

*И.П.Лопин*

## КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ В СПОКОЙНЫХ ОБЛАСТЯХ И В ОЧАГАХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

### I. Колебания интенсивности $H_{\alpha}$ в хромосфере и вспышках по $H_{\alpha}$ фильтрограммам

#### *ВВЕДЕНИЕ*

Проблеме регистрации хромосферных колебаний посвящено большое количество работ. С момента появления первого сообщения по этой теме в течение нескольких десятилетий различными авторами неоднократно подтверждался факт существования 5-мин и 3-мин колебаний в солнечной хромосфере. Дальнейшие исследования выявили следующую особенность. Оказалось, что 3-мин колебания доминируют в темных областях внутри ячеек хромосферной супергрануляционной сетки, тогда как 5-мин колебания – в ярких областях на границе ячеек в местах концентрации хромосферного магнитного поля [6]. Отдельный цикл работ посвящен исследованию колебаний в активных областях Солнца. Так, активные области оказывают значительное воздействие на падающие на них акустические волны, что проявляется в дефиците акустической мощности в факелах и, особенно, солнечных пятнах – в фотосфере и флоккулах – на хромосферных высотах по сравнению с рядом расположенными спокойными областями. Другой немаловажный факт заключается в смещении спектрального максимума 5-мин колебаний в активных областях. В солнечных пятнах [9] и флоккулах [4] спектральная мощность имеет максимум на 3,0–3,1 мГц, в то время как в спокойных областях максимум наблюдается на 3,3–3,4 мГц. В попытке объяснить перечисленные выше особенности рассматривают влияние магнитного поля, которое модифицирует акустические волны в магнито-акустические и изменяет характер распространения волн. Помимо этого, присутствие умеренно силь-

ного магнитного поля усиливает волновой нагрев хромосферы, что приводит к систематическому повышению температуры на всех уровнях хромосферы и как следствие – звуковой скорости [6]. Солнечные вспышки являют пример проявления наиболее сильно выраженных нестационарных условий в солнечной атмосфере. Поэтому исследование осцилляций во вспышках представляет немалый интерес в целях понимания природы наблюдаемых колебаний. В работе [8] анализировались временные серии вариаций интенсивности  $H_{\alpha}$  для двух солнечных вспышек на диске и зафиксированы 5-мин и 3-мин моды в различных областях вспышечных узлов и соседней невозмущенной хромосфере, причем частота обеих мод во вспышках редуцирована в область низких частот на величину 200–400 мГц. Целью нашего исследования является подтверждение данного факта и обнаружение других качественных и количественных характеристик колебаний интенсивности  $H_{\alpha}$  во вспышках и их отличий от таковых в невозмущенной хромосфере.

#### *АНАЛИЗ ДАННЫХ*

Наблюдательный материал представляет собой два  $H_{\alpha}$  фильма полученных с помощью ИПФ с полосой пропускания  $0,5 \text{ \AA}$ , центрированной на ядро линии  $H_{\alpha}$ . Частота съемки – 2 кадра в минуту. Масштаб изображений составлял  $18'' \text{ мм}^{-1}$ , разрешение не хуже  $2''$ . Наблюдения проводились 16.11.1970 во время которых произошли две вспышки балла 2B ( $N15^{\circ} W20^{\circ}$ ), 1B ( $S10^{\circ} E20^{\circ}$ ) и 23.08.1977 со вспышкой балла 2F ( $N30^{\circ} W65^{\circ}$ ). Для анализа нами были отобраны 180 кадров за 16.11.1970 и 170 кадров за 23.08.1977, покрывающих интервал 30–40 мин до, 40–50 мин во время вспышек. Исходные серии фильтрограмм были оцифрованы камерой Coolpix 990 фирмы Nikon, имеющей матрицу 2050–1500 элементов. Одному пикселю на оцифрованных кадрах соответствовало  $1,2''$  видимой поверхности Солнца. Измерения проводились в 4–5 позициях во вспышке и 4–5 позициях в соседней невозмущенной хромосфере. Каждая позиция представляла собой площадку размером  $2 \times 2$  пикселя, измерения по которым усреднялись для улучшения показателя сигнал/шум. С целью исключить влияние возможных неоднородно-

стей пленки для каждого кадра вычислялись средние значения  $J_{\text{хр.ср}}$  интенсивности невозмущенной хромосферы. Отождествление позиций где проводились измерения осуществлялось их привязкой к нескольким близлежащим солнечным пятнам, которые предполагались неподвижными. В результате были получены временные ряды вида:

$$J_{i \text{ всп.,хр.}} = I_{i \text{ всп.,хр.}} / J_{i \text{ хр.ср.}}$$

Анализ данных осуществлялся с использованием процедуры дискретного вейвлет-разложения сигналов. Как известно, преимущество данного метода в сравнение с классическим преобразованием Фурье заключается в хорошей частотно-временной локализации базисов – вейвлетов. Другими словами вейвлет-анализ дает информацию не только об амплитудно-частотных характеристиках сигнала, но и о локализации этих характеристик во времени, что является эффективным средством для решения поставленных в этой работе задач. Вейвлет-декомпозиция представляет собой разложение исходного сигнала на некоторое число элементарных сигналов  $f(t) = \sum f_m(t)$ , где  $m$  – так называемый уровень разложения. Это достигается дискретизацией величин масштаба и сдвига вейвлета, определяющих его локализацию в частотной и временной областях. В системе MATLAB 6.1, где нами проводился вейвлет-анализ масштаб и сдвиг представляются в виде:  $a_m = 2^m$ ,  $b = k 2^m$  и выражены в единицах количества дискретных отсчетов исходного сигнала. Поскольку дискретизация масштаба эквивалентна разбиению частотной области на поддиапазоны (Фурье-образы вейвлета данного масштаба), то вейвлет - разложение есть не что иное как полосовая фильтрация сигнала. Другими словами элементарный сигнал  $f_m(t)$  является результатом вейвлет-фильтрации сигнала  $f(t)$  в полосе частот  $[2^{-(m+1)}\Delta^{-1}; 2^{-m}\Delta^{-1}]$ , где  $\Delta$  – интервал дискретизации сигнала, который в нашем случае составлял 30 сек. Разложение осуществлялось в базисе дискретных вейвлетов Мейера, при  $m = 5$ . Для величины  $\Delta = 30$  с компонента  $f_1$  занимает полосу частот 8,5–17 мГц и рассматривалась как шумовая составляющая. Компоненте  $f_2$  соответствует частотная полоса 4,3–8,5 мГц, в которую входят 3-х ми-

нутные колебания. Для  $f_3$  соответственно 2,1–4,3 мГц – 5-ти минутные колебания. Компоненты  $f_4, f_5$  представляют низкочастотные колебания в полосе частот 0,5–2,1 мГц. Помимо этого при вейвлет-разложении выделяется грубая аппроксимация исходного сигнала, представляющая собой полиномиальный тренд. Пример декомпозиции световой кривой в  $H_\alpha$  позиции во вспышке балла 2В 16.11.1970 показан на рис.1.

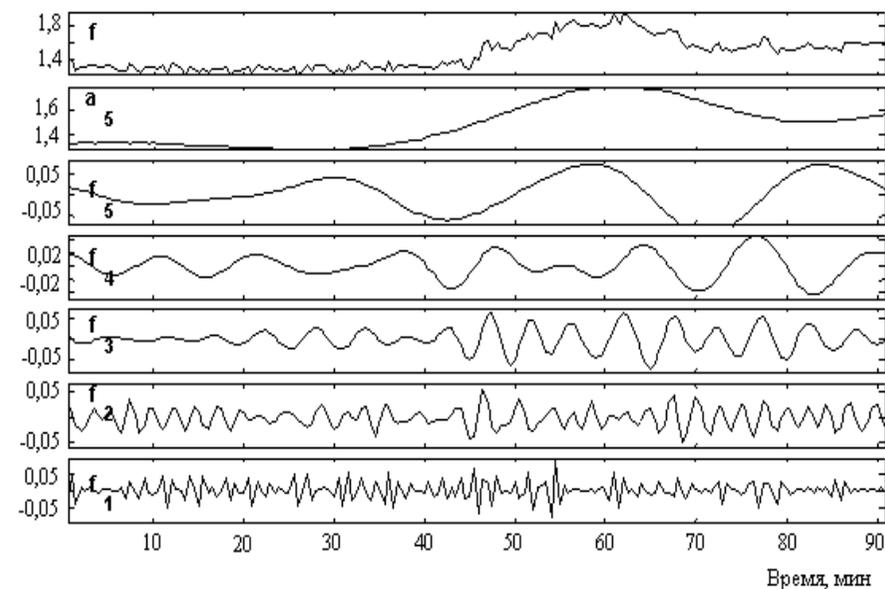


Рис.1. Вейвлет-декомпозиция световой кривой в  $H_\alpha$  для позиции во вспышке 16.11.1970

Рассмотрим, какие изменения претерпевают амплитудно-частотные характеристики колебаний во вспышечной хромосфере. Уже визуальный анализ рис.1 позволяет отметить некоторые отличительные особенности колебаний интенсивности  $H_\alpha$  во вспышке. Пожалуй, главное – это увеличение амплитуды и добротности колебаний. Амплитуда колебаний во вспышке увеличивается, по крайней мере, в 2 раза, добротность в 3 раза. Более тонкие особен-

ности выявляются из анализа вейвлет-спектрограмм являющихся аналогами Фурье-спектрограмм. Вейвлет - спектрограммы строились посредством непрерывного вейвлет- преобразования компонент  $f_m$ , что ведет к разбиению их частотных полос на более узкие отрезки. На рис.2 показаны вейвлет-спектрограммы 5-мин колебаний для вспышки 2В 16.11.1970 и 2F 23.08.1977 соответственно, из которых следует, что масштаб (частота) колебаний не постоянны, а изменяются квазигармоническим образом, в интервале 2,6–3,6 мГц, со средним значением 3,1 мГц и характерным периодом  $T \approx 1300$  сек ( $\nu \approx 0,7$  мГц ). Следующий результат – найденная в [8] редукция частоты 5-мин моды в низкочастотную область во вспышках.

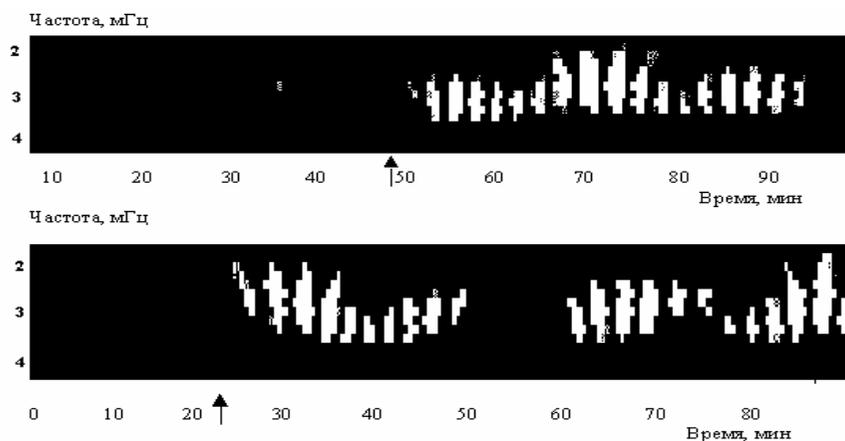


Рис.2. Вейвлет-спектрограммы 5 – мин колебаний в узлах вспышек 2В 16.11.1970 и 2F 23.08.1977 соответственно. Стрелками указан момент начала вспышек

Причем нами отмечена следующая особенность. В случае если вспышечный узел образуется в области невозмущенной хромосферы, происходит смещение и увеличение амплитуды 5-мин спектрального максимума, если же вспышечное уярчение возникает на фоне уже существующего флоккула, то происходит только увеличение амплитуды максимума. Так на рис.3,а показан спектр мощности 5-мин колебаний для позиции во вспышке 2В 16.11.1970. До

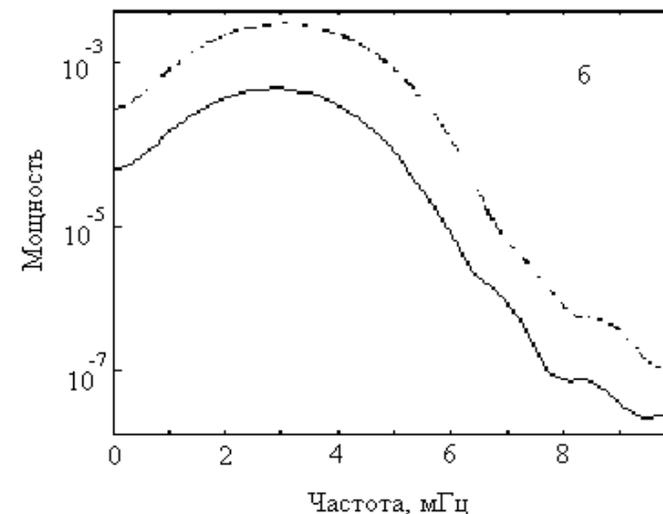
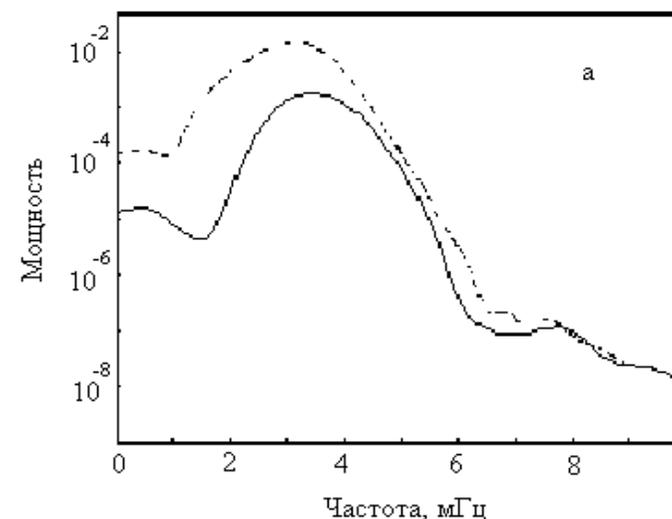


Рис.3. Спектры мощности 5-мин. колебаний для двух позиций во вспышке 16.11.1970 Штриховая линия – для временного интервала во время вспышки. Непрерывная линия – для временного интервала до вспышки. Мощность отложена в логарифмическом масштабе

появления вспышечного узла в этом месте не наблюдалось никаких активных образований и мощность концентрировалась на 3,4 мГц. Во вспышке максимум сместился на 3,1 мГц, его амплитуда увеличилась на порядок. На рис.3,б приведен спектр мощности 5-мин колебаний для другого узла этой же вспышки, возникшего во флоккульной области. Хорошо видно, что каких-либо заметных смещений спектрального максимума не произошло, он наблюдался на частоте 3,0–3,1 мГц, типичной для флоккулов. Однако, как и в первом случае его амплитуда во вспышке увеличилась на порядок. В ряде случаев во вспышках нами отмечено одновременное существование двух мод: 2,3–2,5 мГц и 3,8–4,0 мГц, причем данный эффект наблюдался только в областях вспышек, где ранее существовали флоккулы. Подобный эффект ранее обнаружен в фотосферных слоях активных областей [5]. Следует упомянуть, что сглаженные спектральные оценки получены при помощи стандартной методики разбиения временных рядов (вейвлет-компонент  $f_m$ ) на несколько отрезков (в нашем случае два), получения Фурье-спектров для каждого сегмента с использованием спектрального окна Хэннинга и последующего их осреднения. Для точного определения положения спектральных максимумов осуществлялось Фурье-преобразование цельных временных серий.

Рассмотрим поведение низкочастотных колебаний. Компоненте  $f_4$  соответствует хромосферная мода 1,85 мГц, ранее зафиксированная в [8] и в работе [7], посвященной исследованию колебаний в переходном слое. Во вспышках нами зарегистрирована редукция частоты этой моды в область низких частот. Для самых ярких вспышек 16.11.1970 смещение составляло 500 мкГц (максимум на 1,3 мГц) и для вспышки 23.08.1977 соответственно 300 мкГц (максимум на 1,5 мГц). Следует отметить увеличение амплитуды колебаний во вспышках (см. рис.5) и тот факт, что эффект редукции присущ только вспышкам, тогда как во флоккульных областях он не обнаружен. Анализ вейвлет-спектрограмм в диапазоне масштабов компоненты  $f_4$  показывает наличие эволюционных изменений масштаба (частоты) колебаний, которые в одних случаях имеют вид линейного тренда, в других, как показано на рис.4, являются квазипериодическими.

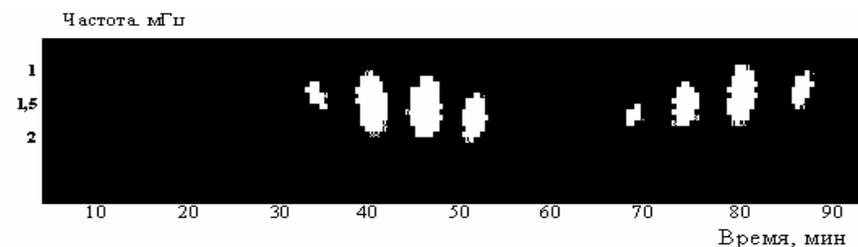


Рис.4. Вейвлет-спектрограмма низкочастотной компоненты  $f_4$  для позиции во вспышке 2В 16.11.1970

Достаточно большая продолжительность временных серий позволила нам изучить колебания на частотах менее 1 мГц. Данный частотный диапазон представлен компонентой  $f_5$ . В невозмущенной хромосфере колебания являются нерегулярными квазипериодическими. Цуг состоит из 2–3 колебаний. При этом спектральная мощность концентрируется на 0,75 мГц. Во вспышках амплитуда и добротность увеличиваются в 2–3 раза, колебания регистрируются гораздо более увереннее, однако они остаются квазипериодическими и их форма отличается от синусоидальной, имея растянутый передний фронт (см. рис.1). Спектральный максимум наблюдается на 0,6–0,7 мГц.

Фурье анализ колебаний в полосе частот 4,5–8 мГц (компонента  $f_2$ ) показывает наличие в спектре мощности широкого максимума на 5,5–6 мГц, который при лучшем спектральном разрешении распадается на несколько (чаще всего три) пиков в интервале 4,5–6,5 мГц. Во вспышечных областях центральный максимум смещается в низкочастотную область на величину  $\sim 200$  мкГц, но при этом увеличивается расстояние до боковых пиков, так что они занимают более широкую частотную полосу (см. рис.6). Анализ тонкой структуры компонент  $f_2$  по вейвлет-спектрограммам (рис.7) показывает, что осцилляции в данном диапазоне (3-мин колебания) испытывают изменения частоты, по крайней мере, в течение одного цуга колебаний. Помимо этого во вспышке 3-мин колебания по структуре напоминают биения – эффект глубокой амплитудной модуляции.

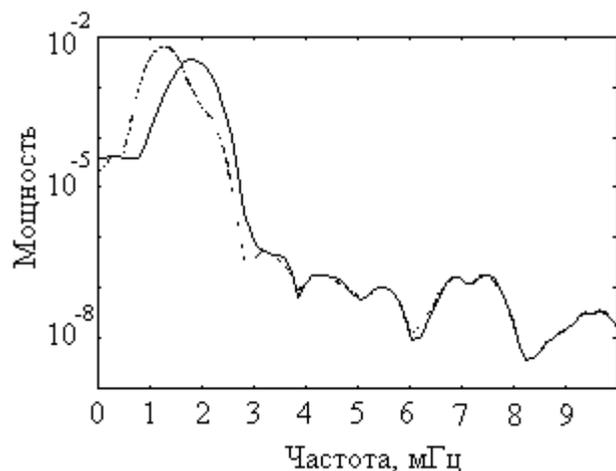


Рис.5. Спектр мощности низкочастотных колебаний в полосе 1 – 2 мГц (компонента  $f_4$ ) для позиции во вспышке 1В 16.11.1970. Непрерывная линия – для временного интервала до вспышки. Штриховая линия – для временного интервала во время вспышки. Мощность отложена в логарифмическом масштабе



Рис.6. Спектр мощности 3-мин колебаний (компонента  $f_2$ ) во вспышке 2F 23.08.1977. Штриховая линия – для вспышечной области. Непрерывная линия – для невозмущенной хромосферы. Мощность отложена в логарифмическом масштабе

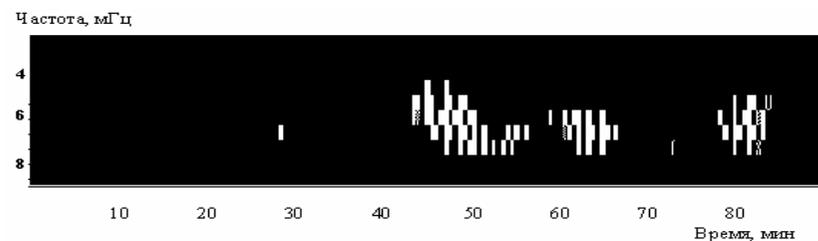


Рис.7. Вейвлет-спектрограмма 3-мин колебаний (компонента  $f_2$ ) для позиции во вспышке 2f 23.08.77.

На рис.8 приведен сравнительный автоспектр колебаний в невозмущенной хромосфере и вспышке 2В 16.11.1970. Хорошо видно, что в хромосфере присутствуют колебания в 3-мин полосе, в области низких частот, в то время как 5-мин колебания практически незаметны. Во вспышке доминируют низкочастотные и 5-мин колебания. Спектральная мощность 3-мин моды несколько меньше.

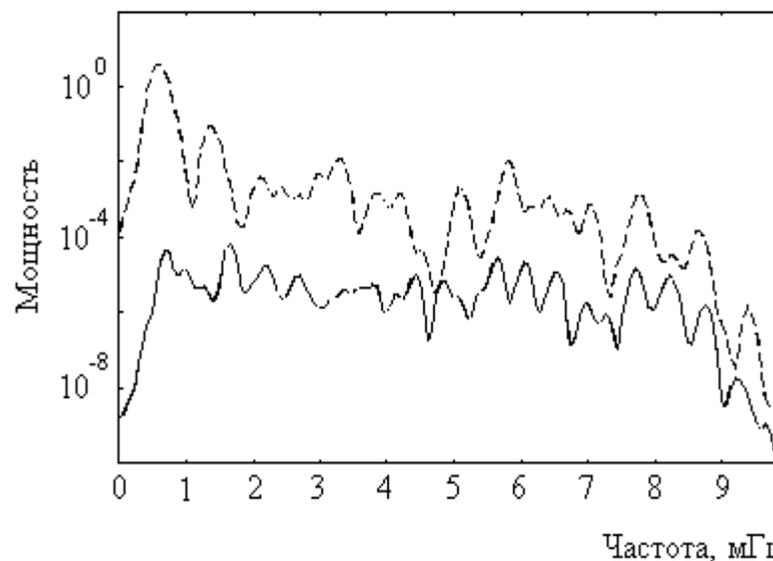


Рис.8. Автоспектр колебаний интенсивности  $N_a$  в невозмущенной хромосфере – сплошная линия и во вспышке –штриховая линия. Мощность отложена в логарифмической шкале

## ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование колебаний интенсивности  $H_{\alpha}$  во вспышках с применением методики вейвлет-разложения сигналов дало следующие результаты. Нами зафиксирован эффект редукции частоты хромосферных мод 1,85; 3,4; 5,6 мГц в низкочастотную область в узлах солнечных вспышек на величины 500, 300 и 200 мкГц соответственно. Все приведенные значения сдвига превышают спектральное разрешение анализируемых временных серий, которое составляет 150 мкГц. Дискретный вейвлет-анализ показывает значительное увеличение амплитуды и добротности колебаний во вспышках, в особенности для колебаний в области низких частот. Данный результат представляется интересным, поскольку, как уже упоминалось выше, в активных областях наблюдается дефицит акустической мощности на всех уровнях атмосферы по сравнению со спокойными областями. Мы считаем возможным, рассматривать три варианта объясняющих этот результат. Во-первых, прогрев основания хромосферы во вспышках может приводить к увеличению коэффициента пропускания волн из фотосферы в хромосферу, и как следствие, к увеличению наблюдаемой амплитуды волн. Во-вторых, из-за увеличения оптической толщины в  $H_{\alpha}$ , во вспышках мы наблюдаем более высокие области, где амплитуда волн выше, вследствие ее роста с высотой. Наконец, сам вспышечный процесс может являться дополнительным источником генерации волн. В пользу второго предположения говорят результаты нашей предыдущей работы [2], где исследовались колебания интенсивности ядер вспышечных  $H_{\alpha}$  петель. Полученные там спектры мощности хорошо согласуются со спектром, представленным на рис.8. Для всех них характерно доминирование низкочастотных и 5-мин колебаний. Таким образом, можно предположить, что при наблюдении вспышек на диске, свечение ядра линии  $H_{\alpha}$  локализовано на значительной высоте, соответствующей типичной высоте вспышечных петель  $\sim 10000$  км. Однако, здесь мы встречаемся с дополнительным затруднением. Действительно, из теории известно, что показатель роста с высотой амплитуды акустико-гравитационных волн

уменьшается с понижением частоты волн, что противоречит изложенным выше результатам. Недавние расчеты нелинейной генерации АГ волн [3], показывают возможность возникновения низкочастотных волн на разностной частоте с показателем роста амплитуды, превышающим таковой для первичных высокочастотных волн.

Относительно причины возникновения эффекта редукции, естественно рассматривать изменение параметров, определяющих частоты волновых мод. В случае 3-мин колебаний таким параметром является лэмбовская частота отсечки, обратно пропорциональная звуковой скорости. Вспышечный нагрев, может приводить к систематическому увеличению скорости звука и, соответственно, к уменьшению резонансной частоты отсечки. 5-мин колебания, как известно, генерируются в фотосферной полости, и лишь частично проникают в хромосферу. Следовательно, эффект редукции 5-мин колебаний должен наблюдаться и на фотосферном уровне, что подтверждается в [9], при исследовании колебаний в солнечных пятнах. Возможной причиной является модификация самой резонансной полости в высотном масштабе. На это указывают спектральные наблюдения в [1], где делается вывод, что фотосфера под вспышкой оказывается приподнятой над уровнем невозмущенной фотосферы, из-за перераспределения плотности во вспышечной атмосфере. В [9], в качестве основной причины смещения частоты спектрального максимума акустических мод в солнечных пятнах рассматривается влияние градиента магнитного поля пятен.

Применение непрерывного вейвлет-разложения позволило нам выявить тонкую структуру колебаний. Так 5-мин и 3-мин осцилляции показывают квазигармонические изменения масштаба (частоты) за время наблюдений, с характерным периодом  $T \approx 1300$  с, занимая частотный диапазон 2,5–4,0 мГц и 4,5–7,0 мГц соответственно. Наиболее заметно данный эффект проявляется во вспышках.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Барановский Э.А., Курочка Е.В. Свечение линий ионизованного железа в солнечных вспышках // Известия КРАО.1992. Т85. С.15-20.

2. *Лопин И.П.* О спектрах колебаний интенсивности в хромосфере и вспышечных  $H_{\alpha}$  и  $K\text{CaII}$  петлях // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2003. С.112-120. (Тр.УАФО; Т.7, вып.7).

3. *Петухов М.Ю., Петухов Ю.В.* Параметрическая генерация акустико-гравитационных волн в атмосфере Солнца // Письма в АЖ.2001.Т27.№3.С.220-226.

4. *Пруст Э.Р.* Солнечная магнитогидродинамика. М.Наука. 1985. 589с.

5. *N.Alamanni et al.* CaI 6162 A line oscillations observed in a solar active region // Astron.Astrophys. 1990. 228, 517-521.

6. *F.L.Deubner and B.Fleck* Dynamic of the solar atmosphere. 111.Cell-network distinctions of chromospheric oscillations // Astron. Astrophys. 1990. 228.506-512.

7. *J.G.Doyle et al.* Waves in the solar transition region.// Solar Physics.1998.181.51-71.

8. *R..Jain and S.C.Tripathy* Detection of  $H_{\alpha}$  intensity oscillations in solar flares // Solar Physics.1998.181.113-120.

9. *B. Kumar et al.* p Modes in and away from a Sunspot. // Solar Physics.2000. 191. No.2. 293-307.

**МАТЕРИАЛЫ СОВМЕСТНОГО СЕМИНАРА  
ИСЗФ СО РАН И УАФО ДВО РАН  
«ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И  
ЕЕ ПРОЯВЛЕНИЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ»**

Горнотаежное, 26-28 сентября 2004 г.

**ПОВЕДЕНИЕ ЭКСТРЕМУМОВ ПРОФИЛЕЙ СТОКСА  
МАГНИТОАКТИВНЫХ ЛИНИЙ В СПОКОЙНОЙ  
СОЛНЕЧНОЙ ФОТОСФЕРЕ**

*А.В. Баранов*

*Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН*

Текст доклада соответствует опубликованной в данном выпуске статье.

**АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ СТОКСА КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ  
СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА**

*А.В.Баранов, Л.Ф.Лазарева*

*Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН*

Проанализированы профили круговой поляризации ( $r_V$ ) и интенсивности ( $r_I$ ) поляризации 9 магнитоактивных линий в спектре солнечного пятна, имеющих для данной области спектра значительный эффективный фактор Ланде ( $g_{\text{эфф}}$ ) и хорошо видимое расщепление.