

НАГРЕВ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ И ВАРИАЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Гельфрейх Г. Б.¹, Гольдварг Т. Б.², Копылова Ю. Г.¹, Наговицын Ю. А.¹,

Цап Ю. Т.³, Цветков Л. И.³

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Калмыцкий государственный университет, Элиста, Россия

³ Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный, Крым, Украина

На основе наблюдательных данных, полученных в сентябре 2001 г. с помощью РТ–22 КраО на частотных каналах 8.6 и 15.4 ГГц, методами вейвлет-анализа исследуются квазипериодические вариации микроволнового излучения активных областей Солнца с периодами $T < 10$ мин. Установлено, что наибольшей амплитудой обладают колебания с $T \approx 3$ мин, тогда как квазипериодические вариации с $T < 10$ с оказались подавлены. Обнаружены осцилляции излучения с $T = 10..40$ с, которые связываются с возмущениями альвеновского типа в верхней атмосфере Солнца.

1. Введение

Из наблюдений в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн следует, что колебательные и волновые процессы — неотъемлемый атрибут динамики солнечной атмосферы. Исследование квазипериодических вариаций излучения Солнца позволяет не только понять природу многих атмосферных явлений, но также дает возможность проводить диагностику плазмы и магнитных полей. Неудивительно, что данным вопросам посвящено большое количество работ.

С запуском орбитальных станций SOHO (1995 г.) и TRACE (1998 г.) появилась уникальная возможность исследовать вариации ультрафиолетового излучения Солнца с достаточно высоким пространственным разрешением. Однако при наблюдении в данном диапазоне частот характерное время накопления сигнала, как правило, составляет несколько десятков секунд, что не позволяет проводить анализ колебаний с более короткими периодами. Кроме того, определение величин магнитных полей в верхней атмосфере Солнца с помощью эффекта Зеемана становится крайне проблематичным из-за высокой температуры плазмы. Между тем магнитотормозной механизм, ответственный за микроволновое излучение солнечных пятен в верхней хромосфере, чрезвычайно чувствителен к изменениям как величины, так и направления магнитного поля [1]. Поэтому наблюдения активных областей в радиодиапазоне приобретают особую ценность.

Проблема нагрева солнечной короны остается одной из наиболее актуальных и до сих пор нерешенных проблем современной астрофизики. Вплоть до 1940 г. уменьшение температуры солнечной атмосферы по мере удаления от поверхности казалось само собой разумеющимся. Затем выяснилось, что температура в нижней хромосфере сначала медленно растет, а потом очень быстро увеличивается в переходном слое, достигая в короне нескольких миллионов градусов. В настоящее время для объяснения высокой

температуры солнечной короны чаще всего привлекаются два механизма. В соответствии с первым за нагрев короны ответственны магнитогидродинамические (МГД) волны, возбуждаемые конвективными движениями в фотосфере. Согласно второму корона греется электрическими токами, возникающими при пересоединении магнитных силовых линий. Более привлекательным, по нашему мнению, выглядит первый подход, поскольку второй предполагает достаточно специфические физические условия и локальный характер диссипации токов. При этом следует ожидать, что определяющая роль в нагреве короны должна принадлежать короткопериодическим альвеновским волнам, так как в отличие от других МГД-мод они способны переносить энергию из фотосферы в корону без существенных потерь [2].

Альвеновские волны не сжимают плазму, а вызывают в ней лишь поперечные возмущения скорости и вариации направления магнитного поля. Поэтому можно предположить, что в активных областях, где происходит эффективная генерация теплового магнитотормозного излучения, они могут быть легко обнаружены в микроволновом диапазоне.

В представленной работе на основе наблюдательных данных, полученных в сентябре 2001 года с помощью РТ-22 КрАО методами вейвлет-анализа исследуются квазипериодические вариации микроволнового излучения с $T < 10$ минут в активных областях атмосферы Солнца.

2. Наблюдения

В сентябре 2001 г. наблюдения проводились с помощью диагностического комплекса, созданного на базе радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории на двух длинах волн — 2.0 и 3.5 см, с пространственным разрешением 3.6' и 6.0' соответственно. Поляриметр позволял регистрировать полную интенсивность $I = I_R + I_L$ и параметр Стокса $V = I_R - I_L$, где I_R и I_L — интенсивности микроволнового излучения правой и левой круговой поляризации. Чувствительность радиотелескопа составляла 0.1 с.е.п., а временное разрешение — около 1 с.

С 17 по 24 сентября наблюдалась одна и та же активная область NOAA 9628, что позволило получить непрерывные (до 8 часов) ряды наблюдений интенсивности и поляризации за достаточно длительный промежуток времени. Обработка наблюдений проводилась по программе, разработанной А.В.Мельниковым (ГАО РАН), включающей нормировку, учет паразитных сигналов, пересчет в солнечные единицы потока, а также перевод временных данных на равномерную сетку.

3. Обработка

Для выявления характерных периодов колебаний использовался вейвлет-анализ, позволяющий исследовать временные изменения спектральных характеристик осцилляций, а также сравнивать их амплитуды в широкой полосе частот (программы обработки составлены Ю.А.Наговицыным). В качестве базисного был выбран комплексный вейвлет Морле, так как он в наибольшей степени приспособлен к частотно-временному

анализу, что позволяет точно определять короткие периоды. В ходе обработки данных весь временной ряд разбивался на участки длительностью 30–60 минут. Для построения зависимости амплитуды колебаний интенсивности поляризованного и неполяризованного излучения от периода, последний брался в интервале от 10 до 600 секунд.

4. Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 1, типичного примера динамических спектров, наибольшей амплитудой обладают трехминутные ($T \approx 170$ с) и пятиминутные ($T \approx 300$ с) колебания, хорошо известные из оптических и ультрафиолетовых наблюдений. Вместе с тем оказалось довольно неожиданным, что короткопериодические колебания $T \approx 25$ с также имеют значительные амплитуды, тогда как колебания $T < 10$ с не проявились ни в одной реализации. Поскольку среди МГД-мод, генерируемых в фотосфере конвективными движениями, именно альвеновские волны в наименьшей степени подвержены рефракции и диссипативным процессам, то наблюдаемые короткопериодические колебания можно связать с данными модами. В пользу такого вывода свидетельствуют результаты работы [3], согласно которым альвеновские волны с периодами менее нескольких десятков секунд, распространяясь из фотосферы в корону, практически полностью поглощаются хромосферой.

Методами вейвлет-анализа были исследованы зависимости изменения периодов колебаний от времени. Типичный пример изменения периодов поляризованного излучения представлен на рис. 2. Откуда, в частности, следует, что квазипериодические МГД-возмущения в атмосфере Солнца распространяются в виде цугов, тем самым указывая на значительных энергетические потери. Детальный анализ всего ряда наблюдений показал, что «добротность» осцилляций в среднем не превышает 10. Данный вывод находится в хорошем согласии с результатами наблюдений с высоким пространственным разрешением ($\sim 1''$) на радиоинтерферометре VLA (Very Large Array) [1].

Корреляционный анализ поляризованного и неполяризованного излучения показал, что коэффициент корреляции, как правило, не превышает 0.5, что, по нашему мнению, объясняется низким пространственным разрешением телескопа и неоднородностью активной области. Кроме того, динамические спектры поляризованного излучения по сравнению с неполяризованным в среднем имели более ярко выраженные пики.

5. Выводы

1. Наибольшей амплитудой обладают колебания с характерным периодом $T \approx 3$ мин.
2. Осцилляции имеют вид цугов, и в среднем их «добротность» не превышает 10.
3. Коэффициент корреляции между пульсациями поляризованного и неполяризованного излучения не превышает 0.5.
4. Колебания поляризованного излучения менее «зашумлены», чем неполяризованного.

5. Обнаружены квазипериодические колебания с периодами $T = 10...40$ с, тогда как секундные оказались подавлены.
6. Предполагается, что короткопериодические осцилляции вызваны распространением альвеновских возмущений в верхней хромосфере Солнца.

Работа поддержана грантом ИНТАС № 00–543.

1. Nindos A., Alissandrakis C. E., Gelfreikh G. B. et al.//*Astron. Astrophys.*, vol. **386**, 2002, p. 658–673.
2. De Pontieu, Martens P. C., Hudson H. S.//*Astrophys. J.*, .vol. **558**, 2001, p. 859–871.
3. Gordon B. E., Hollweg J. V.//*Astrophys. J.*, .vol. **266**, 1983, p. 373–382.

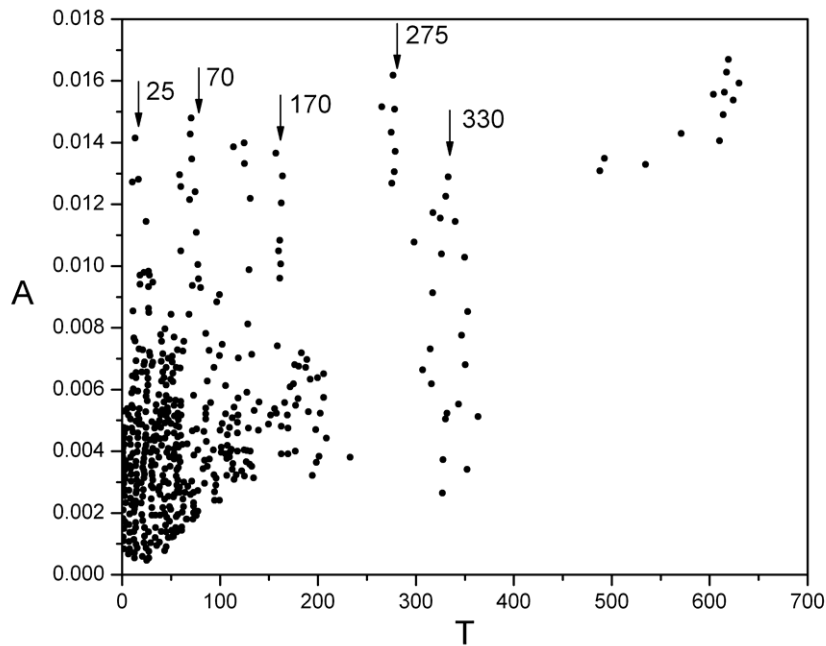


Рис. 1. Пример динамического спектра мощности осцилляций поляризованного излучения (15.4 ГГц) активной области NOAA 9628, полученного 22.09.01 в интервале 8:10–9:00 UT. Период T выражен в секундах

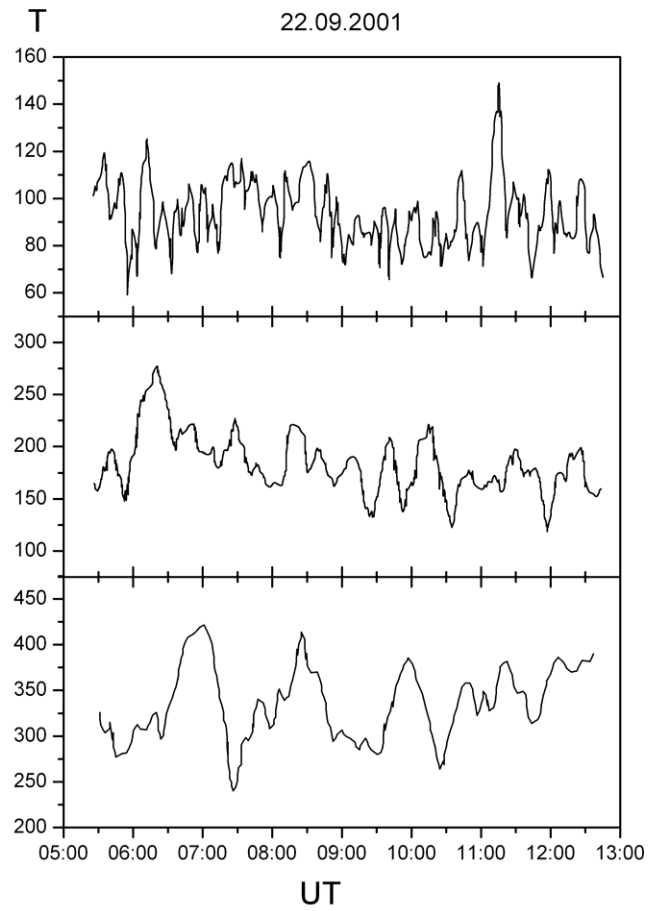


Рис. 2. Изменение со временем периода осцилляций поляризованного излучения (15.4 ГГц) активной области NOAA 9628 в диапазоне от 100 до 300 с. Период T выражен в секундах