

УДК 523.983

**ПРОБЛЕМА ФАЗОВЫХ СВЯЗЕЙ КОЛЕБАНИЙ ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ
В СОЛНЕЧНЫХ ФАКЕЛАХ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ В ЛИНИЯХ Si 10827 И He 10830**

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

**THE PROBLEM OF PHASE RELATIONS OF FLUCTUATIONS IN LINE-OF-SIGHT VELOCITY
IN SOLAR FACULAE OBSERVED IN Si 10827 AND He 10830 LINES**

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

Распространяющиеся волны в факелах могут быть одним из возможных путей транспортировки энергии. В данной работе мы пытаемся выявить связь 5-минутных колебаний в фотосфере и хромосфере. Анализ проводился на основе спектральных данных, полученных с помощью горизонтального солнечного телескопа Саянской солнечной обсерватории. Посчитаны средние задержки между фотосферными и хромосферными цугами колебаний для нескольких наблюдательных временных серий. Некоторые задержки показали распространение колебаний из хромосферы в фотосферу.

One of possible ways to transport energy is waves propagating in faculae. In this paper, we try to establish the relation between 5-min oscillations in the photosphere and chromosphere. The spectral data analyzed here were obtained using the horizontal solar telescope at the Sayan Solar Observatory. Average time lags of the chromospheric oscillation trains relative to the photospheric ones were calculated for several observational time series. Some lags have shown the propagating of oscillations from the chromosphere into the photosphere.

Введение

Солнечные факелы часто наблюдаются в солнечной атмосфере. Они, предположительно, играют значительную роль в процессах обмена энергией между слоями солнечной атмосферы. В последнее время факелы все чаще рассматриваются как канал, через который 5-минутные колебания из фотосферы могут проникать в верхние слои солнечной атмосферы [De Pontieu et al., 2005; Khomenko et al., 2008]. Одним из важнейших параметров этих процессов является скорость распространения волн, а для этого надо знать временную задержку между возмущениями на разных высотах солнечной атмосферы.

Авторы статьи [Centeno et al., 2009] приводят анализ результатов наблюдений факела, проводившихся в линиях Si I 10827 Å (фотосфера) и He I 10830 Å (хромосфера). Посчитанная ими задержка между хромосферными и фотосферными 5-минутными колебаниями лучевой скорости составила 300–400 с. При разности высот образования спектральных линий 1500 км скорость распространения волн получается равной 4–5 км/с. Целью нашей работы является подсчет временной задержки между возмущениями для тех же спектральных линий на основе нескольких временных серий, полученных для разных факелов.

Наблюдения

На горизонтальном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории летом 2010 г. были проведены серии спектрографических наблюдений факелов в тех же спектральных линиях (Si I и He I), в которых наблюдали факел авторы статьи [Centeno et al., 2009].

Для съемки солнечных спектров использовалась ПЗС-камера (256×1024 пикселей) фирмы «Princeton Instrument». По пространственной координате один пиксель соответствовал 0.24", вдоль дисперсии спектрографа на пиксель приходилось около 20 мÅ. Поскольку реальное разрешение телескопа зачастую не лучше 1", для уменьшения избыточной информации при наблюдениях использовалось бинирование вдоль щели по четыре пикселя. Для обработки материала применялись собственные оригинальные про-

граммы, созданные на основе среды IDL.

Наш оптический телескоп не позволяет увидеть факелы в центре диска, потому что контраст спокойной области и факела очень мал, в отличие от наблюдений на краю диска Солнца. Поэтому для грубого наведения телескопа использовались спутниковые наблюдения в УФ [http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/] или наземные наблюдения в линии CaII [http://bass2000.obspm.fr/home.php]. Особенность линии HeI 10830 Å – более сильное поглощение в области факела, чем в спокойной области, использовалась для более точного наведения (рис. 1). Было получено 33 временных серии для 24 факелов. Для всестороннего анализа были выбраны девять серий для девяти разных факелов, располагавшихся ближе к центру диска. При отборе учитывалось качество изображения при наблюдениях.

Результаты анализа

Из анализа фурье-спектров мощности колебаний лучевой скорости довольно очевидно, что 5-минутные колебания свойственны факельным областям как на фотосферном уровне, так и на хромосферном (рис. 2).

Для диагностики задержки хромосферного сигнала лучевой скорости относительно фотосферного сигнала использовались фазовые спектры (рис. 3).

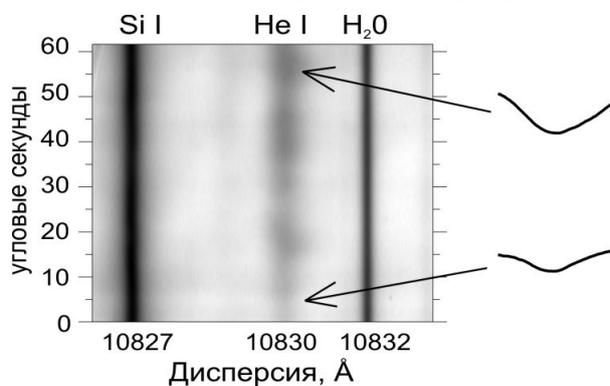


Рис. 1. Спектр факела и спокойной области (взят один из кадров временной серии). Справа показаны интенсивности линии гелия в области факела (верх) и в спокойной области (низ).

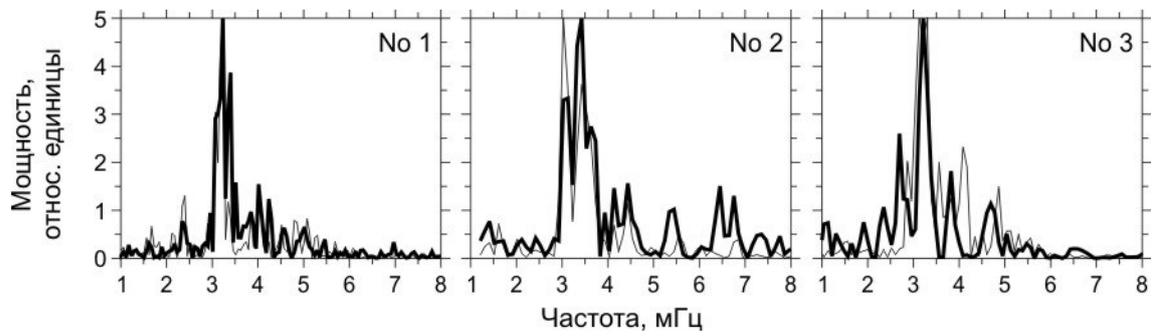


Рис. 2. Спектры мощности лучевой скорости, регистрируемой в фотосфере (тонкая линия) и в хромосфере (толстая линия) в элементе факела размером 1".

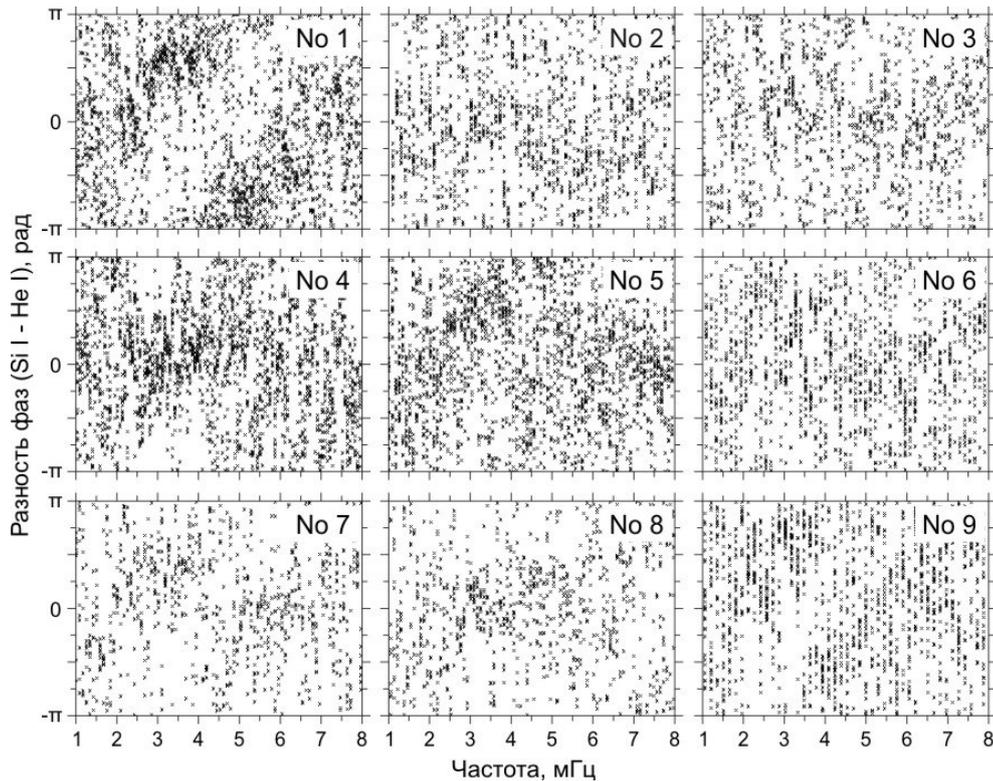


Рис. 3. Фазовые спектры. Каждая точка на графиках соответствует разности фаз колебаний фотосферной и хромосферной скорости для факельного элемента размером 1".

Графики № 1 и № 9 демонстрируют линейное распространение волн в области 5-минутных колебаний. По наибольшей концентрации точек можно подсчитать разность фаз на исследуемой частоте (что даст временную задержку хромосферного сигнала относительно фотосферного). Однако видно, что только некоторые графики дают такую возможность.

Для более точного подсчета задержки необходимо анализировать уже сами графики лучевых скоростей. На рис. 4 приведены несмещенные по времени сигналы лучевой скорости, отфильтрованной вейвлет-методом, для интервала частот приблизительно 2.5–4.5 мГц (5-минутные колебания). Цуговая структура лучевых скоростей исключает возможность ошибки на период или больше.

Результаты наших исследований обобщены в таблице. В последней колонке приведен разброс значений задержки для каждого факела. В одном из факелов наблюдалась даже отрицательная задержка, свидетельствующая о распространении волн из хромосферы в фотосферу.

Заключение

После тщательной обработки девяти временных серий для девяти разных факелов мы обнаружили, что временная задержка хромосферного сигнала относительно фотосферного может варьировать от -12 до $+100$ с для разных факелов, в то время как авторы статьи [Centeno et al., 2009] получили для единственного исследованного факела задержку 300–400 с.

Мы предполагаем несколько объяснений наблюдаемой нами маленькой задержки:

- 1) сближение уровней формирования исследуемых спектральных линий в факелах;
- 2) одновременное присутствие стоячих и бегущих волн;
- 3) физические условия в факелах таковы, что скорость распространения 5-минутных колебаний возрастает в несколько раз по сравнению с общепринятым значением 4–6 км/с.

Однако зачастую при сходстве фотосферных и хромосферных спектров мощности мы наблюдаем

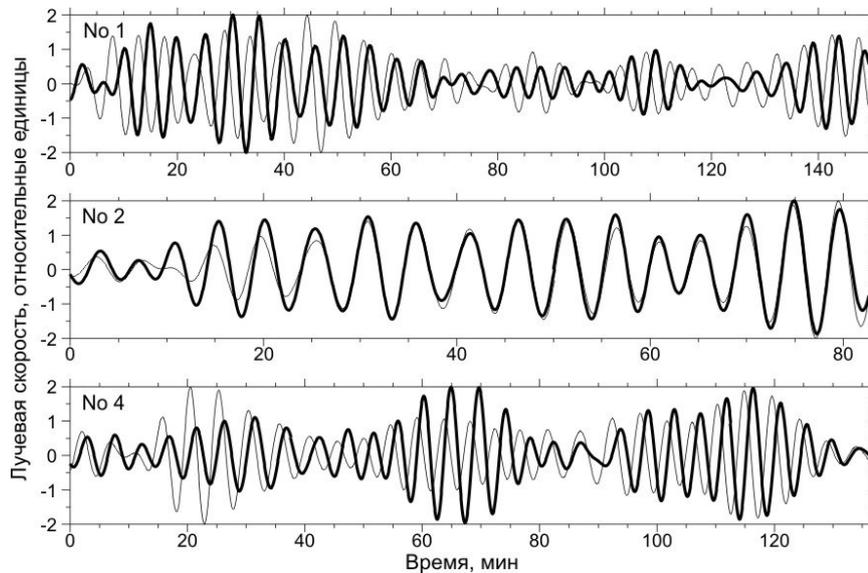


Рис. 4. Отфильтрованные вейвлетом лучевые скорости в фотосфере (тонкая линия) и в хромосфере (толстая линия). Каждая кривая соответствует факельному элементу размером 1".

Данные наблюдений и измеренная временная задержка

Дата	UT	Координаты	Каденция, с	Длительность, мин	Задержка, с
17.07.2010	01:40	19° N, 28° W	3	150	78–100
04.08.2010	09:48	15° N, 05° W	4	81	–12–0
05.08.2010	00:28	20° N, 14° W	3.5	96	20–40
09.08.2010	00:45	17° N, 23° E	3	136	40–80
09.08.2010	06:10	18° N, 22° E	4	98	10–50
09.08.2010	09:49	15° N, 12° E	3	68	68–77
14.08.2010	07:29	13° N, 05° W	3	198	30–90
15.08.2010	04:24	24° N, 18° E	3	102	33–39
16.08.2010	01:58	32° N, 00° E	3	55	68–78

не совсем отчетливую картину в спектрах разности фаз, а в графиках лучевых скоростей не видно явного схождения. Возможными причинами этого могут быть как нелинейное распространение 5-минутных колебаний лучевой скорости из фотосферы в хромосферу, так и недостатки одномерных наблюдений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (10–02–00153-а) и гранта Министерства образования и науки РФ (государственный контракт 02.740.11.0576).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Wave propagation and shock formation in different magnetic structures // *Astrophys. J.* 2009. V. 692. P. 1211–1220.

De Pontieu B., Erdelyi R., De Moortel I. How to channel photospheric oscillations into the corona // *Astrophys. J. Lett.* 2005. V. 624. P. 61–64.

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 // *Ibid.* 2008. V. 676. P. 85–88.

<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data>.

<http://bass2000.obspm.fr/home.php>.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск