

УДК 523.983

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ КОЛЕБАНИЙ В СОЛНЕЧНЫХ ФАКЕЛАХ В ЛИНИИ $H\alpha$ 6563

В.А. Пуляев, Н.И. Кобанов, С.А. Чупин, А.С. Кустов

INVESTIGATION OF TRAVELING OSCILLATIONS IN SOLAR FACULAE IN $H\alpha$ 6563 LINE

V.A. Pulyaev, N.I. Kobanov, S.A. Chupin, A.S. Kustov

Мы исследовали поведение лучевой скорости в паре спектральных линий $H\alpha$ 6563 Å и FeI 6569 Å в факельных областях. Целью исследования было выявление распространяющихся вверх колебаний. Были выявлены случаи распространения колебаний пятиминутного диапазона как из фотосферы в хромосферу, так и наоборот в различных частях одного факела. На этом основании мы можем сделать вывод, что часть энергии может возвращаться в фотосферу. Обнаружено, что спектральный состав колебаний различается для разных частей факела. Мы отмечаем также, что роль более низкочастотных колебаний (0.5–2 мГц) в передаче энергии из нижних слоев солнечной атмосферы в верхние может быть более значительна, чем принято считать.

We investigated behavior of the line-of-sight velocity in a pair of spectral lines $H\alpha$ 6563 Å & FeI 6569 Å in faculae regions. The purpose of the investigation was to identify upward propagating oscillations. We observed both upwards and downwards traveling waves with five-minute period in different parts of faculae. On this basis it is possible to conclude that part of the energy returns to the photosphere. We found, that power spectra of LOS-velocity are different for various parts of faculae region. Also we noted the role of low-frequency oscillations (0.5–2 mHz) in the upward energy transport could be more significant.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется процессам переноса энергии между слоями солнечной атмосферы. Считается, что основную роль в этом процессе играют волны, распространяющиеся из факельных областей. Факелы часто и широко наблюдаются на солнечной поверхности как в активных широтах, так и в полярных областях [De Pontieu et al., 2005; Centeno et al., 2006]. В основном пятиминутные колебания короны регистрируются над факельными областями и хромосферной сеткой [Centeno et al., 2009], в то время как трехминутные корональные колебания связаны с солнечными пятнами [Doyle et al., 2003]. К тому же факелы являются едва ли не единственными объектами на Солнце, пятиминутные колебания в которых доминируют как в фотосфере, так и в хромосфере.

Инструмент, метод

Все наблюдения выполнялись на горизонтальном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории. Практическое разрешение телескопа составляет 1–2 угл. сек. Комплект поляризационной оптики позволяет наряду с измерениями лучевой скорости осуществлять безмодуляционные измерения продольной напряженности магнитного поля в широком спектральном диапазоне. Размеры измеряемой области на Солнце ограничены размером щели и фотоматрицы и составляют 1×63 угл. сек. Серии снимались в автоматическом режиме, каждая экспозиция начиналась по сигналу таймера с интервалом в различных сериях от 0.5 до 10 с.

Местоположение факельных площадок определялось по изображению и по текущим снимкам с космических аппаратов. Для более точной привязки к тонкоструктурным факельным элементам использовались яркие участки непрерывного спектра на рабочих спектрограммах. Наблюдения мы проводили в спектральных линиях $H\alpha$ 6563 Å и FeI 6569 Å, образующихся на разных уровнях солнечной атмосферы [Kobanov, Pulyaev, 2007].

Для получения лучевой скорости из спектрограмм мы использовали метод определения положения центра масс крыльев линии на определенном расстоянии от ее центра. Для линии $H\alpha$ это расстояние составляло ± 0.15 Å, для линий фотосферы – ± 0.03 Å. Сдвиг центра масс соответствует значению лучевой скорости с определенным численным коэффициентом.

Результаты

Мы проанализировали 32 временных серии в 32 факельных областях, из них десять вблизи центра диска. Средняя длительность серий составляла около одного часа. Период экспозиции варьировал от половины секунды до десяти секунд.

Считается, что совпадение спектров колебаний лучевой скорости в фотосфере и хромосфере может рассматриваться как свидетельство распространения волн из одного слоя в другой. Тем не менее мы обнаруживаем различие этих спектров гораздо чаще, чем сходство (рис. 1). А так как измерения проводи-

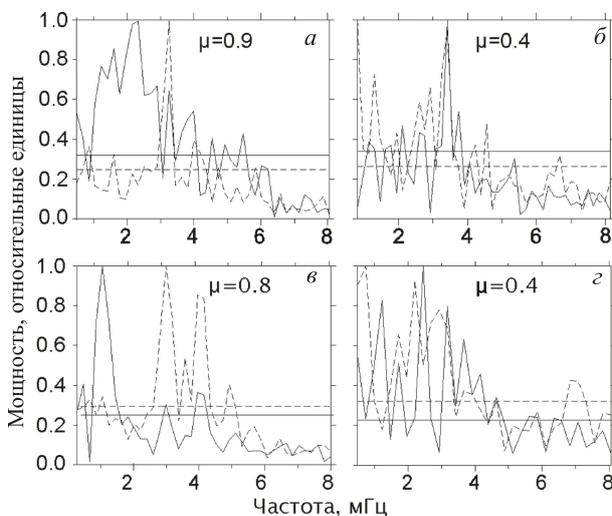


Рис. 1. Спектры мощности лучевой скорости. Сплошная линия – $H\alpha$ 6563 Å, штриховая – FeI 6569 Å (а, б, в). Сплошная линия – CaII 8542 Å, штриховая – FeI 8538 Å (г).

лись по всему диску – и вблизи лимба ($\mu=0.4$), и в центре ($\mu=0.8-0.95$), – мы считаем, что эффект проекции, когда при съемке около лимба в апертуру спектральной щели попадают разнесенные по длине участки, не влияет на эти различия. В большинстве случаев в фотосфере мощность колебаний с частотой 1–3 мГц невысока, в то время как для хромосферы характерны значительные максимумы в области частот <3 мГц. Однако даже в том случае, когда одни и те же частоты присутствуют в усредненных по пространству спектрах, на полутоновых диаграммах видны значительные различия в локализации мощности этих колебаний (рис. 2).

Мы применили частотную фильтрацию, чтобы составить полутоновые пространственно-временные диаграммы доплеровской скорости для разных частотных мод. Эти карты отображают динамику лучевой скорости вдоль отрезка, определенного положением изображения Солнца на щели спектрографа. В нескольких случаях на таких картах нам удалось увидеть четкую шевронную структуру. В представленном изображении можно увидеть подобные структуры лучевой скорости, измеренной в линии $\text{H}\alpha$, что является четким свидетельством распространяющихся колебаний на уровне хромосферы (рис. 3).

Ось шевронной структуры совпадает с локальным максимумом продольного магнитного поля в фотосфере. Мы считаем возможным, что в этой точке магнитное поле выходит из фотосферы и направ-

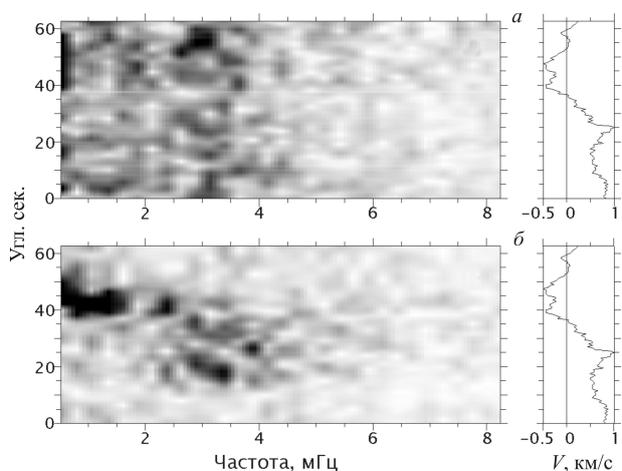


Рис. 2. Спектры мощности лучевой скорости: фотосфера, $\text{FeI } 6569 \text{ \AA}$ (а); хромосфера, $\text{H}\alpha 6563 \text{ \AA}$ (б). Более темные участки соответствуют большей мощности. Справа графики усредненной по времени лучевой скорости.

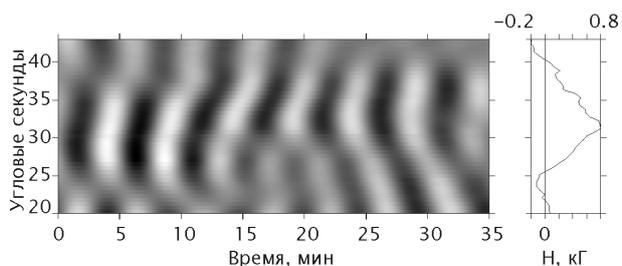


Рис. 3. Распространяющиеся волны в хромосфере факела. Темные участки соответствуют направлению лучевой скорости от наблюдателя, светлые – к наблюдателю. Справа – напряженность магнитного поля вдоль щели спектрографа, усредненная по времени.

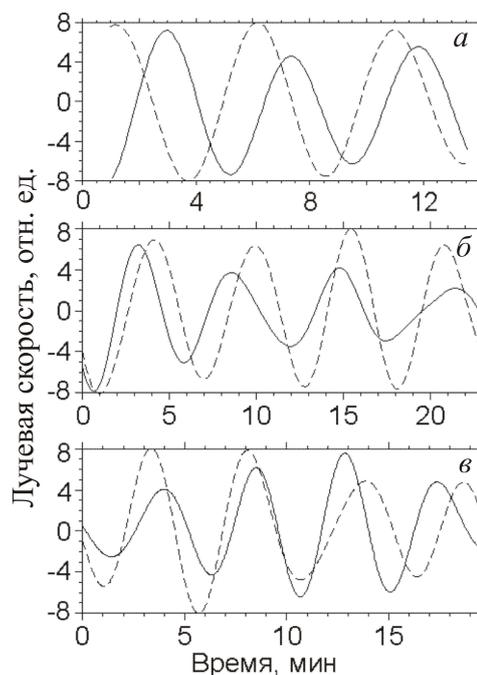


Рис. 4. Лучевая скорость для трех различных точек факела. Сплошная линия – хромосфера, штриховая – фотосфера. Фотосферный сигнал дополнительно усилен в 2.7 раза по сравнению с хромосферным.

лено вертикально. Горизонтальная фазовая скорость распространения волны равна 50–70 км/с. Четкой фазовой зависимости между фотосферными и хромосферными колебаниями лучевой скорости в данном случае мы не обнаружили.

Несмотря на то, что в работах других авторов описываются однозначные фазовые связи между колебаниями лучевой скорости в фотосфере и хромосфере [Centeno et al., 2006; 2009; Khomenko et al., 2008], результаты наших исследований не позволяют сделать подобный вывод. В приведенном примере на рис. 4, а, б колебания на разных уровнях высот имеют как положительную, так и отрицательную фазовую задержку в различных частях факела, что, возможно, указывает на различное направление распространения волн. В некоторых случаях задержка неоднозначная даже в одной точке (рис. 4, в).

Выводы

Подобие спектрального состава колебаний лучевой скорости в фотосфере и хромосфере факелов, рассматриваемое как прямое доказательство связи между этими слоями, наблюдается относительно редко. Кроме того, даже в случае схожести средних спектров пространственно-временная локализация мощности анализируемых мод не совпадает.

Из измерений фазовой разности фотосфера–хромосфера по сигналам колебаний лучевой скорости следует, что в факелах есть как участки, где колебания распространяются снизу вверх, так и участки с распространением колебаний сверху вниз (из хромосферы в фотосферу). Следовательно, можно заключить, что часть энергии, переносимой волнами в хромосферу и выше, возвращается обратно в фотосферу факелов. Таким образом, рассмотренные во введении возможности факелов по транспортировке

энергии в верхние слои солнечной атмосферы не реализуются полностью. В будущем для получения количественных оценок спектральные наблюдения должны сопровождаться фильтраемыми, в идеале с привлечением спутниковых изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Oscillations and wave propagation in different solar magnetic features // *Solar Polarization 4* /Eds. R. Casini and B. W. Lites. 2006. P. 465–471. (ASP Conference Ser. V. 358).

Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Wave propagation and shock formation in different magnetic structures // *Astrophys. J.* 2009. V. 692. P. 1211–1221.

De Pontieu B., Erdelyi R., De Moortel I. How to channel photospheric oscillations into the corona // *Ibid.* 2005. V. 624. P. L81–L84.

Doyle J.G., Dzifcakova E., Madjarska M.S. Coronal oscillations above sunspots? // *Solar Phys.* 2003. V. 218. P. 79–85.

Khomenko E., Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Channeling 5 minute photospheric oscillations into the solar outer atmosphere through small-scale vertical magnetic flux tubes // *Astrophys. J.* 2008. V. 676. P. L85–L88.

Kobanov N.I., Pulyaev V.A. Photospheric and chromospheric oscillations in solar faculae // *Solar Phys.* 2007. V. 246, Iss. 1. P. 273–279.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск