

УДК 523.985

ОСОБЕННОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ, ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

© 2003 г. В. М. Богод*, С. Х. Тохчукова

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз

Поступила в редакцию 28.08.2002 г.

Результаты многоволновых наблюдений Солнца на РАТАН-600 указывают на существование резких спектральных неоднородностей в поляризованном излучении активных областей, производящих мощные вспышки. Эти явления происходят в широком интервале потоков радиоизлучения (0.05–10 с.е.п.), в относительно узком диапазоне длин волн (2–5 см) и регистрируются в интервале времени от нескольких часов до нескольких дней до мощной вспышки, а также во время вспышки. Проведен анализ обнаруженных явлений и их связи с предварительной фазой мощных вспышек. Получен значительный статистический материал за период 2001 г. Новые свойства вспышечной плазмы могут быть использованы для проверки существующих моделей солнечной вспышки и разработки новых критериев вспышечной активности.

Ключевые слова: Солнце, радиоизлучение Солнца, поляризация, солнечные вспышки.

MICROWAVE RADIATION FROM ACTIVE REGIONS GENERATING STRONG SOLAR FLARES, by V. M. Bogod and S. Kh. Tokhchukova. RATAN-600 microwave observations of the Sun reveal sharp spectral nonuniformities in the polarized radiation from active regions that produce strong flares. These events occur in a wide range of radio fluxes (0.05–10 s.f.u.) in a relatively narrow wavelength range (2–5 cm). They are detected from several hours to several days before a strong flare and during the flare. We analyze the detected events and their relationship to the preliminary phase of strong flares. Significant statistical material was obtained in 2001. The new flare-plasma properties can be used to test existing solar-flare models and to develop new criteria of flare activity.

Key words: Sun, solar radio emission, polarization, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

Задача изучения предвспышечной плазмы важна как для понимания процессов, приводящих к вспышке, так и для выработки критериев предсказания вспышечной активности и протонной активности в особенности. Такие исследования ведутся в широком спектре частот, включая спутниковые наблюдения в ультрафиолете, рентгене, оптическом диапазоне и на радиоволнах. Поскольку вспышка чаще всего зарождается в верхней хромосфере и в нижней короне, а затем распространяется на более высокие уровни (в корону, регистрируемую в рентгене) и на нижележащие уровни (фотосферу, регистрируемую в оптическом диапазоне), то следует полагать, что основные свойства предвспышечной плазмы должны были бы четко проявляться именно в радиодиапазоне.

Разнообразные и длительные исследования с помощью различных радионструментов позволи-

ли обнаружить ряд свойств предвспышечной плазмы. Широко известен критерий Танака, Эноме (1975), используемый для сопоставления поляризационных измерений на двух волнах 3 см и 8 см. Этот критерий имел хорошую достоверность (~70%) в 20-м цикле активности и резко снизился в следующем.

Известны вспышечные предвестники — небольшие повышения полного потока Солнца за 20–40 мин до вспышки (Пустильник, 1973), нарастания флуктуации полного потока радиоизлучения за 20–40 минут до вспышки (Кобрин и др., 1978), уменьшений потока радиоизлучения перед вспышками (Ковингтон, 1973). Недавно Кунду и др. (2001) отметили флуктуации радиоизлучения за несколько минут до вспышки, которые коррелировали с флуктуациями в рентгене.

По наблюдениям с высоким пространственным разрешением были обнаружены длительное микроволновое потемнение активной области перед

*Электронный адрес: vbog@gao.spb

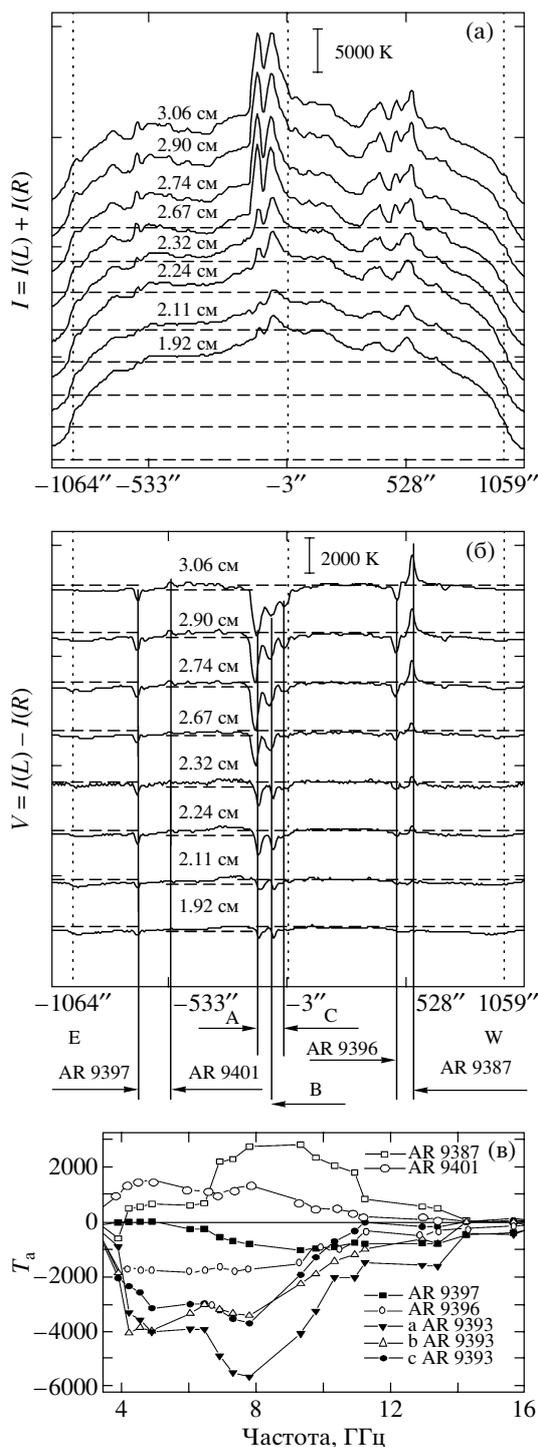


Рис. 1. Сканы диска Солнца для 27 марта 2001 г., полученные с одномерной диаграммой РАТАН-600, на нескольких близких волнах сантиметрового диапазона: (а) — сканы интенсивности, сдвинутые по вертикали относительно друг друга для удобства сопоставления; (б) — сканы круговой поляризации, также сдвинутые по вертикали (на этом рисунке и далее на других левая поляризация имеет положительный знак, а правая — отрицательный); (в) — спектры максимальных амплитуд поляризованных радиоисточников для активных областей, представленных на верхних рис. 1а, б.

вспышкой (Богод и др., 1999а), появление пекулярных источников (Ланг и др., 1993) и источников над нейтральной линией магнитного поля (Кунду и др., 1985), существование активных долгот (Максимов и др., 1988).

Чувствительность радиоволн к изменениям хромосферных магнитных полей довольно высока (Богод и др., 1993; Ниндос и др., 2000), в связи с чем разработаны разнообразные методы их измерений (Гельфрейх, 1994; Рябов и др., 1999) на основе детального спектрального и поляризационного анализа в широком диапазоне длин волн. Несмотря на наличие в мире разнообразных радиотелескопов с высоким пространственным разрешением (от радиогелиографов-интерферометров до рефлекторных антенн), подробный анализ спектра реализуется лишь на двух телескопах: РАТАН-600 (Корольков, Парийский, 1979) и OVRO (Харфорд и др., 1984), которые полностью перекрывают диапазон частот 1–18 ГГц. Последний анализирует этот диапазон частот последовательно, переходя от одной частоты к другой, и имеет узкие полосы анализа, что значительно понижает чувствительность измерения поляризации. РАТАН-600 имеет более широкие полосы в частотных каналах, осуществляет параллельный анализ с частотным разрешением около 5% и имеет большую эффективную площадь. Однако этот инструмент имеет одномерную диаграмму направленности, что снижает эффективность его использования при исследовании слабых источников ввиду влияния излучения посторонних источников (эффект путаницы). Но при изучении ярких активных областей этот эффект незначителен. Начиная с 2000 г., мы используем на РАТАН-600 режим многократных азимутальных наблюдений (со скважностью 4–8 мин/скан). Это значительно улучшило достоверность спектральных измерений поляризованного излучения активной области и позволило обнаружить ряд явлений, непосредственно связанных со вспышечной активностью в широком временном интервале.

Наблюдения показывают, что на Солнце существуют различные по стабильности активные области. Стабильные активные области фактически не производят вспышек за все время нахождения их на диске. Такие области имеют стабильную структуру магнитных полей на уровне фотосферы, и спектры потока интенсивности и потока поляризации радиоизлучения в микроволновом диапазоне монотонного характера, с максимумом в диапазоне около 5–6 см (Богод и др., 1999б; Гарри и др., 1997) (см. также рис. 1). Поведение этих спектров определяется совместным действием тепловых механизмов (тормозного и циклотронного излучения на первых 3–4 гармониках гирочастоты (Железняков, 1977; Ахмедов и др., 1982)). Циклотронное излучение, приходящее от активной области, имеет

круговую поляризацию, соответствующую избытку излучения необыкновенной волны, а знак поляризации определяется полярностью магнитного поля доминирующего пятна.

Особый интерес представляют вспышечно-продуктивные активные области (ВПАО), отличающиеся переменностью излучения и большой вспышечной активностью. Исследование ВПАО, проведенное в данной работе, указывает на высокую информативность микроволновых спектрально-поляризационных наблюдений, которые, по-видимому, непосредственно детектируют плазму в местах первичного выделения энергии перед вспышкой. Обнаружено несколько новых проявлений в спектре поляризованного радиоизлучения ВПАО на временных интервалах от нескольких часов до нескольких дней как до вспышки, так и во время вспышки. Мы также показываем, что эти новые эффекты связаны с генерацией мощных вспышек, и они могут быть использованы для проверки существующих моделей солнечной вспышки (см. работу Сыроватского и др. (1983), а также обзоры Алтынцева и др. (1982), Шибата (1998)) и для разработки более эффективных критериев прогноза по сравнению с существующими.

НАБЛЮДЕНИЯ

Для исследования мы использовали регулярные спектрально-поляризационные наблюдения Солнца в период 2001 г., проводившиеся на радиотелескопе РАТАН-600. Этот телескоп имеет параметры, которые сегодня наиболее адекватны для изучения вспышечной плазмы на ранних стадиях активности ВПАО. Наиболее важным качеством такого инструмента явилось сочетание мгновенного спектра частот от 16 ГГц до 1 ГГц с помощью панорамного анализатора спектра (ПАС) (Богод и др., 1999б) (в данной работе использовался диапазон 4–16 ГГц) с частотным разрешением около 5–7%, высокой чувствительностью к изменению степени круговой поляризации (около 0.05%) и высокой чувствительностью по потоку излучения, достигающей 0.001 с.е.п. (1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/(м² Гц)). Такая высокая чувствительность была реализована благодаря широкой полосе принимаемых частот (200–600 МГц), параллельному анализу спектра и большой собирающей поверхности (~400–600 м²). Радиотелескоп РАТАН-600 имеет умеренное пространственное разрешение в горизонтальной плоскости (< 15'' на волне 2 см) и низкое разрешение в вертикальной плоскости (~15' на волне 2 см). Размеры диаграммы меняются пропорционально длине волны. Наблюдения выполнялись регулярно как в режиме одиночного сканирования (3–5 наблюдений в день), так и в режиме многократного азимутального сканирования (23–25 сканов в день

с интервалом 8 минут в течение 4 ч). Такие часто повторяющиеся сканы с довольно узкой диаграммой в течение 4 часов позволяют четко выделять излучение от отдельных компонентов структуры активной области (локальных источников над пятнами, межпятенных источников, флоккул и др.).

Для анализа мы использовали наблюдательный материал, полученный в регулярных наблюдениях на РАТАН-600 в период с 4 января по 28 октября 2001 г. за исключением небольших технических перерывов с 16 по 24 апреля и с 15 по 25 августа. Тем не менее, практически все ВПАО, присутствовавшие на диске в течение 10 месяцев, были зарегистрированы в спектральных наблюдениях их излучения в интенсивности (параметр Стокса $I = I(L) + I(R)$) и поляризации ($V = I(L) - I(R)$). Кроме того, в марте, апреле и сентябре проводились многоазимутальные наблюдения, которые позволили изучить динамические свойства ВПАО на микроволнах.

На рис. 1а представлены одномерные сканы Солнца, полученные на РАТАН-600. Для удобства сопоставления сканы на разных волнах сдвинуты по вертикали друг относительно друга. Обработка наблюдений проводилась в программе Workscan (Гараимов, 1997), которая предоставлена для свободного пользования по адресу <http://www.sao.ru/~sun>. Для калибровки и привязки сканов на разных волнах используются наблюдения службы потоков Тойокава на частотах 1.0, 2.0, 3.75, 9.4 ГГц, публикуемые в Интернете по адресу <ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/data/daily/>. Поток на промежуточных частотах ПАС определяется с помощью кубической интерполяции и используется для калибровки параметра Стокса $I = I(L) + I(R)$. Параметр Стокса $V = I(L) - I(R)$ калибруется пропорционально исходному сигналу.

Эффект коротковолновой инверсии поляризации в ВПАО

На рис. 1а, б представлено одно из многоволновых наблюдений, выполненное 27 марта в 8^h50^m UT. В этот день все зарегистрированные на диске активные области были стабильны и их спектры излучения в интенсивности (рис. 1а) и круговой поляризации (рис. 1б) имели монотонный рост с длиной волны, что типично для излучения стабильных циклотронных радиоисточников. Спектры поляризованного излучения некоторых активных областей, присутствовавших в этот день на диске, представлены на рис. 1в. Все они показывают рост с длиной волны на частотах от 15 ГГц и имеют широкий максимум в диапазоне 6–8 ГГц.

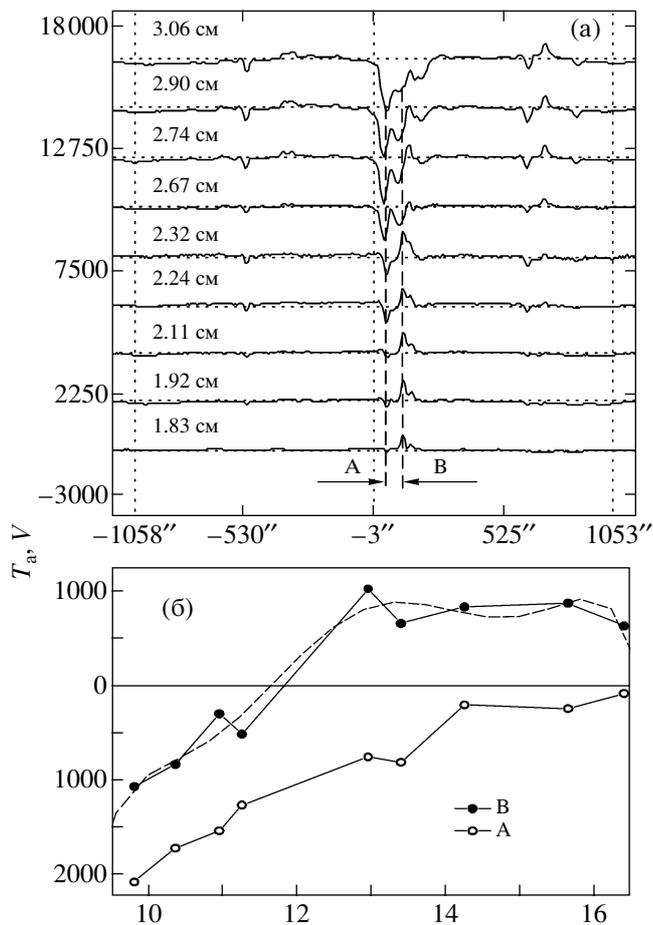


Рис. 2. (а) — Сканы круговой поляризации Солнца на коротких волнах сантиметрового диапазона для 28 марта 2001 г., $8^{\text{h}}46^{\text{m}}$ UT. В западной части активной области AR 9393 наблюдается рост источника В левой поляризации на волнах от 1.83 см до 2.32 см, что привело к эффекту коротковолновой инверсии поляризации. (б) — Спектры восточного (А) и западного (В) источников в AR 9393. Источник В показывает инверсию знака на частоте близкой к 12 ГГц. Пунктиром приведена кривая, усредненная степенным полиномом. Источник А имеет монотонный рост правой поляризации с длиной волны.

Вблизи центра диска находилась активная область NOAA 9393 (см. рис. 1а, б). Она имела сложную структуру, состоящую из трех источников правой поляризации А, В и С и была вспышечно активной, хотя в течение 27 марта 2001 г. излучение этой области было стабильным. В дальнейшем эта активная область резко активизировалась, что привело к появлению спектральных неоднородностей в поляризованном излучении.

На следующий день в активной области AR 9393 начались предвспышечные процессы, что было отмечено появлением инверсии круговой поляризации на коротких волнах (1.83–2.32 см) в

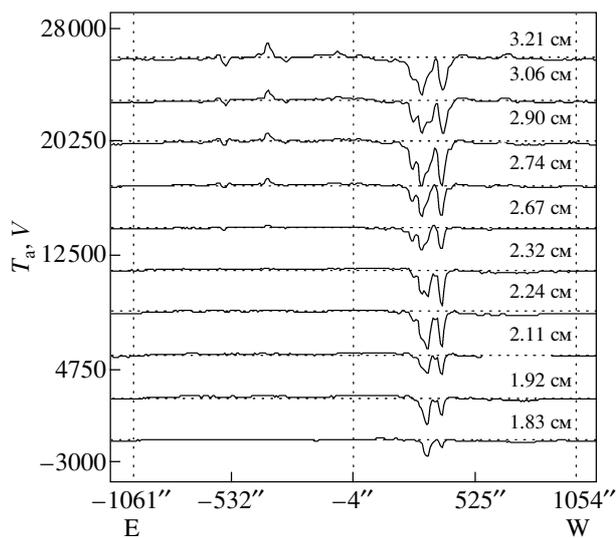


Рис. 3. Сканы поляризации в антенных температурах для 30 марта 2001 г., $10^{\text{h}}14^{\text{m}}$ UT. Активная область AR 9393 находится в западной части диска и вновь имеет стабильную структуру спектра.

ее западной части (см. рис. 2а). На этом рисунке представлен в крупном масштабе многоволновый одномерный скан Солнца в поляризованном излучении, полученный 27 марта 2001 г. в $8^{\text{h}}46^{\text{m}}$ UT.

Активная область AR 9393 располагалась в этот день вблизи центра диска и в ее структуре произошли существенные изменения. На рис. 2а отмечены два основных источника — В в западной части и А в восточной части активной области. В излучении источника В была отмечена смена знака поляризации на волнах от 1.83 см до 2.32 см, тогда как структура и знак поляризации источника А сохранились (см. также рис. 1б, 2б). Эта коротковолновая инверсия круговой поляризации (которую мы назвали А1-эффект) существовала вплоть до начала импульсной фазы мощной вспышки X1.7 в $10^{\text{h}}15^{\text{m}}$ 29 марта 2001 г.

Мы полагаем, что инверсия круговой поляризации указывает на подъем нового магнитного потока с полярностью, противоположной полярности вышележащего поля с величиной около 1400–2000 Гс в предположении циклотронного излучения на третьей гармонике гирочастоты, в соответствии с формулой $B[G_S] = 3570/\lambda[\text{см}]$. При этом знак поляризации определен излучением необыкновенной волны и полярностью магнитного поля. Коротковолновая инверсия поляризации обычно сначала появляется на самой короткой волне 1.74 см, затем со временем постепенно сдвигается в сторону более длинных волн 3–4 см. Необходимо отличать этот тип поляризационной инверсии от хорошо известного явления прохождения циклотронного излучения пятенного радиоисточника через область

квазиперечных магнитных полей (Коуэн, 1960; Железняков, 1964, Рябов и др., 1999). Как известно из наблюдений, инверсия в квазиперечных магнитных полях обычно начинается на длинных волнах (в диапазоне 8–9 см) в стабильных активных областях, расположенных вблизи лимба, и со временем перемещается в сторону коротких волн. На следующий день в наблюдениях 30 марта 2001 г. AR 9393 восстановилась стабильная структура (см. рис. 3), аналогичная структуре, которая наблюдалась 27 марта 2001 г. (см. рис. 1).

Эффект коротковолнового уярчения поляризации в ВПАО

Другой часто встречающийся эффект состоит в появлении уярчения на коротких сантиметровых волнах. На рис. 4а этот эффект продемонстрирован на примере активной области AR 9415: на коротких волнах наблюдается увеличение потока излучения круговой поляризации для западного источника этой группы. Мы назвали такой случай А2-эффектом. Мы полагаем, что этот эффект связан с восходом нового магнитного потока с полярностью, совпадающей по знаку с вышележащим магнитным полем. Спектр излучения демонстрирует рост в сторону коротких волн (см. источник В на рис. 4б).

Длительность существования А1- и А2-эффектов меняется в интервале от нескольких часов до нескольких дней. Максимальная полоса частот, в которой происходят оба эффекта, довольно широка и достигает одной октавы (от 1.7 до 3.5 см). Типичные величины потоков поляризованного излучения находятся в пределах 0.05–0.5 с.е.п. А-эффекты часто наблюдаются в ВПАО (в 60% случаев).

Частотно-ограниченная область взаимодействия мод в спектре поляризации радиоизлучения

Следующее проявление ВПАО, названное В-эффектом, регистрируется обычно в хорошо развитых активных областях, с длительной вспышечной активностью. Часто он образуется как результат развития во времени А1-эффекта. При этом инверсия поляризации перемещается в диапазон более длинных волн, а на коротких волнах вновь появляется поляризованное излучение с первоначальным знаком поляризации. Область В-эффекта характеризуется уменьшением потока поляризованного излучения в узкой частотной полосе (20–30%) в диапазоне 2–5 см. Степень поляризации соответственно падает с 10–15% вне полосы до долей процента внутри нее. Кроме того, в этой области появляются узкие точечные источники с резкими наклонами спектра и многократными инверсиями поляризации по частоте. На рис. 5 на примере активной области AR 9393 представлено

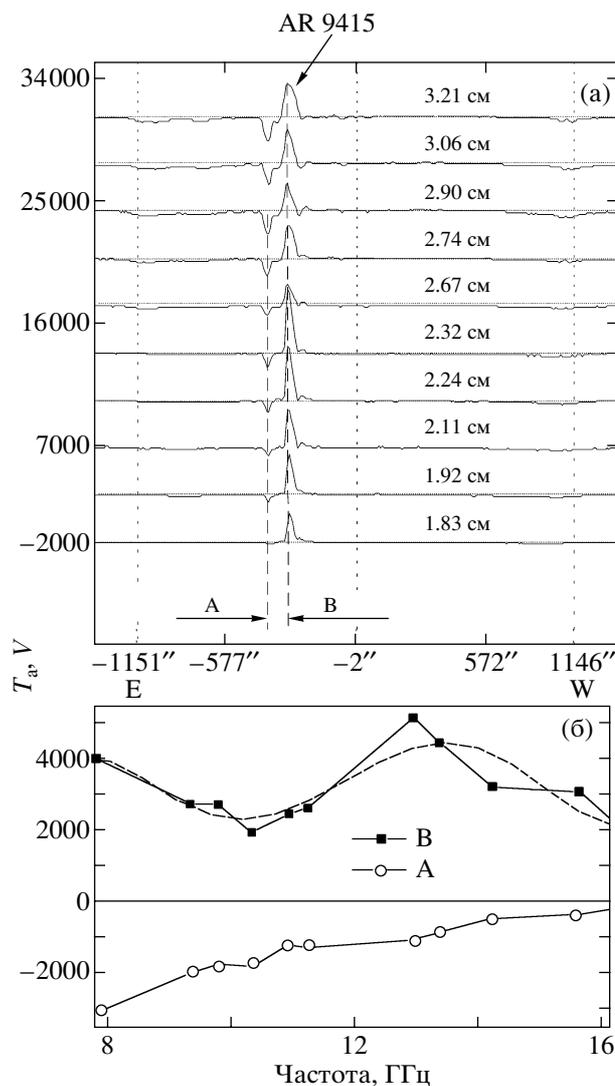


Рис. 4. (а) — Сканы поляризованного излучения Солнца в антенных температурах для 8 апреля 2001 г., 9^h15^m UT. Активная область AR 9415 расположена в восточной части диска Солнца, имеет биполярную поляризационную структуру в виде источников А и В. Заметно, что источник В имеет рост излучения на коротких волнах, тогда как источник А такой зависимости не показывает. (б) — Спектры западного В и восточного А источников в AR 9415. Источник А имеет монотонный рост правой поляризации, источник В левой поляризации показывает рост спектра на коротких волнах. Пунктиром показана кривая усреднения степенным полиномом.

образование В-эффекта на волнах 2.67–3.21 см. Внутри ограниченной полосы на соседних волнах видно появление новых (точечных) источников с неоднократными сменами знака поляризации. Эта полоса часто смещается в сторону длинных волн непосредственно перед самой вспышкой. В данном случае мощная вспышка уровня X20 произошла 2 апреля в 3^h25^m UT.

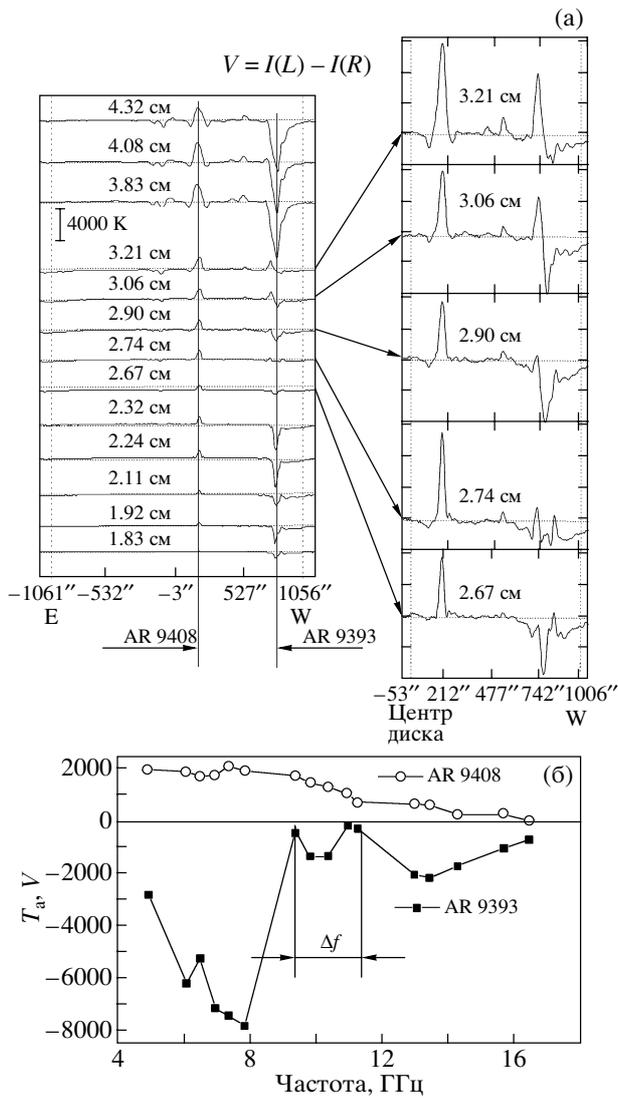


Рис. 5. (а) — Сканы поляризованного излучения Солнца для 1 апреля 2001 г. $9^{\text{h}}17^{\text{m}}$ UT. Активная область AR 9393 расположена в западной части диска Солнца, имеет простую поляризационную структуру на коротких (2.32 см и короче) и на длинных волнах (3.83 см и длиннее). Справа в крупном масштабе представлены регистрации в диапазоне волн от 2.67 см до 3.21 см. Этот диапазон демонстрирует сложную структуру взаимодействия мод с появлением узких точечных источников, с резкими наклонами спектра, инверсиями поляризации и низкой степенью поляризации. (б) — Спектры круговой поляризации для стабильной активной области AR 9408 и ВПАО AR 9393. Здесь Δf — ширина полосы частот, в которой происходят резкие изменения на слабом уровне поляризованного сигнала.

Мы полагаем, что область В-эффекта отражает процессы, происходящие в области взаимодействия обыкновенной и необыкновенной мод, поскольку здесь часто наблюдаются инверсии поляризации как по частоте, так и по времени (см. также рис. 6).

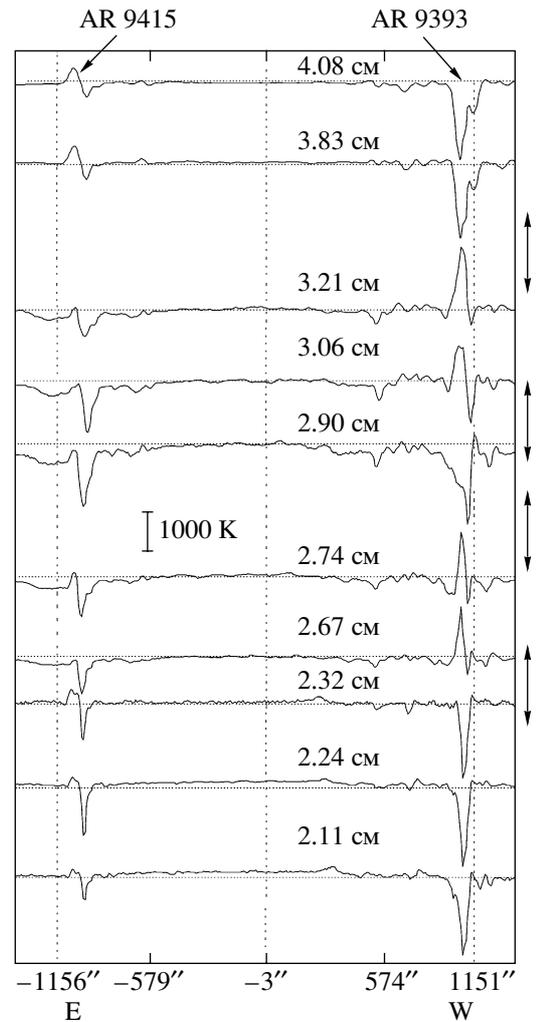


Рис. 6. Многоволновые сканы в каналах поляризации в $9^{\text{h}}08^{\text{m}}$ UT. Справа стрелками указаны места частотных инверсий поляризации, происходивших в активной области AR 9393 перед вспышкой M8.4.

Многочисленные спектральные и временные инверсии круговой поляризации в ВПАО

Исследование ряда ВПАО показало, что эффект смены знака поляризации часто присутствует в их микроволновом излучении и, по-видимому, является характерным свойством АО и подлежит дальнейшему изучению. Смена знака часто появляется в спектре поляризации перед мощной фазой вспышки, а также может происходить во время самой вспышки. На рис. 6 представлены наблюдения AR 9393, проведенные 5 апреля 2001 г. в $9^{\text{h}}08^{\text{m}}$ UT непосредственно перед включением основной фазы лимбовой вспышки M8.4 в $9^{\text{h}}22^{\text{m}}$ UT. Видны четыре инверсии знака поляризации по частоте, отмеченные стрелками справа.

Благодаря многоазимутальным наблюдениям мы зарегистрировали также быстрые временные

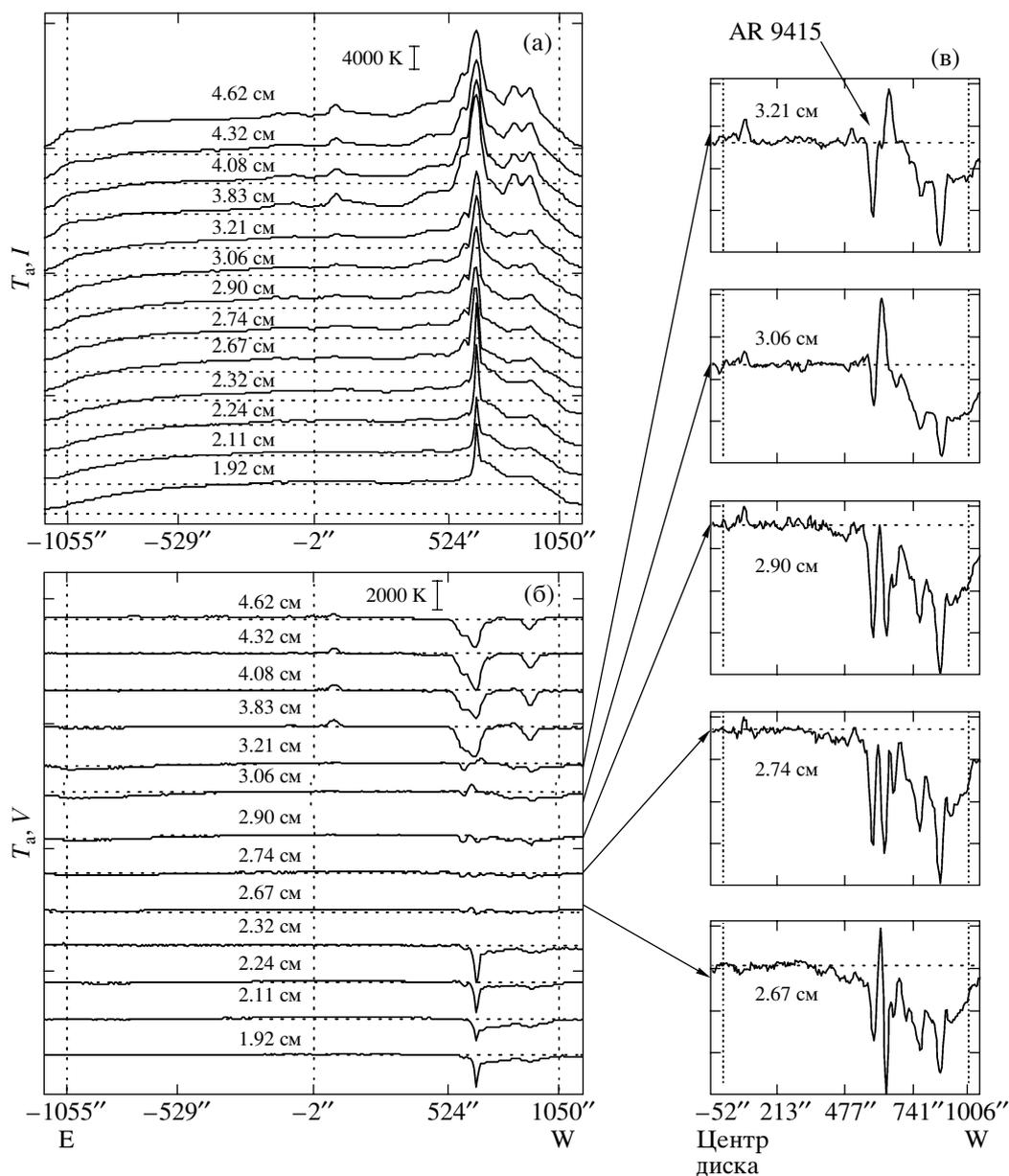


Рис. 7. Наблюдений 14 апреля 2001 г. ВПАО AR 9415 находится в западной части диска. (а) — Сканы Солнца в интенсивности; (б) — то же в круговой поляризации; (в) сканы западной части диска в крупном масштабе в диапазоне 2.67–3.21 см. Поляризационная структура AR 9415 в этом диапазоне резко отличается от коротких и длинных волн, образуя так называемую “частотную область взаимодействия мод”.

изменения поляризационной структуры в диапазоне от 2 см до 8 см с интервалом времени между сканами 8 минут на протяжении 4 ч. На рис. 7 представлены наблюдения ВПАО AR 9415 для 14 апреля 2001 г. в $9^{\text{h}}54^{\text{m}}$ UT в каналах интенсивности и поляризации на 13 длинах волн. Видно, что в диапазоне 2.67–3.21 см степень поляризации резко уменьшена, в связи с чем этот диапазон приведен на рис. 7в в крупном масштабе. Интересно отметить появление в этом диапазоне

точечных поляризованных радиоисточников с резкими изменениями по спектру, вплоть до смен знака.

Для анализа временных изменений характеристик ВПАО AR 9415 были отобраны две волны, представленные на рис. 8. Одна из них, $\lambda_1 = 2.90$ см, взята из области взаимодействия мод, другая $\lambda_2 = 3.83$ см из длинноволнового диапазона вне ее. На рисунке приведены 22 скана для обеих волн с интервалом времени 8 мин. Для сопо-

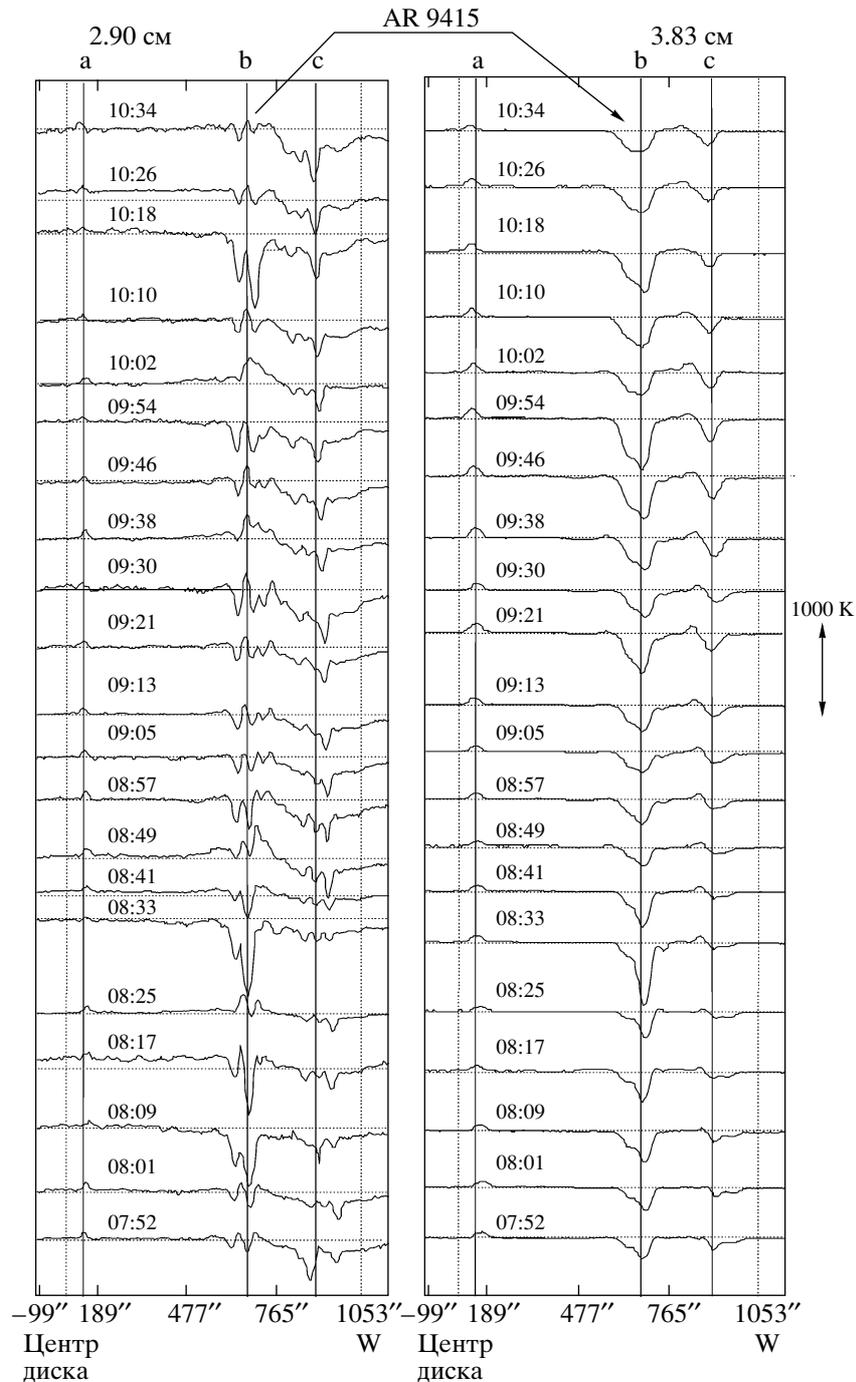


Рис. 8. Пример динамического поведения поляризации ВПАО AR 9415 на двух длинах волн, расположенных внутри и вне области взаимодействия мод. Наблюдения проводились с $7^{\text{h}}52^{\text{m}}$ по $10^{\text{h}}34^{\text{m}}$ UT с 8-мин интервалом между сканами.

ставления с другими активными областями проведены вертикальные линии. Видно, что структура AR 9415 на волне $\lambda_1 = 2.90$ см состоит из различных узких поляризованных радиоисточников с частыми сменами знака поляризации во времени. С другой стороны, на волне $\lambda_2 = 3.83$ см происходят

лишь плавные изменения амплитуды поляризованного сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено статистическое исследование связи ВПАО с обнаруженными особенностями в мик-

Таблица 1. Перечень ВПАО в период с января по октябрь 2001 г.

Номер активной области по классификации NOAA	Число вспышек в рентгене с баллом М и X	Общее число вспышек в рентгене	Число вспышек в оптике уровня S	Число вспышек в оптике с уровнем >S
9313	4M	10	15	4
9368	3M	10	11	4
9373	4M	19	36	1
9393	24M, 3X	55	12	3
9401	5M	12	29	5
9415	6M, 5X	26	34	9
9433	15M	60	83	4
9455	5M	25	28	5
9488	2M	13	18	5
9502	3M	6	7	3
9511	4M, 1X	18	24	5
9557	3M	26	36	2
9591	9M, 1X	59	80	8
9600	3M	11	8	4
9601	10M	33	56	9
9608	12M	38	37	10
9616	5M	14	23	6
9628	7M	31	81	5
9632	2M, 1X	12	34	1
9636	2M	11	36	2
9658	4M	16	30	3
9661	1M, 2X	19	37	5
9672	4M, 2X	22	28	5
9682	9M	40	61	1

Таблица 2. Результаты статистического анализа периода с января по октябрь 2001 г.

Число всех активных областей на Солнце в период с 4.01.2001 по 28.10.2001	406	100%
Число ВПАО, производших три и более вспышек с рентгеновским баллом М и X	24	5.9%
Число всех мощных вспышек рентгеновского балла М и X	192	100%
Число мощных вспышек от ВПАО	160	83.3%
Число мощных вспышек от ВПАО с эффектами в спектрах поляризации на микроволнах	156	81.2%

роволновом излучении и с продуктивностью мощных вспышек. Для анализа был выбран период с января по октябрь 2001 г. В этом году на РАТАН-600 ежедневно проводилось три наблюдения в день в разных азимутах. Вспышечная ак-

тивность в анализируемый период времени представлена в табл. 1. Здесь перечислены все ВПАО, производшие наиболее мощные вспышки. Третий и четвертый столбцы характеризуют активность в

рентгене, а пятый и шестой — в оптическом диапазоне.

Перечисленные в табл. 1 мощные ВПАО имели вышеописанные особенности в спектре поляризованного излучения. Экспериментально установлено, что к этой группе можно отнести все активные области, которые произвели не менее трех мощных вспышек балла М и выше. Исключение составили лишь две области AR 9488 и AR 9636, произведшие только по две мощные вспышки. Другое исключение представлено активной областью AR 9658, которая произвела 16 вспышек в рентгене, четыре из них балла М, но мы не нашли особенностей в спектре ее круговой поляризации.

Результаты статистического анализа приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что практически вся активность периода с 4.01.2001 по 28.10.2001 была обусловлена активностью ВПАО, составляющих лишь 5.9% от всего количества активных областей на Солнце. ВПАО произвели 83.3% мощных вспышек, обычно генерирующих протоны высоких скоростей. Из 24 ВПАО только одна область не обладала особенностями в спектре поляризации. Такой высокий коэффициент корреляции, возможно, указывает на высокую прогностическую ценность обнаруженных эффектов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящая работа подчеркивает важность радионаблюдений для изучения природы мощной вспышечной активности ввиду их высокой чувствительности к измерению поляризации излучения, что является основным предметом обсуждения.

Следует различать активные области по их стабильности излучения: стабильные, квазистабильные и ВПАО. По-видимому, все три типа активных областей различаются между собой распределением параметров плазмы по высоте.

Стабильные активные области не производят вспышек совсем и их количество составляет большую часть от всех областей. Такие активные области имеют стабильную магнитосферу, и структура магнитного поля может быть рассчитана в потенциальном приближении от фотосферного уровня в корону. В этих активных областях нет существенных процессов выделения энергии и доминирующим является условие $E \leq H^2/8\pi$, где $E = n_e k T_e$ — кинетическая энергия электронов, H — магнитное поле.

Квазистабильные активные области производят несколько вспышек малой и средней мощности (с рентгеновским баллом А, В или С) и иногда 1–2 вспышки балла М. В целом они сохраняют стабильную магнитосферу, но в них уже могут создаваться условия с коротким по длительности выделением энергии в виде вспышек среднего уровня.

ВПАО обычно генерируют не менее трех мощных вспышек балла М и выше и множество вспышек баллов А, В или С. Активные области типа ВПАО являются принципиально нестабильными. Процессы высвобождения и накопления энергии в этих областях идут непрерывно, и здесь действует условие $E \geq H^2/8\pi$. Магнитосферы таких областей нестабильны, не имеют упорядоченной структуры и не могут быть рассчитаны как экстраполяция потенциального магнитного поля от фотосферы в корону. Такое представление объясняет короткую предвспышечную фазу 20–30 мин в квазистабильных активных областях (Кунду и др., 2001) и длительную подготовительную фазу на протяжении нескольких часов и дней в ВПАО. Резкие смены знака поляризации (см. рис. 7 и 8) в течение длительного времени говорят о непрерывно длящемся вспышечном процессе с выделением энергии на малом уровне. Этот процесс накапливает энергию в магнитосфере активной области, и в дальнейшем начинается процесс триггерного включения механизма высвобождения энергии.

Приведенные в работе наблюдательные данные свидетельствуют о новом понимании явления мощных солнечных вспышек как процессов с длительной подготовительной фазой. В этой фазе происходит энерговыделение на слабом уровне и ее аккумуляция в магнитосфере активной области. Этот процесс продолжается до достижения уровня нестабильности. Дальнейший сценарий главной фазы вспышки хорошо разработан (Петчек, 1964, Хьювертс и др., 1977; Шибата, 1998; Зайцев, Степанов, 1983). В соответствии с данными РАТАН-600 в диапазоне 2–5 см, подготовительная фаза может иметь несколько разновидностей в спектрах поляризованного излучения ВПАО.

Две из них мы трактуем как появление нового магнитного потока среди структуры старого вышележащего магнитного поля активной области. Новый магнитный поток может иметь полярность, совпадающую с доминирующей полярностью магнитного поля, и в этом случае спектры поляризации демонстрируют уярчение в сторону коротких волн (рис. 4б). В случае восхода нового магнитного потока с полярностью, противоположной старому магнитному полю, наблюдается эффект коротковолновой инверсии поляризации (рис. 2б). Оба этих эффекта происходят в ВПАО часто за несколько часов и дней и тем самым отличаются от так называемой предвспышечной фазы, которая обычно имеет длительность несколько минут, редко десятки минут (Кунду и др., 2001). По-видимому, магнитные петли нового магнитного потока взаимодействуют с петлями старого магнитного поля посредством процесса перезамыкания по сценарию Ханаока (1996). Однако, здесь этот процесс

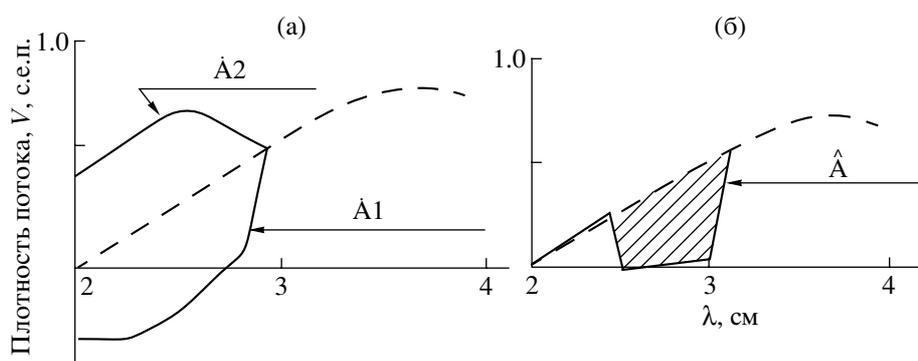


Рис. 9. (а) — Сопоставление спектра стабильной АО с доминирующим циклотронным радиосточником со спектрами для ВПАО с А1- и А2-эффектами. (б) — То же, но в сравнении с В-эффектом.

выполняет роль предварительного нагрева, в результате энергия которого аккумулируется в магнитосфере активной области до такого уровня, при котором магнитная структура становится нестабильной, в результате чего возникают триггерные процессы мощного выделения энергии и выброса корональных масс (см. обзор Шибата, 1998).

Другое проявление длительной предварительной фазы, обнаруженное в радионаблюдениях, — это образование частотно-ограниченной области взаимодействия о- и х-мод. Основанием для такого названия являются резкие изменения в поляризации структуры в частотной полосе 20–25%, в которой степень поляризации падает до долей процента и в которой наблюдается образование точечных поляризованных радиосточников с инверсиями знака (см. рис. 5а, б; 7, 9а). По-видимому, здесь мы также имеем дело с выделением энергии на слабом уровне, происходящим в более высоких слоях нижней короны. Многократные инверсии знака поляризации, как по частоте, так и по времени указывают на то, что предварительная фаза может протекать в виде длительных низкоэнергичных минивспышек. Результатом действия таких длительных минивспышек также является накопление энергии в магнитосфере, достижение порога нестабильности и включение процесса основной фазы мощной вспышки.

На основе данных, полученных в течение 2001 г., мы построили обобщенные спектры для А- и В-эффектов (см. рис. 9).

Каковы механизмы обнаруженных спектрально-поляризационных свойств микроволнового радиоизлучения (В-эффект) на предварительной фазе мощных вспышек? Обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной статьи. Здесь мы лишь перечислим основные свойства этого эффекта:

1. Частотные инверсии происходят в диапазоне длин волн 2–5 см. Это указывает на связь с магнитотормозным механизмом на первых 3–4 гармониках гирочастоты.

2. Резкое уменьшение поляризованного потока в области взаимодействия мод до значений 0.05–10 с.е.п и падение степени круговой поляризации до 0.3–1%. По-видимому, нужно привлекать объяснения о наличии токовых слоев в магнитосфере ВПАО.

3. Смены знака поляризации на предварительной фазе вспышки происходят с интервалом 8 мин и, может быть, короче.

4. Многократные инверсии знака поляризации по частоте. Это указывает на сильную вертикальную неоднородность магнитного поля на предварительной фазе и во время вспышки.

Из возможных интерпретаций наиболее вероятными являются процессы магнитного перезамыкания. С другой стороны, нельзя исключить, что частотная область появляется как результат турбулентности многоарочной магнитной структуры или множества токовых слоев на пути прохождения радиоволн к Земле (Железняков и др., 1996). Следует также упомянуть модель (Злотник, 2001), которая объясняет инверсию поляризации как результат появления о-моды в холодной плазме протуберанца, расположенного над горячим радиосточником. Однако эта модель не учитывает турбулентность холодной и горячей плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе спектрально-поляризационных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 получен новый наблюдательный результат, касающийся свойств магнитосфер ВПАО.

2. Получены данные о существовании длительной подготовительной фазы при генерации мощных вспышек, которая проявляется в детальных спектрах поляризации в широком диапазоне микроволн.

3. Введено понятие ВПАО с длительным процессом выделения энергии на подготовительной

фазе, накоплением энергии и ее взрывным энерговыделением во время основной фазы.

4. Приведен статистический материал, показывающий особую роль ВПАО в общей активности Солнца.

5. Показана необходимость использования крупных инструментов в исследовании ВПАО как на стадии изучения физических процессов, так и на стадии разработки критериев прогноза мощных вспышек.

Спектрально-поляризационные радионаблюдения вследствие их высокой чувствительности к процессам, идущим на уровнях нижней короны, где собственно и происходит первичное энерговыделение, могут быть основой для разработки методик прогнозирования мощных вспышечных событий, часто идущих с выделением большого количества высокоэнергичных протонов.

Таким образом, спектральные радионаблюдения важны как для понимания физических процессов в ВПАО, так и для прикладных вопросов, например связанных с программой “Космическая погода”.

Авторы выражают признательность коллективу РАТАН-600 за помощь в проведении наблюдений, В.И. Макарову за плодотворное обсуждение работы. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 02-02-16430) и ИНТАС-00-181.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М., *Солнечные вспышки* (М.: Наука, 1982).
- Ахмедов и др. (Sh.B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin), *Solar Phys.* **79**, 41 (1982).
- Богод и др. (V. M. Bogod, A. Grebinskij, V. Garaimov, *et al.*), *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **47**, 5 (1999a).
- Богод и др. (V. M. Bogod, V. I. Garaimov, N. P. Kotmar, and A. N. Korzhavin), *ESA SP* **448**, 1253 (1999b).
- Богод и др. (V. M. Bogod, S. M. Vatrushin, V. E. Abramov-Maximov, *et al.*), *ASP Conf. Ser.* **46**, 306 (1993).
- Гараимов В.И., Препринт САО РАН **27**, 1 (1997).
- Гарри и др. (D. E. Gary, M. D. Hartl, and T. Shimuzu), *Astrophys. J.* **477**, 958 (1997).
- Гельфрейх (G. B. Gelfreikh), *IAU Coll. № 144 Solar Coronal Structures* (Ed. Rusin V., Heinzel P., and Vial J.-C., Slovakia: VEDA Publishing Company, 1994), p. 21.
- Железняков В.В., *Радиоизлучение Солнца и планет* (М. Наука, 1964).
- Железняков В.В., *Электромагнитные волны в космической плазме* (М.: Наука, 1977).
- Железняков и др. (V. V. Zheleznykov, V. V. Kocharovsky, and V. V. Kocharovsky), *Astron. Astrophys.* **308**, 685 (1996).
- Зайцев, Степанов (V. V. Zaitsev and A. V. Stepanov), *Solar Phys.* **88**, 297 (1983).
- Злотник (E. Ya. Zlotnik), *Radiophys. Quant. Electron.* **44**, 53 (2001).
- Кобрин и др. (M. M. Kobrin, A. I. Korshunov, S. I. Arbutov, *et al.*), *Solar Phys.* **56**, 359 (1978).
- Ковингтон (A. E. Covington), *Solar Phys.* **33**, 439 (1973).
- Корольков, Парийский (D. V. Korol'kov and Yu. N. Parijskij), *Sky and Telescope* **57**, 324 (1979).
- Коуэн (M. H. Cohen) *Astrophys. J.* **131**, 664 (1960).
- Кунду и др. (M. R. Kundu, V. Gaizauskas, B. E. Woodgate, *et al.*), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **57**, 621 (1985).
- Кунду и др. (M. R. Kundu, V. V. Grechnev, V. I. Garaimov, and S. M. White), *Astrophys. J.* **563**, 389 (2001).
- Кунду (M. R. Kundu, S. M. White, K. Shibasaki, and J. P. Raulin), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **133**, 467 (2001).
- Ланг и др. (K. R. Lang, R. F. Willson, J. N. Kile, *et al.*), *Astrophys. J.* **419**, 319 (1993).
- Максимов В.П., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я., *Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца* **82**, 155 (1988).
- Ниндос и др. (A. Nindos, M. R. Kundu, S. M. White, *et al.*), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **130**, 485 (2000).
- Петчек (H. E. Petchek), *Proc. AAS-NASA Symp. on Physics of Solar Flares* (Ed. Hess W.N., NASA SP-50, Washington, D. C., 1964), p. 425.
- Пустильник Л.А., *Астрон. журн.* **50**, 1211 (1973).
- Рябов и др. (B. I. Ryabov, N. A. Pilyeva, C. E. Alexandrakis, *et al.*), *Solar Phys.* **185**, 157 (1999).
- Сыроватский С.И., *Изв. АН СССР, серия физическая* **48**, 37 (1979).
- Танака, Эноме (H. Tanaka and S. Enome), *Solar Phys.* **40**, 123 (1975).
- Ханаока (Y. Hanaoka), *Solar Phys.* **165**, 275 (1996).
- Харфорд и др. (G. J. Hurford, R. B. Read, and H. Zirin), *Solar Phys.* **94**, 413 (1984).
- Хьювертс и др. (J. Heyvaerts, J. M. Priest, and D. M. Rust), *Astrophys. J.* **216**, 123 (1977).
- Шибата (K. Shibata), *Proc. of Nobeyama Symposium* **479**, 381 (1998).