных магнитных полях.

Из сказанного выше можно заключить, что сантиметровый диапазон длин волн является наиболее перспективным в плане изучения и диагностики предвспышечной плазмы, а наиболее подходящим для этих целей представляется многоволновый высокочувствительный инструмент, каким, например, является РАТАН-600. Использование такого инструмента совместно со спутниковыми обсерваториями, дающими информацию в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, а также оптические наблюдения фотосферы открывают широкие возможности по прогнозированию вспышечной активности солнца, и вызванных ею геомагнитных возмущений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-02-16228-а

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tokhchukova, S.Kh., Bogod, V.M. Solar Physics. 2003. V. 212. 99.

2. Богод В.М., Котельников В.С., Яснов Л.В. Конференция стран СНГ и Прибалтики // Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности. 2003. Т. 1. 71

3. Bogod V., Grebinskij A., Garaimov V., Urpo S., Fu Q., Zhang H. Bull. Spec. Astroph. Obs. 1999. 48. 17.

4. Deng Y., Wang J., Yan Y., Zhang J. Solar Phys. 2001. 204. 13.

5. Bilenko I. A., Podgorny A. I., Podgorny I. M.: Solar Physics. 2002. 207. 323.

6. Yan Y., Deng Y., Karlicky M., Fu Q., Wang S., Liu Y. *ApJ*. 2001. 551. L 115.

¹*Специальная Астрофизическая Обсерватория,
Санкт-Петербург*

²*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург*