

О СПЕКТРАХ КОЛЕБАНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ХРОМОСФЕРЕ И ВСПЫШЕЧНЫХ H_{α} И $KCa11$ ПЕТЛЯХ

Общепризнанным является факт существования колебаний в солнечной фотосфере и хромосфере со спектральными максимумами, приходящимися на 3,5mHz и 5,5mHz. Наблюдаемые колебания объясняют наличием в атмосфере резонансных полостей – областей, где происходят эффективный захват волн и раскачка резонансных колебаний. На фотосферном уровне область температурного минимума играет роль отражателя на верхней границе резонатора для акустической р-моды, что приводит к развитию стоячей волновой структуры. В хромосфере роль верхней границы полости играет переходный слой, а нижней – температурный минимум. Условия захвата выполняются здесь для акустических и (либо) для магнитоакустических волн [1,5]. Однако в литературе приводятся данные некоторых наблюдений, которые свидетельствуют о наличии бегущих волн в хромосфере [3], так что природа хромосферных колебаний еще не известна. Большое число работ посвящено регистрации колебаний в короне, в частности в корональных петлях. В подавляющем большинстве случаев использовались данные, полученные в радио-, рентгеновском и УФ-диапазонах. Наблюдаемые периоды (0,01–100 с) связывают с проникновением короткопериодических волн из фотосферы в корону. Пространственные колебания корональных петель, наблюдаемых в линиях УФ и оптического диапазона, изучались в работе [4]. Относительно причины возбуждения таких колебаний рассматриваются либо возмущения от близлежащей вспышки, либо раскачка оснований петель фотосферными колебаниями.

Мы акцентируем наше внимание на вспышечных петлях, наблюдаемых в линиях H_{α} и $KCa11$, по структуре аналогичных активным протуберанцам солнечных пятен. Сам факт их видимости в оптическом диапазоне говорит о том, что мы имеем дело с чрезвычай-

но холодной для корональных условий материей. По данным Джеффриса и Оррала, оптические петли характеризуются следующими параметрами: $n_e \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \sim 2 \times 10^4 \text{ K}$, т.е. значение температуры на два порядка меньше корональной. Недавние наблюдения с аппарата TRACE показывают систематическое присутствие в короне холодной плазмы с температурой порядка хромосферной [6]. Считается, что плазма поднимается из хромосферы вдоль силовых линий арочного магнитного поля короны и заполняет петлю плотной и холодной плазмой, необходимой для поддержания гидростатического равновесия магнитной конфигурации. Такие потоки могут возникать в фазе подъема простой вспышечной петли, когда из-за наличия дополнительного источника нагрева в петле возникает нехватка плазмы для поддержания равновесия, и вещество будет втягиваться снизу [3]. В результате атмосфера такой вспышечной петли будет существенно отличаться от типичной атмосферной структуры спокойной либо активной области.

Нам представляется интересным рассмотреть особенности спектров колебаний интенсивности оптических петель в их сравнении с хромосферными колебаниями, основываясь на следующих соображениях. Вследствие изменения стратификации хромосфера петли простирается до высот 10000–20000 км. Наличие замкнутой магнитной конфигурации и резкий температурный градиент на внешней границе петли (аналог переходного слоя) канализируют волновой поток, распространяющийся из фотосферы. Все это приводит к качественному изменению хромосферного резонатора и, с точки зрения модели захваченных волн, характеристик колебательных процессов.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для анализа нами были отобраны две лимбовых вспышки, произошедшие 08.09.1977 и 27.01.1978 г. Наблюдательный материал представляет собой два фильма, полученные с помощью ИПФ в $KCa11$ и H_{α} соответственно для событий 08.09.1977 и 27.01.1978 г. в

период вспышечного патруля. Частота съемки в первом случае 4–5 кадров в минуту, во втором – 2 кадра в минуту. Событие 27.01.78 г. (рис.1) произошло над группой пятен №18 по нумерации СД, когда группа пересекала восточный лимб. Качественное описание вспышки дано в [2]. В 03^h10^m UT над лимбом появился выступ, яркость которого росла по мере подъема. Примерно в 03^h33^m UT эмиссионная область над лимбом превратилась в арку с двумя яркими узлами, расположенными по обе стороны от вершины петли, на высотах 6 и 8 тыс. км. Максимум эмиссии в H α наблюдался в 03^h36^m UT, после чего началось опускание арки как целого. Максимальная высота арки составила 10 тыс. км. Крупная лимбовая вспышка 08.09.1977 г. была связана с группой пятен MCMATH 14943(SGD), пересекавших восточный лимб. Событие началось в 22^h00^mUT, когда над лимбом появился небольшой холм, по мере подъема увеличивавшийся в яркости и поперечном размере. Первоначально выделялся только один яркий узел, однако примерно в 22^h13^mUT появился второй узел. Оба эмиссионных ядра находились примерно на одной высоте, около 15000–20000 км. Максимум яркости в KCa11 наблюдался во вспышке в 22^h40^mUT. На изображениях вспышки выделялись достаточно слабые эмиссионные столбы, связывающие корональные ядра с хромосферой. Мы считаем, что в данном случае имел место подъем аркады из 3–4 вспышечных петель с яркими узлами в их вершинах. Дальнейшие эволюционные изменения во вспышке связаны с постепенным уменьшением яркости узлов без каких-либо заметных пространственных смещений.

Для последующей обработки в событии 27.01.1978 г. взята временная серия 03^h30^m–04^h18^mUT, включающая основные этапы развития процесса: подъем вспышечной петли с увеличением яркости, H α максимум и опускание арки со спадом эмиссии. Во вспышке 08.09.1977 г. отобраны два интервала: 21^h57^m–22^h13^mUT до максимума в KCa11 и 23^h28^m–00^h03^mUT соответственно на фазе спада интенсивности. Исходные серии фильтрограмм были оцифрованы камерой “Coolpix 990” фирмы “Nikon”. Полученные изображения в формате JPG импортировались в систему Adobe Photoshop 4,0 и пе-

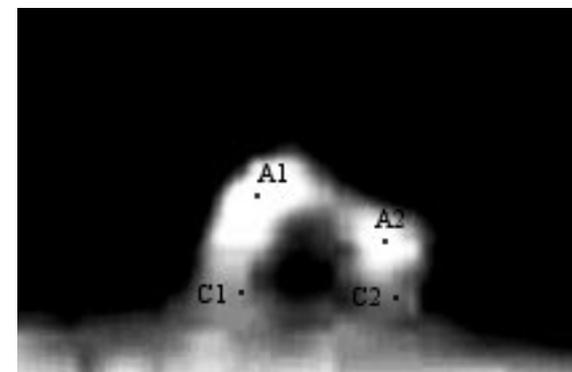


Рис.1. Событие 27.01.1978 г. Точками указаны позиции, где проводилось фотометрирование

реводились в режим градаций серого цвета, так что уровень почернения характеризовался процентной долей насыщенности серым цветом. Интенсивности измерялись в корональных узлах вспышечных петель, их основаниях, а также в трех точках хромосферы вблизи лимба, которые затем усреднялись для получения $J_{\text{хр.ср.}}$ с целью исключить влияние возможных неоднородностей пленки и хромосферных колебаний в предположении их некогерентности в измеряемых точках. В результате были получены временные ряды вида:

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

Для исключения тренда исходные реализации были обработаны высокочастотным фильтром, реализованным по тригонометрическому алгоритму Батеруорта второго порядка. Частота обрезания бралась равной удвоенной величине спектрального разрешения полученных нами серий, которая составляла 0,4–0,5 mHz. Далее применялась процедура быстрого преобразования Фурье. Для проведения непосредственного анализа измеренных сигналов и их качественных характеристик временные серии были отфильтрованы полосовым фильтром Батеруорта так, чтобы в полосу пропускания

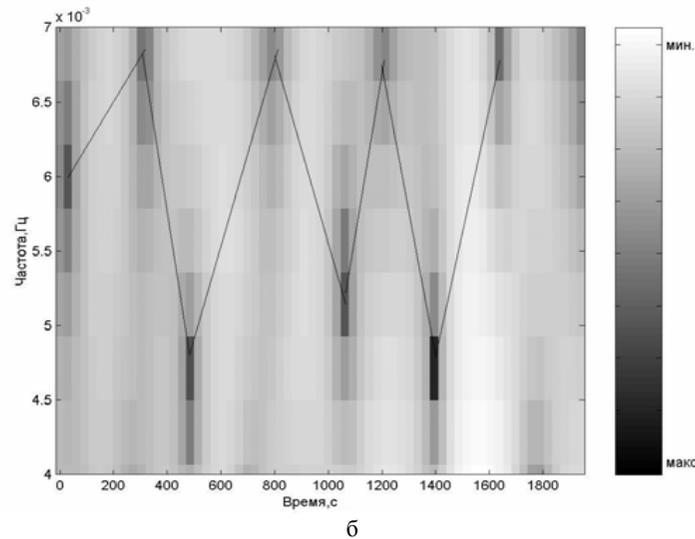
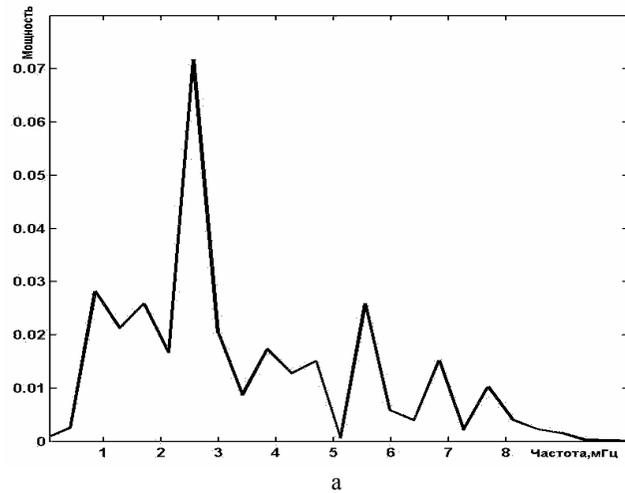


Рис.2. а – спектр мощности колебаний интенсивности H_{α} в хромосфере за 27.01.1978 г.; б – спектрограмма хромосферных колебаний в интервале 4–7 мГц. Мощность отображается в виде градаций серого цвета. Ломаная линия соединяет соседние максимумы

входили все главные спектральные максимумы, определенные при БПФ, при этом рассматривались три частотных интервала: 0–2,5 мГц, 2,5–4,5 мГц и 4,5–7 мГц.

Типичный спектр мощности колебаний интенсивности в хромосфере показан на рис.2а. В низкочастотной области регистрируются пики, соответствующие 0,7–0,8 мГц и 1,5–1,7 мГц. В полосе 5^м колебаний (2,5–4,5 мГц) максимум спектральной мощности приходится на частоты 2,7–3,0 мГц. Для 3^м колебаний (4,5–7 мГц) характерно присутствие множества пиков на частотах 4,6; 5,6; 6,0 и 6,8 мГц, причем в каждом конкретном случае доминирует один из перечисленных максимумов. Ввиду относительно небольшой длины реализации наших серий (~2400 с) мы имели возможность проследить за динамикой только высокочастотных колебаний. Очень эффективным средством для этих целей является построение спектрограмм, дающих наглядное представление об эволюции спектра. Спектрограммы строились с помощью подвижного окна Хэннинга, размер которого составлял четверть длины серий. Шаг вдоль временной оси составлял 30–60 с (2–3 дискретных отсчета). Анализ спектрограмм дал следующие результаты. Очевидно то, что на конкретном временном отрезке существуют колебания только на определенной частоте из интервала 4,5–7 мГц (см.рис.2,б), причем повторяются они с некоторой периодичностью, как следует из вида ломаной линии на рис.2,б. Это дает основание предположить наличие общего источника (механизма), возбуждающего эти колебания и модулирующего их частоту. Данный факт нуждается в дальнейшей проверке на основе большего количества материала.

Как уже было сказано, вспышечные петли, видимые в линиях оптического диапазона характеризуются совершенно иной атмосферной стратификацией, где хромосфера простирается до высот 10000–20000 км, соответствующих области нижней короны. В свою очередь это дает возможность проследить, как изменяются сигнал и его спектральные характеристики в сравнении со стандартными хромосферными параметрами. С этой целью нами были получены кривые колебаний яркости узлов и оснований вспышечных петель.

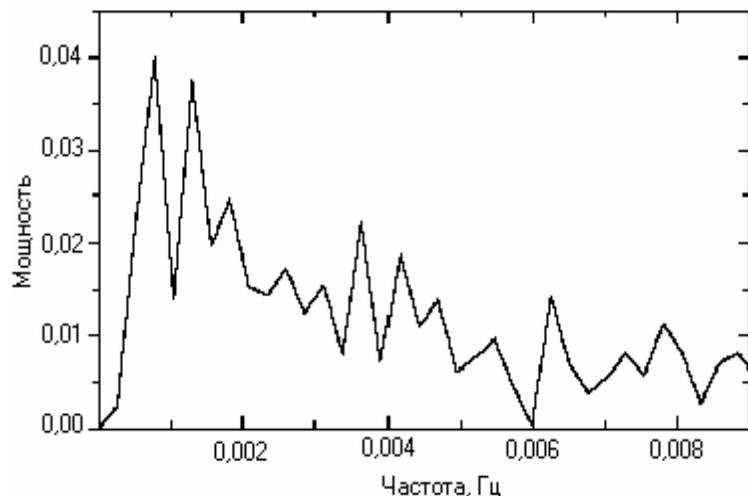


Рис.3. Спектр мощности колебаний интенсивности узла A1, представленного на рис.1

На рис.3 представлен спектр мощности колебаний яркости узла A1, наблюдавшегося в событии 27.01.1978 г. Как видно из рис.3, доминируют крупные пики в низкочастотной области на 0,8 mHz и 1,6 mHz. Примерно в 3–4 раза слабее максимумы в частотном интервале 3–7 mHz. Спектры мощности колебаний яркости в основаниях вспышечных петель аналогичны хромосферным. Таким образом, спектральный состав колебаний интенсивности оптических петель не имеет каких-либо существенных отличий от типичного спектра хромосферных колебаний во всем рассматриваемом интервале частот. Изменение претерпевает распределение мощности в спектре. В петельных узлах преобладают низкочастотные колебания (0,8 mHz и 1,6 mHz), амплитуда которых в хромосфере почти на порядок ниже. Амплитуда 5^m и 3^m колебаний незначительно увеличивается при переходе от основания петель (что отождествляется нами с уровнем хромосферы) к их вершинам.

Необходимо также выяснить, являются ли изучаемые колебания бегущими волнами. С этой целью мы отфильтровали исходные сигналы в указанных выше частотных интервалах и рассчитали

кросскорреляционные функции для узлов и оснований вспышечных петель. Анализ показал, что в области низких частот и для 5^m осцилляций фазовый сдвиг равен нулю и колебания когерентны по фазе на всем протяжении петель. Такое поведение характерно для так называемых эванесцентных (нераспространяющихся) волн акустико-гравитационной моды. Для высокочастотных колебаний ввиду того что длина волны меньше расстояния между позициями, где проводилось фотометрирование, однозначный ответ об их природе дать затруднительно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты качественного и количественного анализа спектров мощности колебаний яркости хромосферы и вспышечных петель сводятся к следующему:

1. Спектры мощности колебаний яркости хромосферы в выбранных точках, как в линии $H\alpha$, так и в линии KCa11, показывают наличие ряда пиков в интервале 0,8–7 mHz, с максимумами на 2,7–3,0 mHz и 5–6 mHz.

2. В интервале 4,5–7 mHz колебания, по-видимому, имеют общее происхождение, о чем свидетельствует тот факт, что на конкретном временном отрезке существуют колебания только на определенной частоте из указанного интервала.

3. Спектральный состав колебаний яркости в основаниях и узлах вспышечных петель в целом идентичен хромосферному. При переходе в более высокие области, а именно при рассмотрении колебаний яркости петельных узлов, спектральная мощность концентрируется в области низких частот 0,8–2 mHz.

4. В области низких частот колебания имеют нулевой фазовый сдвиг на всем рассматриваемом интервале высот.

Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на отличающуюся высотную стратификацию атмосферы оптических петель, спектральный состав колебаний яркости их аналогичен таковому в обычной хромосфере. С этих позиций модель хро-

мосферного резонатора как источника наблюдаемых в хромосфере дискретных колебательных мод не находит своего подтверждения.

Автор благодарит к.ф.-м.н. Г.И.Корниенко и М.И.Фисенко за полезные советы в процессе работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жугжда Ю.Д., Лоцанс В. Резонансы волн в солнечной атмосфере // Динамика токовых слоев и физика солнечной активности. Рига, 1982. С.131-137.
2. Лоскутников В.С. Лимбовая вспышка 27.01.1978 г. // Магнитные поля и движения активных областей на Солнце. Владивосток: ДВО АН СССР, 1985. С.140-144.
3. Пруст Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. М. Наука. 1985. 589 с.
4. Ashwanden M.I. and all. Coronal loop oscillation observed with TRACE // Astrophys. J. 1999. V.520. P.880-894.
5. Cristensen-Dalsgaard J. Frandsen S. Radiative transfer and solar oscillation // Solar Phys. 1983. V.82. P.165-204.
6. Schrijver C.J. and all. A new view of the Solar Outer Atmosphere by the TRACE // Solar Phys. 1999. V.187. P.261-302.

В.С. Лоскутников

О СВЯЗИ МИКРОВОЛНОВОГО И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ВСПЫШЕК

Хорошо известно, что электроны, ускоренные в течение солнечной вспышки, излучают электромагнитные волны в широком диапазоне спектра, включающем в себя радио- и жесткое рентгеновское излучения. Жесткое рентгеновское излучение является электрон-ионным тормозным излучением, производимым электронами с энергиями менее 200 кэВ, и в основном исходит из оснований вспышечных петель. Микроволновое излучение – это гиротронное излучение электронов с энергиями более 200 кэВ. Наблюдения микроволнового излучения с высоким пространственным разрешением показывают, что его источник находится в вершине петель [1]. Считается [2], что электроны, ответственные за оба эти вида излучений, имеют общее происхождение, поэтому одновременные наблюдения микроволнового и жесткого рентгеновского излучений позволяют изучать механизм ускорения электронов во вспышках в широком диапазоне энергий.

В настоящей работе представлены результаты определения физических условий в тех областях вспышечных петель, откуда исходят эти излучения, основанные на статистической связи между потоками жесткого рентгеновского излучения и микроволнового радиоизлучения на частоте около 9 ГГц. Частота 9 ГГц выбрана потому, что наблюдающие на ней станции распределены довольно равномерно по долготе и, кроме этого, эта частота близка к поворотной (turnover) частоте для большинства вспышек, т.е. частоте, вблизи которой оптически толстое радиоизлучение вспышек становится оптически тонким. Эта частота зависит главным образом от напряженности магнитного поля и плотности излучающих электронов и равна 8–10 ГГц [7]. Данные о жестком рентгеновском излучении