

ВЕЕРНЫЕ КОРОНАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

А.А. Челпанов, Н.И. Кобанов

CORONAL FAN-LIKE STRUCTURES AND WAVE PROCESSES IN THE SOLAR ATMOSPHERE

A.A. Chelpanov, N.I. Kobanov

МГД-волны различных типов существуют в любой точке атмосферы Солнца. Исследуя тип волн, направление и скорость их распространения, можно делать выводы о физических условиях в плазме, конфигурации магнитного поля и о потоках энергии, переносимой между слоями солнечной атмосферы. На корональном уровне мощные проявления волн – колебания – локализованы в петлях магнитного поля, видимых в эмиссионных линиях как так называемые веерные структуры. Эти петли уходят концами в нижние слои атмосферы, преимущественно в участки умеренного и сильного магнитного поля. В анализе мы использовали серии спектрограмм активных областей, полученных на наземном телескопе в двух спектральных линиях одновременно, и серии наблюдений в различных линиях обсерватории СДО, соответствующие по времени наземным сериям. Тогда как на нижних уровнях атмосферы в спектрах колебаний лучевых скоростей доминируют трех- и пятиминутные колебания, в спектрах вариации интенсивности веерных корональных структур преимущественно наблюдаются низкочастотные колебания (1–2 мГц). Неопределенности при определении направления и скорости распространения колебаний вдоль петель порождены неопределенностями при измерениях временной задержки.

Different-type MHD-waves exist at every point of the Sun's atmosphere. Investigating the type of waves and their propagation velocity and direction, one can draw conclusions on the physical condition in plasma, magnetic field configuration, and the energy flows between the atmosphere layers. At the coronal height, powerful wave manifestations—oscillations—locate in magnetic field loops seen as so-called fan structures in the emission lines. These loops foot-base in the lower atmosphere layers, mostly in the moderate and strong magnetic field areas. In the analysis we used ground-based telescope two-line active-regions spectrogram series and observatory SDO series corresponding in time to those from the ground-based telescope. While in the lower atmosphere the 3- and 5-min oscillations dominate, the low-frequency oscillations (1–2 mHz) are mainly observed in the fan-structure intensity variation spectra. Uncertainty in detection of oscillation propagation direction and velocity along loops is due to uncertainty in the time lag measurement.

Волны, распространяющиеся в атмосфере Солнца, являются хорошим инструментом диагностики физических условий в верхних слоях атмосферы и представляют интерес при решении вопроса о механизме нагрева верхней хромосферы и короны.

Ранее мы исследовали распространение волн в факелах и пятнах: рассматривали изменение состава колебаний на различных высотах атмосферы этих объектов и, в частности, исследовали колебания в корональных петлях, видимых в эмиссионных линиях.

В этой работе мы анализируем корональные петли, соединяющие пятно и факел. Мы использовали ряды данных наземного Горизонтального автоматизированного солнечного телескопа и спутниковой обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO). Данные охватывают широкий диапазон высот солнечной атмосферы – от нижней фотосферы до короны.

Были выбраны пятно и факел, относящиеся к активной области NOAA 11311. Продолжительность серий составляла четыре часа для спутниковых данных; в этот промежуток времени наземным телескопом поочередно наблюдались пятно (2 ч) и факел (1.5 ч) одновременно в линиях SiII 10827 Å и HeI 10830 Å (фотосфера и хромосфера соответственно).

Известно, что в фотосфере пятен и факелов примерно одинаковый спектральный состав колебаний – в сигналах скорости доминируют пятиминутные колебания. Выше, в хромосфере, спектры этих объектов разнятся: в факелах по-прежнему преобладают пятиминутные колебания, в пятнах же выделяются трехминутные колебания. Наблюдается ли аналогичное различие над хромосферой пятен и факелов, в нижней короне?

В предшествующих работах мы показали, что в нижней короне как над пятнами, так и над факелами

в сигналах интенсивности наибольшей амплитудой обладают низкочастотные колебания с частотами менее 2 мГц, при этом пространственное распределение мощности колебаний воспроизводит видимые в эмиссии корональных линий петельные и веерные структуры, что говорит о том, что в нижней короне низкочастотные колебания локализованы в этих петлях.

Для анализа мы выбрали четыре петли, базирующиеся одним основанием в пятне, другим – в факеле.

После коррекции изображений за вращение получены пространственные распределения мощности колебаний в области, охватывающей пятно и факел, в диапазоне 1...2 мГц и построены фурье-спектры сигнала в отдельных точках пространства.

Спектры показали, что вблизи оснований петель у факела и у пятна состав колебаний отличается: в окрестностях пятна максимум находится в диапазоне от 0.5 мГц до 2 мГц, тогда как над факелом самые мощные колебания сосредоточены в более узкой полосе – от 0.5 мГц до 1 мГц, при этом пики в полосе 1...2 мГц выделяются над более низкочастотными колебаниями.

Мы проследили поведение составляющих спектра колебаний в различных точках на протяжении петли от одного основания до другого. В центральной части петли, наиболее удаленной от оснований, резко (до десяти раз) усиливаются колебания в диапазоне 0.5...1 мГц. Изменения амплитуды колебаний вдоль петли могут быть объяснены двумя основными причинами:

1. Увеличением вклада в сигнал от плазмы, находящейся под петлей, из-за уменьшения концентрации плазмы в петле при удалении от основа-

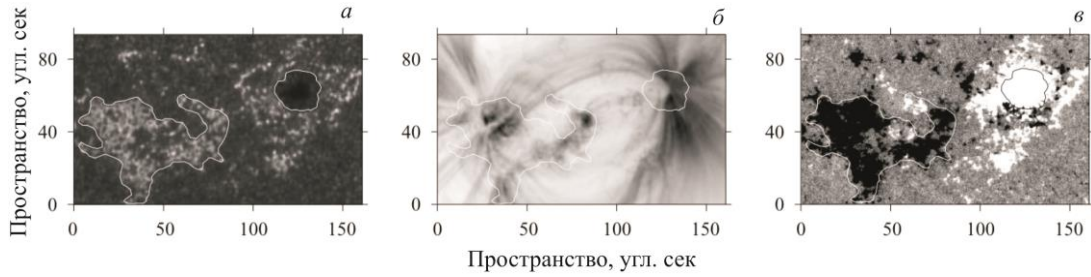


Рис. 1. Активная область, видимая в полосе пропускания SDO 1700 Å (а): факелы наблюдаются в виде светлых участков; справа видно пятно, в котором можно различить тень и полутень; инвертированное изображение активной области в линии SDO 171 Å (б); распределение m (в).

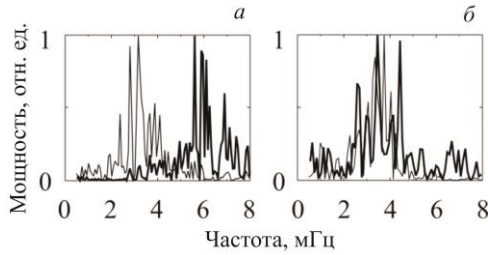


Рис. 2. Спектры мощности колебаний фотосферы (тонкие линии) и хромосферы (толстые линии) по данным наземных наблюдений лучевых скоростей: а – пятна; б – факела.

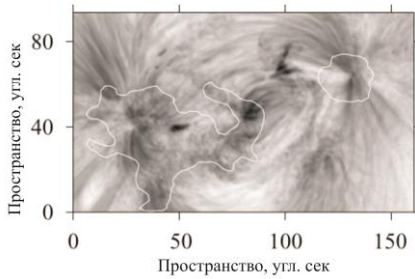


Рис. 3. Распределение мощности колебаний интенсивности линии 171 Å в полосе 1...2 МГц.

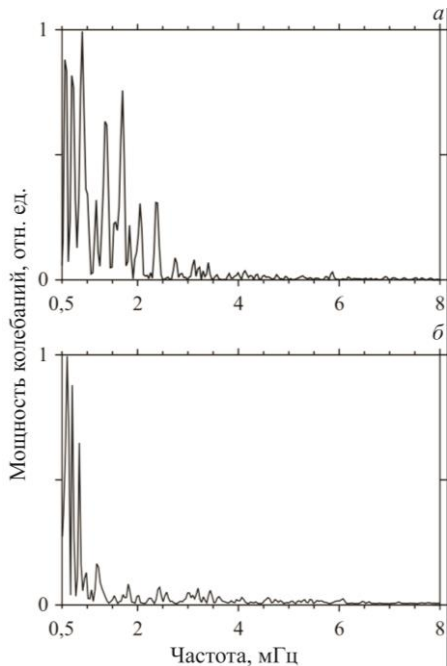


Рис. 4. Спектры колебаний интенсивности линии 171 Å в подножиях петель: а – над пятном; б – над факелом.

ния вследствие увеличения поперечного сечения петли.

2. Увеличением амплитуды поперечных колебаний петли, описанных, например в [Nakariakov et al., 1999], а значит, увеличением вклада поперечных колебаний по сравнению с вкладом продольных волн. Кроме того, мощность колебаний в петлях в ближайшей окрестности пятна выше мощности колебаний над факелом в среднем в 2–4 раза.

Спектры мощности колебаний в точках, расположенных близко на одной петле (на расстоянии 3–5 угл. сек), очень схожи. Эта схожесть обусловлена именно расположением на петле, поскольку спектры в точках, расположенных вне петли на таком же расстоянии друг от друга, не имеют подобного сходства. Таким образом, можно сделать вывод о том, что колебания, наблюдающиеся в петлях, – проявление волн, распространяющихся вдоль них. Следуя доводам [De Moortel et al., 2000], мы интерпретируем эти волны как медленные магнитоакустические волны.

Фильтруя сигналы в близлежащих точках петли в узком диапазоне и сравнивая полученные колебания, можно определять скорость распространения волн вдоль петель. Но на практике такое сравнение зачастую дает неоднозначные результаты: несмотря на сходство спектров, волновые цуги могут плохо соответствовать друг другу, а временной сдвиг между сигналами может меняться на протяжении серии.

Скорость распространения волн мы определяли в тех же петлях, которые использовали при анализе спектров. В точках, приближенных к пятну, преимущественно наблюдается распространение по направлению от пятна со скоростью 80 ± 95 км/с. Над факелами наблюдается примерно равное число случаев распространения от факела и к факелу, при этом средняя скорость распространения меньше – 20 ± 80 км/с.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Колебания в основаниях корональных петель над факелом и над пятном отличаются друг от друга: над факелом основные пики расположены в диапазоне 0.5...1 МГц, тогда как над пятном максимум мощности находится в более широком диапазоне 0.5...2 МГц. Авторы работы [De Moortel et al., 2000] делают вывод о том, что колебания в корональных петлях движимы источником, расположенным под основанием петель.

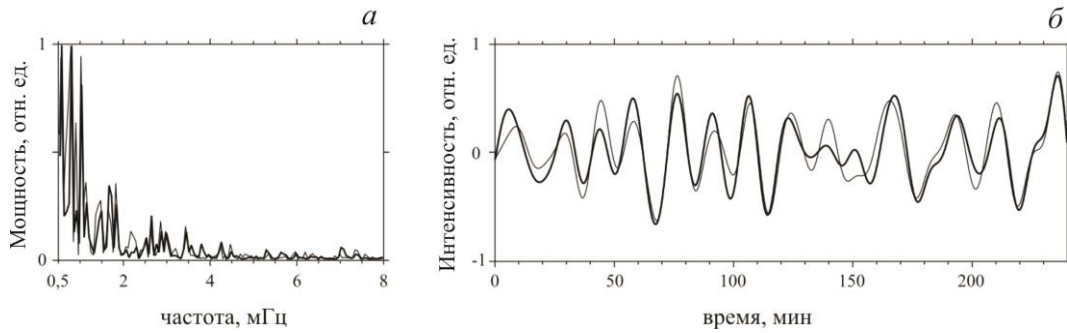


Рис. 5. Спектры вариаций интенсивности линии 171 Å в двух точках, расположенных на одной магнитной петле на расстоянии 3 угл. сек друг от друга (а); вариации интенсивности в этих точках, фильтрованные в полосе 0.5...1.5 МГц (б).

В таком случае, учитывая отличия спектров колебаний лучевых скоростей хромосферы пятен и факелов, можно утверждать, что указанные выше различия в короне порождены условиями в нижних слоях атмосферы.

В центральной части петли усиливаются колебания 0.5...1 МГц, вероятно, вследствие уменьшения вклада в сигнал от петли при удалении от ее оснований.

Определение скорости волн по сигналам, фильтрованным в узкой полосе частот, затруднительно; фазовая задержка между сигналами меняется на протяжении петель от точки к точке и непостоянна во времени, несмотря на высокие коэффициенты корреляции между сигналами и схожесть волновых цугов. Средние скорости волн в плоскости диска

составляют 80 ± 95 км/с и 20 ± 80 км/с для пятен и для факелов соответственно, что близко к значению скорости звука в короне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- De Moortel I., Ireland J., Walsh R.W. Observation of oscillations in coronal loops // *Astronomy & Astrophysics*. 2000. V. 355. P. L23–L26.
- Nakariakov V.M., Ofman L., DeLuca E.E., et al. TRACE Observations of Damped Coronal Loop Oscillations: Implications for Coronal Heating // *Science*. 1999. V. 285, N 5429. P. 862–864.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия