

УДК 523.98, 523.982

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТРЕХМИНУТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

С.А. Анфиногентов, Р.А. Сыч

THE INVESTIGATION INTO FREQUENCY STABILITY OF THREE-MINUTE OSCILLATIONS IN THE SUNSPOT ATMOSPHERE

S.A. Anfinogentov, R.A. Sych

Представлены наблюдения осцилляций радио- и EUV-излучения над солнечными пятнами по данным радиогелиографа Nobeyama (NoRH) и Solar Dynamic Observatory (SDO). Исследовались корреляционные кривые NoRH и временные ряды изображений в крайнем ультрафиолете. Были обнаружены повторяющиеся цуги трехминутных колебаний длительностью ~8–20 мин. Наблюдаемые цуги не стационарны по частоте, времени и мощности. Обнаружен дрейф частоты колебаний на протяжении цугов. Вейвлет-анализ показал наличие трех типов дрейфов: положительного, отрицательного и знакопеременного. Временная динамика колебаний совпадает с частотными изменениями. Проведено статистическое исследование дрейфов. Негативные дрейфы преобладают в микроволновом излучении. Обнаружено образование тонкоструктурных деталей в источниках колебаний во время прохождения цугов, связанных с образованием следов от распространяющихся волн. Показано, что тонкая структура трехминутных колебаний может быть объяснена наличием нескольких источников колебаний с различными частотами. Для объяснения полученных результатов предложена гипотеза распространения волн в стратифицируемой атмосфере.

We present the observations of oscillations in microwave and EUV emission above sunspots using data obtained by the Nobeyama radioheliograph (NoRH) and the Solar Dynamic Observatory (SDO). We investigated the NoRH correlation curves, as well as time series of 2D images. We found significant ~2–4 min. periods oscillations above sunspots in the form of repetitive wave trains with duration ~8–20 min. Observed trains are transient in frequency, time and power. During the development of individual trains we detected repetitive frequency drifts. Wavelet analysis showed that there are three types of frequency behavior: positive, negative and variable drifts. The temporal dynamics of oscillations coincides with the frequency changes. We did a statistical investigation of these drifts. It is shown that negative frequency drifts dominate in microwave emission. Studying of the oscillations sources showed the appearance of the fine spatial structures as a wave traces during the development of trains. It is shown that the formation of fine structure of 3-min oscillation may be caused by the coexistence of multiple oscillation sources with different frequencies. The hypothesis of wave propagation in a stratified atmosphere is discussed.

Инструменты и наблюдения

Для исследования осцилляций в пятнах в переходной зоне мы использовали корреляционные кривые и изображения, полученные радиогелиографом Нобейама (NoRH) на частоте 17 ГГц. Выбирались периоды, когда на диске Солнца существовало единственное крупное солнечное пятно с сильно поляризованным радиоисточником. Корреляционные кривые представляют собой усредненные коэффициенты корреляции отдельных пар антенн без учета коротких баз (меньше 24 м между антеннами). Использование этих кривых позволяет быстро оценивать вариации плотности потока во время всплесков, а также проследить динамику колебаний на протяжении дня без необходимости синтеза радиои изображений [Shibasaki, 2001]. В работе также использовались серии двумерных радиои изображений в канале круговой поляризации (R–L), где трехминутные колебания проявляются наиболее отчетливо [Gelfreikh, 1999]. Изображения были синтезированы и обработаны с помощью библиотеки Solar Soft.

Для изучения колебаний в ультрафиолетовом диапазоне использовались данные орбитальной обсерватории SDO/AIA за 8 декабря 2010 г. Изучались последовательности изображений активной области (АО) NOAA 11131 на девяти длинах волн: 171, 193, 211, 304, 131, 335, 94, 1600 и 1700 Å с дискретом записи 24 с и пространственным разрешением 0.6 угл. сек.

Численные методы

Для спектрального анализа корреляционных кривых использовался метод построения вейвлет-скеле-

тонов, основанный на поиске локальных максимумов мощности вейвлет-коэффициентов вдоль временной оси. Для построения скелетона был применен следующий алгоритм: 1) построение мощностного вейвлет-спектра исследуемого сигнала; 2) поиск локальных максимумов мощности для каждого момента времени; 3) определение глобальных максимумов в полосе частот; 4) вывод результатов расчетов в виде карты скелетона. Для анализа пространственной структуры источников колебаний мы использовали метод поточечной вейвлет-фильтрации (ПВФ-метод). Его подробное описание содержится в работах [Sych, Nakariakov, 2008; Sych et al., 2010]. Метод позволяет получать изображения источников колебаний с заданным периодом, отслеживать динамику пространственного распределения амплитуды и фазы колебаний, определять направление, скорость распространения волн и моду волны.

Результаты

Рассмотрим анализ корреляционных кривых NoRH. На рис. 1 показаны результаты обработки одного из исследуемых временных интервалов при прохождении солнечного пятна в АО NOAA 10671 с 23:55 UT 02 мая по 03:15 UT 03 мая 2005 г. Сначала из сигнала были выделены трехминутные колебания с помощью вейвлет-фильтрации (рис. 1, а) в диапазоне периодов 120–240 с. Затем для полученного ряда был построен мощностной вейвлет-спектр (рис. 1, б), кривые распределения мощности (рис. 1, в) и вейвлет-скелетон (рис. 1, г).

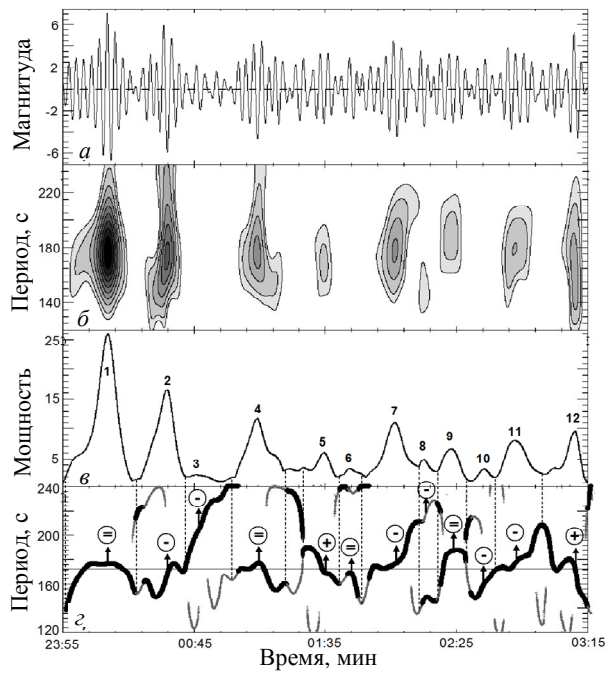


Рис. 1. Вейвлет-анализ корреляционной кривой NoRH для 03 мая 2005 г. с 23:55 по 03:15 UT: трехминутные колебания, выделенные вейвлет-фильтрацией, в диапазоне периодов 120–240 с (а); распределение мощности цугов волн в вейвлет-спектре (б); временной интегральный профиль мощности (в), цифрами указаны номера цугов; вейвлет-скелетон с глобальными (утолщенные линии) и локальными (тонкие линии) экстремумами (г).

На протяжении наблюдений существует 12 цугов трехминутных колебаний различной мощности, длительности и частоты. Длительность находится в интервале ~8–20 мин со средним значением ~13 мин. Расстояние между отдельными цугами ~20–40 мин со средним значением ~30 мин. При анализе частотно-временной динамики вейвлет-скелетона был обнаружен эффект изменения частоты колебаний во время возникновения отдельных цугов. Наблюдаются дрейфы частоты как в сторону низких, так и в сторону высоких частот со скоростью ~5–7 мГц/ч. Для активной области в основном преобладают дрейфы в сторону низких частот, например для цугов № 2, 3, 7, 8, 10 и 11. Также наблюдаются положительные (цуги № 5, 12) и знакопеременные (цуги № 1, 4, 6, 9) дрейфы.

Всего было обработано десять событий прохождения одиночных пятен (02–05.05.2005 г., NOAA 10756; 23–25.01.2002 г., NOAA 9787; 04.07.2006 г., NOAA 10898; 15.08.2006 г., NOAA 2006; 29.04.2007 г., NOAA 10953) по диску Солнца. В исследуемых данных обнаружено ~200 цугов трехминутных колебаний. Негативный частотный дрейф имели 51 % цугов, позитивный – 44 % и в 5 % случаев не было обнаружено значимого изменения частоты.

В предыдущих работах [Sych, Nakariakov, 2008; Sych et al., 2010] было показано, что существует прямая зависимость между возникновением пространственных деталей в пятенных радиоисточниках и усилением мощности трехминутных медленных МГД-волн. Для исследования взаимосвязи между обнаруженным эффектом дрейфа частоты и изменениями в радиоисточнике использовались данные NoRH (изображения и корреляционные кривые) в канале круговой поляризации для 4 мая 2005 г. (03:20–04:30 UT). Были построены изображения узкополосных источников трехминутных колебаний с помощью ПФФ-метода на протяжении развития отдельных цугов колебаний (рис. 2).

Видно, что на протяжении развития дрейфа существуют значительные пространственные изменения конфигурации источника. По мере дрейфа частоты первого цуга в 03:20–04:20 UT (рис. 2) на двумерных изображениях формируется новый V-образный источник путем добавления к источнику (г) в 03:35 UT источника (в) в 03:45 UT. Также появляется компактный источник (а) малого углового размера. Форма источников (вытянутая или компактная) зависит от угла наклона магнитной трубки, вдоль которой распространяются волны. Компактному источнику соответствует магнитная трубка перпендикулярная гирорезонансному слою, а вытянутому – наклонная.

Для исследования обнаруженных частотных дрейфов трехминутных колебаний на других уровнях пятенной атмосферы мы использовали EUV-данные SDO/AIA за 8 декабря 2010 г. при наблюдении AR NOAA 11131 вблизи центрального меридиана. Область состояла из одного крупного пятна. Были получены изображения на девяти длинах волн: 1600, 1700, 171, 304, 193, 211, 131, 335 и 94 Å в 02:30–03:30 UT с дискретом 24 с. Для каждой длины волны рассчитывался поток в тени пятна, выделялись трехми-

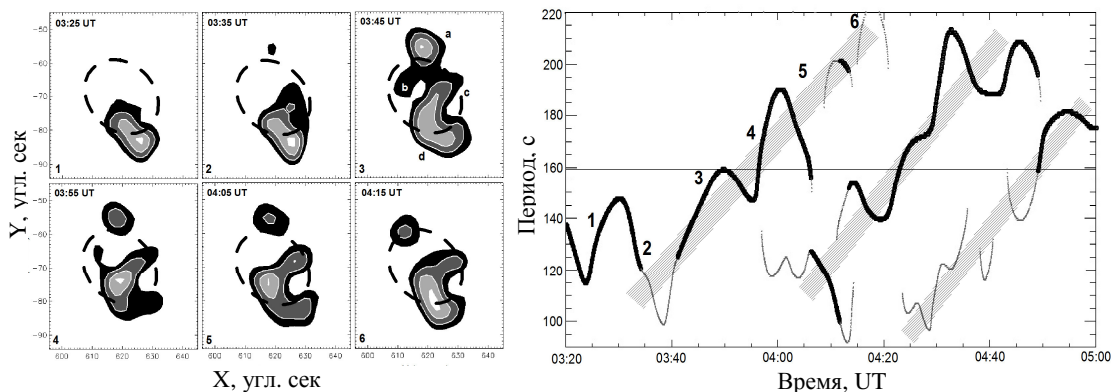


Рис. 2. Левая панель: временные изменения в узкополосном пятенном радиоисточнике на частоте 17 ГГц во время частотных дрейфов трехминутных колебаний корреляционного сигнала 04 мая 2005 г., 03:20–05:00 UT. Прерывистая линия указывает на границу тени пятна. Правая панель: вейвлет-скелетон корреляционного сигнала с указанием нумерации отдельных цугов.

Solar Dynamic Observatory (SDO), December 08, 2010

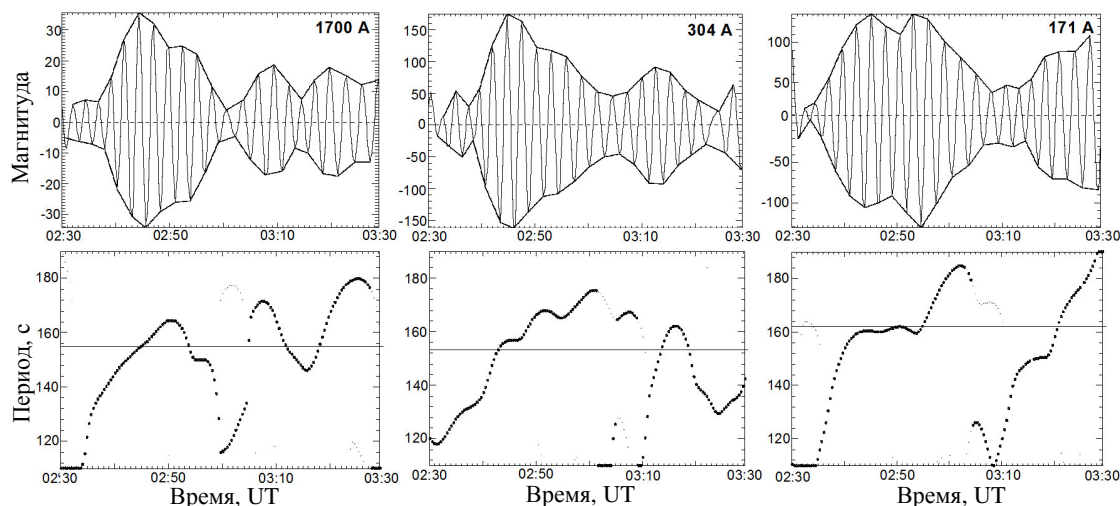


Рис. 3. Верхние панели: профили цугов трехминутных EUV-колебаний в тени пятна для длин волн 1700, 304 и 171 Å, полученные SDO 8 декабря 2010 г. (02:30–03:30 UT). Огибающая пакетов показана утолщенной кривой. Нижние панели: вейвлет-скелетоны для каждого из профилей. Непрерывной линией показано положение максимума излучения в спектре.

нутные колебания и строились вейвлет-скелетоны. На рис. 3 показаны результаты обработки для трех длин волн (1700, 304 и 171 Å).

На всех трех высотных уровнях существует хорошая согласованность профилей дрейфа частоты, частично совпадающих друг с другом. Этот факт говорит в пользу того, что наблюдаемые дрейфы частоты реальные и не связаны, например, с зашумлением сигнала, а также что механизм изменения частоты колебаний распространяется на все уровни атмосферы пятна. Вычисленная скорость дрейфов на уровне фотосферы (1600 и 1700 Å) составила ~4–5 мГц/ч, на уровне переходной зоны (304 Å) и в радиодиапазоне на частоте 17 ГГц около ~5–7 мГц/ч и на уровне короны (171, 193, 211, 131 Å) порядка ~11–13 мГц/ч.

Мы предполагаем, что обнаруженный эффект частотных дрейфов трехминутных колебаний объясним влиянием эффектов частотной отсечки (cut-off frequency effect) и пространственной неоднородности источников на характеристики сигнала. Частота колебаний, наблюдающихся в переходной зоне пятна, близка частоте акустической отсечки, зависящей от угла наклона магнитного поля и отношения газового давления к магнитному. Цуги колебаний являются откликом стратифицированной атмосферы на импульсные события (например, микропересоединения) в нижних слоях атмосферы. Каждое такое возмущение порождает цуг волн, распространяющихся вдоль линий магнитного поля с собственными частотными характеристиками. При сложении откликов возникает эффект амплитудной модуляции и нестабильности частоты колебаний (дрейфы) в интегральном сигнале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gelfreikh G.B., Grechnev V.V., Kosugi T., Shibasaki K. Detection of periodic oscillations in sunspot-associated radio sources // *Solar Phys.* 1999. V. 185. P. 177–191.
- Shibasaki K. Microwave detection of umbral oscillation in NOAA active region 8156: Diagnostics of temperature minimum in sunspot // *Astrophys. J.* 2001. V. 550. P. 1113–1118.
- Sych R.A., Nakariakov V.M. The Pixelised wavelet filtering method to study waves and oscillations in time sequences of solar atmospheric images // *Solar Phys.* 2008. V. 248. P. 395–408.
- Sych R.A., Nakariakov V.M., Anfingentov S.A., Ofman L. Web-based data processing system for automated detection of oscillations with applications to the solar atmosphere // *Ibid.* 2010. V. 266. P. 349–367.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск