

DOI: 10.54503/0571-7132-2025.68.1-77

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКИХ СКОРОСТЕЙ И ПОЛУШИРИН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В СОЛНЕЧНЫХ СПИКУЛАХ И ПРОТУБЕРАНЦАХ

М.СИХАРУЛИДЗЕ², Д.ХУЦИШВИЛИ², Е.ХУЦИШВИЛИ¹,
В.КАХИАНИ¹, Т.ЦИНАМДЗГВРИШВИЛИ³

Поступила 27 июля 2024

Принята к печати 14 февраля 2025

Цель исследования - изучение нестационарных физических процессов, происходящих в солнечных спикулах и протуберанцах, и взаимосвязь между ними. Изучение спикул и протуберанцев и сравнение полученных результатов друг с другом внесет некоторую новизну в происходящих в них физических процессах. В связи с этим в Абастуманской астрофизической обсерватории с помощью большого внезатменного коронографа были получены спектрограммы в линии гелия D_3 для высоты 8000 км. Спектрограммы в линии D_3 получены во втором порядке, где обратная дисперсия равна $0.96 \text{ \AA}/\text{мм}$. Стандартные ошибки доплеровских скоростей и полуширин спектральной линии составляют 0.35 км/с и 0.04 \AA , соответственно. Время жизни почти всех измеренных спикул составило около 20 мин, поэтому они относятся к спикулам I типа. Изучены доплеровские смещения и изменения полуширин со временем, используя алгоритм периодограммы Ломба для неравномерно распределенных рядов данных. В результате обработки и анализа полученного наблюдательного материала были получены следующие основные результаты: доплеровские скорости в "ногах" протуберанцев изменяются примерно в диапазоне $17\text{-}18 \text{ км/с}$, а в спикулах - в диапазоне $16\text{-}24 \text{ км/с}$. Наблюдается асимметрия изменения доплеровских скоростей и полуширин во времени. Из 5-ти исследованных нами спикул асимметрия изменения во времени наблюдается у 4-х спикул. Для D_3 -протуберанцев период колебаний доплеровских скоростей изменяется в среднем в течение 3-4 мин, а период колебаний полуширин - в течение 2-3 мин, а в D_3 -спикулах период колебаний доплеровских скоростей изменяется в среднем в течение 2-5 мин, а период колебаний полуширин - в течение 2-5 мин. В "ногах" протуберанца антикорреляция между доплеровскими скоростями и полуширинами более выражена в "ноге", где солнечная плазма движется из нижних слоев в верхние. Наблюдаемые противофазные колебания с большими периодами можно объяснить движениями турбулентной плазмы вверх и вниз в спикулах I типа, а колебания с более короткими периодами могут быть вызваны винтовым движением оси спикулы, образующимся в результате суперпозиции двух линейно поляризованных магнитогидродинамических кинк-волн.

Ключевые слова: *спикулы; протуберанцы; спектральные линии*

1. *Введение.* Энергия в фотосфере в некоторой степени передается в верхние слои атмосферы Солнца, где она может рассеиваться, что приводит к нагреву плазмы короны. Сценарием передачи энергии могут быть магнитогидродинамические (МНД) волны, возбуждаемые конвективными

движениями и глобальными солнечными колебаниями в фотосфере, которые могут распространяться через хромосферу в корону и передавать некоторую энергию. Спикулы и протуберанцы - одни из основных элементов тонкой структуры верхней атмосферы Солнца. Это магнитные образования [1-3]. В верхних слоях атмосферы Солнца магнитные трубки являются основными каналами передачи энергии, которые, в свою очередь, влияют на солнечное излучение. В этом направлении решающее значение для нагрева внешней атмосферы имеет магнитное поле.

Спикулы классического типа I имеют время жизни 5-15 мин, а диаметр и доплеровские скорости составляют примерно 500 км и 15-40 км/с, соответственно [4-8]. Спикулы в линиях CaIIH и D₃ шире, чем в H α [9]. По наземным наблюдениям длина/ширина спикул H α варьируется в среднем от 5000 до 9000 км [9] и могут достигать высот в 11000 км. С другой стороны, на более низких высотах доминируют спикулы II типа. Они самые высокие в корональных дырах (5000 км) и короче в активных областях [3]. Есть очень длинные спикулы, называемые макроспикулами, которые наблюдаются главным образом вблизи полярных областей. В спикулах I типа температура плазмы варьируется в пределах 6000-60000 К [10]. Полуширина D₃ спикул порядка $\Delta\lambda = 0.3\text{\AA}$ [11].

Известно, что в спикулах распределение доплеровских скоростей по высоте имеет периодический характер. Колебания длительностью примерно 3-7 мин (пик 5 мин) обнаружены как в ходе наземных, так и внеатмосферных наблюдений [10,12-17]. Это периодическое распределение может быть вызвано поперечными волнами. Исследователи [13,16,18-27] изучили периоды и амплитуды изменений доплеровских скоростей спикул, построены теоретические модели спикул [28,29]. В работе [30] была обнаружена асимметрия изменений во времени для доплеровских скоростей и полуширин спикул.

Колебания в спикулах наблюдаются уже давно. Возможность колебаний в магнитной трубке спикул описана в работах [31-34]. Периоды колебаний формально можно разделить на две группы: относительно короткие периоды (<2 мин) и длительные периоды (>2 мин). Наблюдаемые периоды в основном располагаются в интервалах 3-7 мин и 50-110 с [35]. В работе [36] упоминаются четыре интервала возможных периодов колебаний спикул 358-167 с, 156-114 с, 108-81 с и 76-50 с. В работе [1,17,37] исследованы колебания с периодом 5 мин. Беккерс [4,9] и Стерлинг [38] предоставили превосходные для того времени обзоры наблюдений и теоретических моделей спикул.

В работах [26,27] авторы отмечают, что в магнитной трубке спикулы распространяются кинк-волны с длиной волны около 3400-4400 км, а периоды варьируют в пределах 40-50 с. Предполагается, что кинк-волны генерируются при столкновении грануляционных образований на конце опущенной в

фотосфере магнитной трубки. Авторы высказали мнение, что длина кинк-волн порядка диаметра гранул. Там же приведена модель спикеры, где отмечено, что она представляет собой длинную магнитную трубку, один конец которой опущен в фотосферу, а другой достигает короны. Эта модель близка к реальной модели, на ее основе можно говорить о механизме нагрева короны [39].

Космические наблюдения высокого разрешения с помощью оптического телескопа (например, Hinode/SOT) выявили спикеры II типа, которые, как было показано, имеют разные характер и механизмы формирования, различные времена жизни, скорости и многое другое [2,5,6,40-46]. Они имеют время жизни около 10-150 с, диаметр около 200 км и достигают относительно высоких скоростей 50-150 км/с. Авторы [46] утверждают, что быстрый нагрев спикер II типа до высоких температур может привести к их исчезновению. По мнению исследователей [1-3], спикеры I типа обладают еще одним свойством: они демонстрируют меньшие скорости и исчезают в короне или падают вниз.

Протуберанец представляет собой частично ионизированную, относительно холодную ($\sim 10^4$ К) и конденсированную ($\sim 10^9 - 10^{11}$ см⁻³) плазму, присутствующую в ионизированной горячей ($(1-2) \cdot 10^6$ К) короне [47-52]. Протуберанцы окружены относительно горячей корональной плазмой, "ноги" которых спускаются через хромосферу в фотосферу [53]. Наблюдения показали, что средняя скорость на периферии протуберанца менее 15 км/с, а скорость в его центре равна 10 км/с. Скорость восходящего потока около 25 км/с, нисходящего потока - 10 км/с. Исследователи объяснили это низкой температурой в центре протуберанца (менее $6 \cdot 10^3$ К). Эмиссионные линии протуберанцев наблюдаются в широком спектральном диапазоне от видимого до инфракрасного [54-60], поэтому обработка и анализ спектрального наблюдательного материала может дать нам много интересной информации о них.

Наличие колебаний в протуберанцах и их свойства изучались многими исследователями [61-64]. В протуберанцах наблюдаются движения плазмы в разных направлениях, а также иногда наблюдаются движения, параллельные поверхности Солнца. На основе анализа данных временного изменения доплеровских скоростей были обнаружены колебания с длинным периодом ($T > 40$ мин), промежуточным ($10 \text{ мин} < T < 40 \text{ мин}$) и коротким периодом ($T < 10 \text{ мин}$). Хотя, иногда фиксируются колебания, например, и с периодом порядка 30 с [65] и сверхдлиннопериодические колебания с периодом 8 ч. [66]. Исследователи [67] обнаружили период распространения волны в протуберанце в интервале 28-95 мин. Авторы [68] связывают колебания в "ногах" протуберанца с глобальными колебаниями в фотосфере и хромосфере (3 и 5 мин). Авторы [69-71] исследовали физические процессы, происходящие в смерчах.

Периодичность можно объяснить либо утечкой фотосферных p -мод через наклонное магнитное поле [1], либо квазипериодическими отраженными ударными волнами [28,29], которые приводят к периодическим восходящим потокам хромосферной плазмы [72]. Колебания и волны в солнечных спикулах также рассмотрены в [35].

Что касается связи между доплеровскими скоростями и полуширинами линий, то они изучены мало. Важно выявить связь динамики тонкой структуры Солнца с физическими процессами, происходящими в нижних и верхних слоях солнечной атмосферы (например в спикулах и протуберанцах).

Наша цель: исследование нестационарных физических процессов, происходящих в солнечных протуберанцах и спикулах, и выявление взаимосвязи между ними на основе анализа материала, полученного при наблюдениях в линии гелия D_3 (мы планируем провести аналогичную работу в линии водорода $H\alpha$). Такие исследования могут позволить нам связать физические процессы, происходящие в спикулах и протуберанцах. Возможно удастся найти связь между спикулами и волнами, распространяющимися в протуберанцах. В статье анализируются результаты, полученные на внеатменном 53 см коронографе национальной астрофизической обсерватории Грузии им. Е.Харадзе.

В разделе 1 представлен краткий обзор исследований спикул и протуберанцев. В разделе 2 описаны методы наблюдения и обработка данных. В разделе 3 обсуждаются результаты наблюдений, таких как доплеровские скорости и полуширины спектральных линий (FWHM). В разделе 4, представлены обсуждение и выводы.

2. Наблюдения и обработка данных. Наблюдения солнечных спикул и протуберанцев в спектральных линиях гелия D_3 проводились с помощью большого внеатменного коронографа Абастуманской астрофизической обсерватории (D-53 см, F-800 см) на одной и той же высоте солнечной атмосферы в течение длительного периода время (рис.1).

Спектрограф системы Эберта-Фасти телескопа оснащен дифракционной решеткой размером 230мм×250мм. Решетка имеет 600штрих/мм и в видимой области имеет максимальную концентрацию во 2-м порядке. Разрешающая способность в фокальной плоскости спектрографа составляет 25 линий на миллиметр. Разрешение спектрографа во 2-м порядке составляет 0.04 Å /мм. Диаметр изображения в фокальной плоскости составляет 125мм. Эквивалентное фокусное расстояние в фокусе Куде составляет 13 м. Спектрограф имеет круглую, концентрическую с солнечным лимбом щель диаметром, немного превышающим диаметр лимба и размером примерно до 60° дуги лимба Солнца, в то время как рабочая область в CCD U9000 покрывает лишь 20°

дуги лимба. Угловой масштаб спектров в фокальной плоскости спектрографа равен 16 угл./с на мм. Во время наблюдения перед светоприемником размещается специальный комбинированный фильтр, составленный из нескольких светофильтров, изготовленных в обсерватории, который пропускает как линию D_3 для 2-3 порядков спектрографа, так и опорную линию 4410 \AA для 3-4 порядков спектрографа. Комбинированный светофильтр состоит из двух разных светофильтров: (1) узкого D_3 -фильтра, пропускающего только спектральные изображения второго порядка, и блокирующего все остальные порядки, и (2) зеленого светофильтра, пропускающего только опорные спектральные линии третьего порядка от фотосферы, и блокирующие все остальные порядки.

На рис.1 представлены две типичные D_3 -спектрограммы спикул и протуберанцев, полученные 07.2023. Временной интервал между первой и второй спектрограммами составляет примерно 16 мин (2023г., 05:41:30 UT, 2023г., 05:57:20 UT). Время экспозиции составляет примерно 0.3с. Продолжительность наблюдений 20 мин. Наблюдения проводились на высоте 8000 км над краем Солнца. Около 30% кадров были исключены из обработки данных из-за низкого качества изображения. Таким образом, средний интервал между

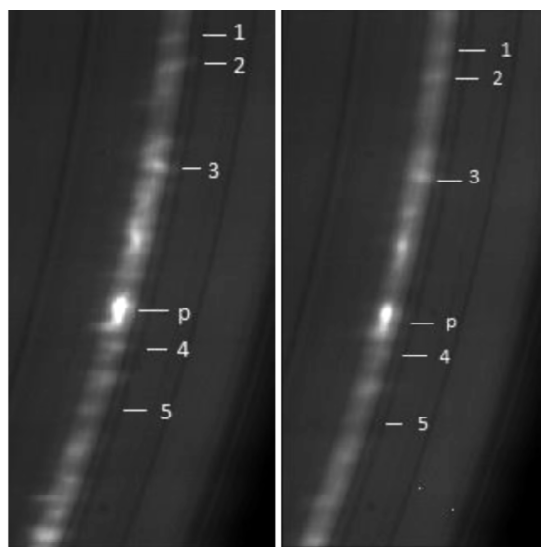


Рис.1. Типичные D_3 -спектральные CCD изображения спикул и протуберанцев, полученные 07.2023. Изображения центрированы на солнечном экваторе и охватывают примерно $\pm 10^\circ$ солнечной широты в вертикальном направлении изображений. Спектральная дисперсия с масштабом около $0.93 \text{ \AA}/\text{мм}$ (уточнение масштаба производится в процессе обработки каждой серии спектрограмм) ориентирована вдоль горизонтальной оси изображения. Спектральные D_3 -изображения спикул и протуберанцев видны вдоль лимба Солнца в вертикальном направлении на высоте 8000 км от фотосферы Солнца. Самые яркие объекты, видимые на изображениях протуберанцы.

кадрами достигает примерно 4.5 с. Серия наблюдений проводилась нами на восточной стороне лимба Солнца в пределах $\pm 10^\circ$ интервала широты от солнечного экватора.

Были выбраны спикулы, которые можно было однозначно идентифицировать на каждой спектрограмме и которые были изолированы от других спикул. В результате были отобраны: 1 протуберанец и 5 спикул, все они изолированы от соседних спикул и надежно идентифицированы на каждой спектрограмме. Из обработанных наблюдательных спектрограмм из-за низкого качества мы исключили почти 30%. Временные ряды распределены неравномерно и авторы использовали алгоритм периодограммы Ломба [73] для изучения периодических изменений доплеровских скоростей и полуширин линий отдельных спикул и протуберанца.

Авторы использовали обновленную версию оригинального программного обеспечения для обработки астрономических изображений AImaP 3.59, разработанную одним из авторов статьи В.Кахиани.

Для определения доплеровского смещения и полуширины линий применялась следующая методика:

1. Для каждой серии спектров проводилась калибровка масштаба на изображении спектров (масштаб может незначительно меняться из-за погрешностей фокусировки для разных серий спектров) при помощи опорных линий спектра: TiI - 5886.791, MnI - 5889.711, FeI - 5891.88.

2. Определялась кривая континуума в районе исследуемой линии спектра посредством интерполяции по областям континуума слева и справа от исследуемой линии полиномом 2 или 3 степени, затем полученная кривая континуума вычиталась из исходного спектра.

3. Методом скользящего среднего из 3 или 5 пикселей (MA3, MA5) определялся максимум исследуемой линии (и соответственно длина волны) и ее полуширина (FWHM). Метод скользящего среднего использовался из-за несимметричности исследуемых линий, поскольку в этом случае фиттинг гауссианой или параболой не дает удовлетворительного результата.

4. Пункты 2 и 3 повторялись для каждого спектра данной серии, после чего строилась кривая изменений доплеровских скоростей и полуширин в зависимости от времени и проводился дальнейший анализ полученных временных рядов.

Для оценки точности измерений доплеровской скорости и FWHM спектральной линии D_3 к полученным временным рядам авторы применили фильтр верхних частот FFT с частотой среза 0.016 Гц и вычислили стандартные отклонения отфильтрованных данных, которые равны следующим значениям: ± 0.35 км/с для доплеровских скоростей и ± 0.04 Å для FWHM.

3. *Анализ данных.* Морфологический анализ амплитуд колебаний доплеровских скоростей и FWHM для спектральных линий спикул и протуберанцев четко показывает наличие квазипериодических изменений во времени. Наблюдаются и "случайные" изменения. График изменения доплеровской скорости (черные линии) и FWHM (черные пунктирные линии) во времени для спикул показан на рис.2 (первое изображение нефильТРованное), а для протуберанца - на рис.3 (первое изображение без фильтра). В результате наблюдений было получено 300 спектрограмм. Из спектрограмм были выбраны и измерены 5 спикул (спикулам условно даны номера 1-5) и один протуберанец (р). Доплеровские скорости в протуберанце измерялись в его центре и симметрично относительно центра в двух местах/слоях с каждой стороны. Расстояние от центра протуберанца до первого слоя составляет примерно 400 км. Расстояние от первого слоя до второго одинаковое - 400 км (расстояние от центра до второго слоя равно 800 км).

В данной работе для спектральных линий был использован метод построения периодограммы Ломба-Скаргла (Lomb-Scargle Periodogram [73]), который удобен для поиска синусоидальных сигналов, так как данный метод использует Фурье-разложения в виде синусоид. Этот метод находит широкое применение в астрофизике, например для определения периодов в кривых доплеровских скоростей. Более того, данный метод применяется для неравномерно распределенных данных по времени (неравномерно сэмплированные, нерегулярные в промежутках времени).

Частоты колебаний доплеровских скоростей для спикул (№ 3), полученные методом периодограммы Ломба [73], приведены на рис.4. Там же приведены уровни доверия в 99% (верхняя горизонтальная линия) и в 95% (нижняя линия). Здесь данные для доплеровских скоростей обрабатывались без фильтрации. Проводились исследования переменности спектральных линий методом анализа временных рядов.

Затем использовался известный метод фильтрации нижних частот БПФ для повышения точности анализа данных доплеровских скоростей в диапазоне 0.005 - 0.015 Гц. Отфильтрованные данные сначала обрабатывались методом периодограмм Ломба и рассчитывались частоты. Мы выбрали частоты, уровень доверия которых превышал 95% (по этому принципу отбирались спикулы для исследования).

Для иллюстрации на рис.5 приведены графики изменений доплеровской скорости (черные линии) и FWHM (черные пунктирные линии) для спикул 1 и 3, а на рис.6 показаны изменения доплеровской скорости (черные линии) и FWHM (черные пунктирные линии) для протуберанца. Как отмечалось ранее [74], и в этом случае доплеровские скорости спикул D_3 колеблются около не нулевых скоростей, что указывает на относительно непериодические

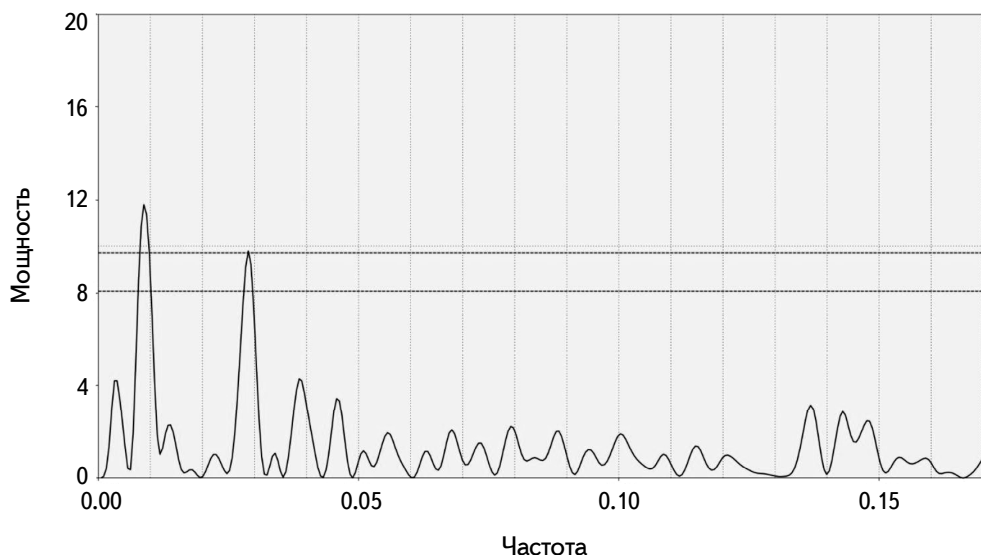


Рис.4. Периодограмма Ломба для доплеровских колебаний скорости спикул (№3).

колебания плазмы в спикулах. Такой тренд доплеровских скоростей может быть вызван общими движениями хромосферной плазмы относительно отклоненных от радиального направления спикул. Для спикул средняя доплеровская скорость колеблется в пределах 16-24 км/с, а полуширина - в пределах 0.6 - 0.9 Å.

Как видно из графика, для обеих спикул наблюдается асимметрия изменений доплеровской скорости и FWHM во времени. Наши результаты показывают, что доплеровская скорость и FWHM претерпевают периодические изменения, а наблюдаемые периоды в основном превышают 2 мин (>125 с). Наиболее часто периоды попадают в интервал от 125 до 225 с. Для изучения физического механизма периодических изменений мы проанализировали фазовые соотношения между доплеровской скоростью и колебаниями FWHM. По этой причине мы отфильтровали данные FFT фильтром нижних частот с разными периодами среза: 60 с, 100 с и 200 с.

Как видно из рис.3, асимметрия изменения доплеровской скорости и полуширины FWHM в центре протуберанца во времени явно не наблюдается, хотя она может существовать. Измеренный нами протуберанец имеет две "ноги". Первая - это "нога" (магнитная трубка), по которой плазма распространяется от короны к нижним слоям Солнца. Второй "ногой" станет, соответственно, магнитная трубка, по которой плазма распространяется в противоположном направлении. Известно, что доплеровская скорость восходящей плазмы выше, чем нисходящей [53].

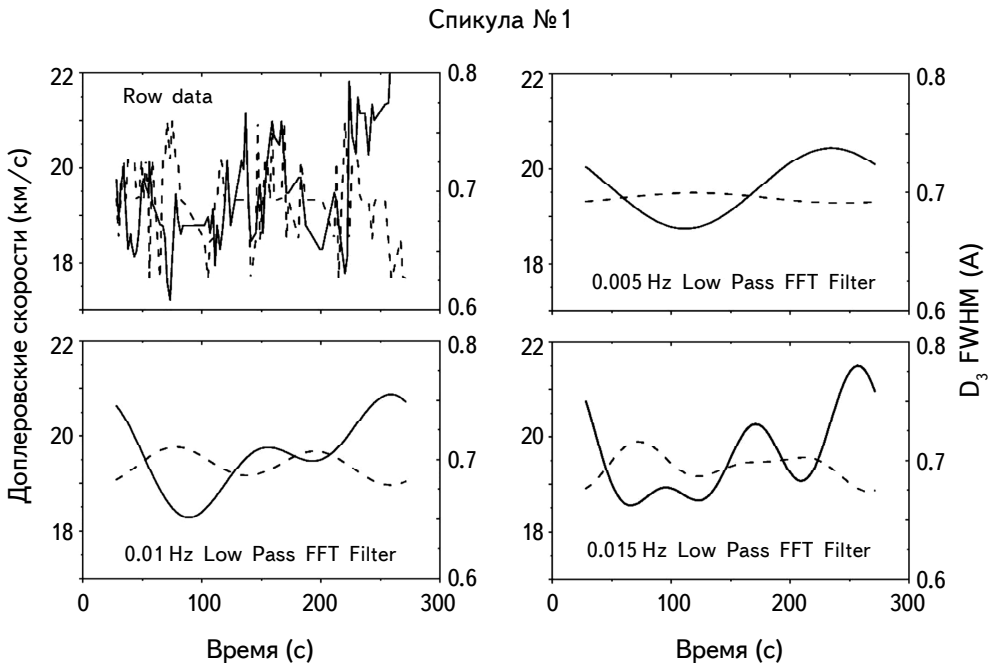
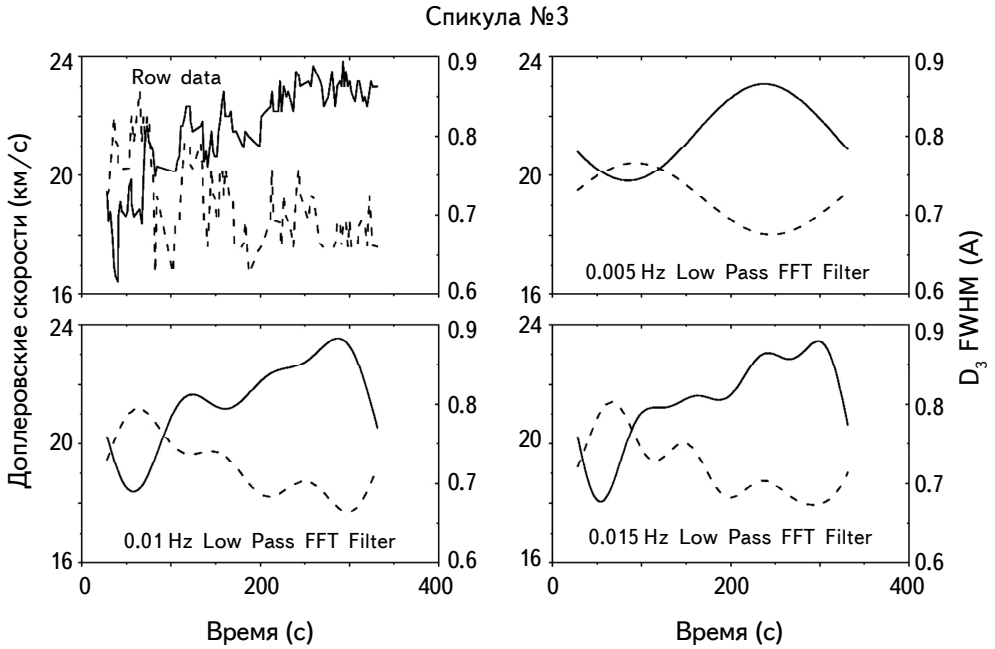


Рис.5. График изменения доплеровской скорости и полуширины FWHM во времени для спикул 1 и 3.

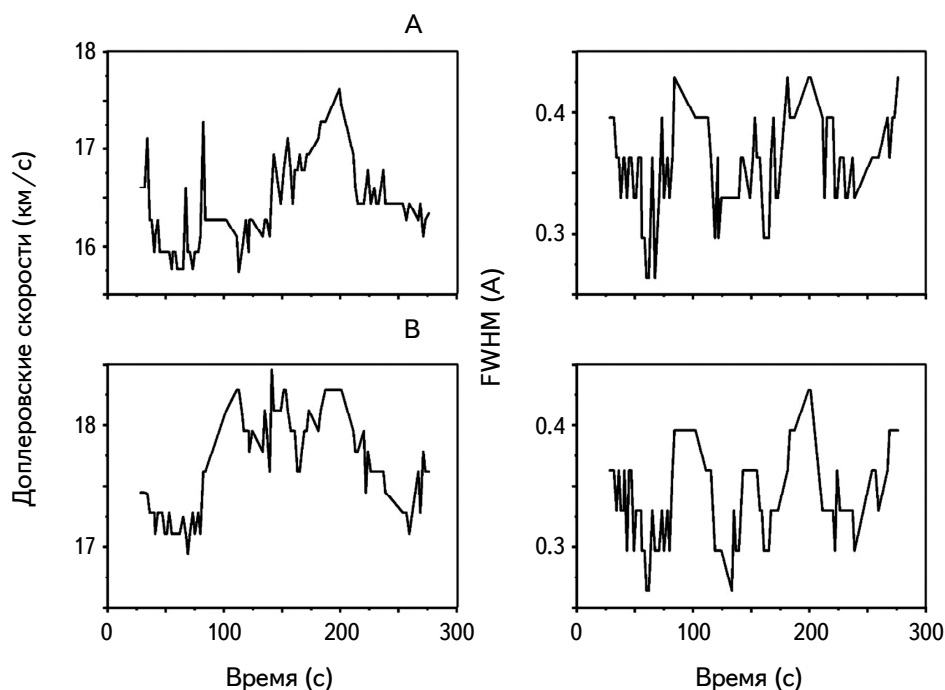


Рис.6. Графики изменений доплеровской скорости и полуширины по времени для протуберанца (А - первая нога, В - вторая нога).

На рис.7 графики а-в (пунктирные линии) соответствуют первой ноге протуберанца, где, как было показано, доплеровская скорость ниже, чем во второй. Здесь наблюдается асимметрия изменений доплеровской скорости и полуширины с фазовым сдвигом. На графике d-f (пунктирные линии), где доплеровская скорость относительно выше, асимметрия по времени более заметна, чем в первом случае. Можно предположить, что там, где скорость выше, асимметрия изменений доплеровской скорости и полуширины наблюдается лучше, чем там, где доплеровская скорость ниже.

На рис.7 график а соответствует участку на расстоянии 400 км от центра протуберанца, график b - участку на расстоянии 800 км, график с - центральной части протуберанца, график d находится в противоположном направлении от центра протуберанца на 400 км от центра, график f - в области на расстоянии 800 км. Графики d и f соответствуют "ноге" протуберанца, где плазма распространяется от нижних слоев солнечной атмосферы в сторону короны, а графики а и b соответствуют "ноге" протуберанца, где плазма распространяется от короны к нижним слоям.

На рис.8 представлены графики изменений полуширин FWHM для спикул и протуберанца во времени. В измеренных нами спектрограммах наблюдается

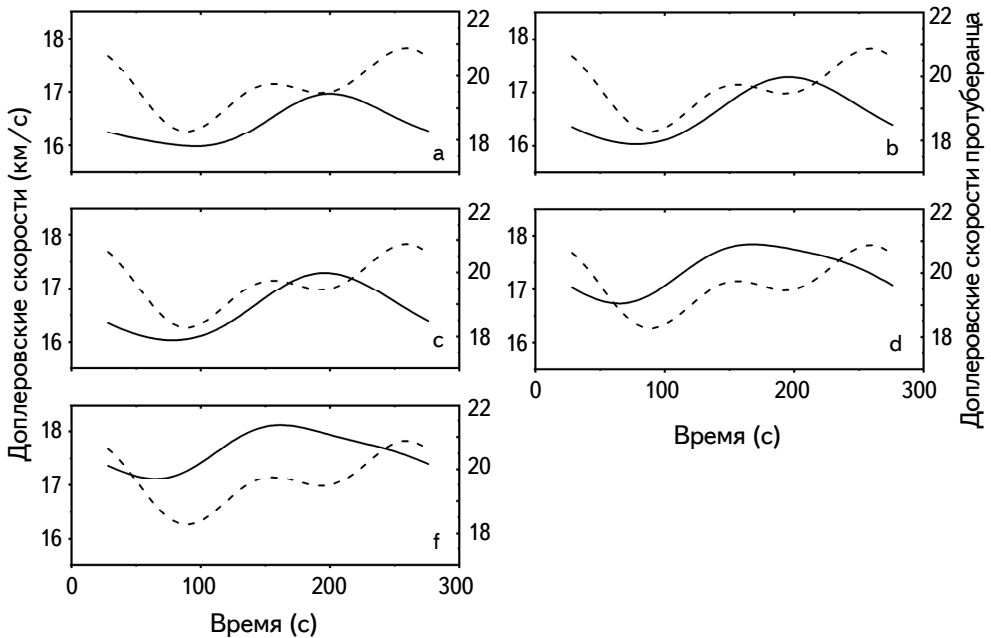


Рис.7. График изменений доплеровских скоростей спикул и протуберанца во времени (Сплошная линия - спикула, пунктирная линия - протуберанец).

асимметрия изменений (максимум) доплеровских скоростей спикул и протуберанца во времени со сдвикутой.

В наших измерениях точность определения доплеровской скорости достигает ± 0.35 км/с, а полуширины $\pm 0.04 \text{ \AA}$.

4. *Обсуждение и выводы.* Одной из актуальных проблем физики Солнца является исследование в протуберанцах физических процессов вещества, представленного в виде холодных волокон, нитей, трубок и петель. Колебания в протуберанцах и их свойства изучались многими исследователями [51,75,76,]. После измерений доплеровских скоростей были обнаружены колебания с периодами от нескольких минут до нескольких часов.

Что касается колебаний доплеровских скоростей и полуширин FWHM в противофазе, можно предложить два разных механизма. Во-первых, колебания могут быть вызваны параболическими траекториями, т.е. последовательным движением от солнечного края вверх и вниз [30]. Во-вторых, они могут возникнуть при повышенной турбулентности из-за нестабильности потока (например, нестабильность Кельвина-Гельмгольца). Если турбулентность (следовательно, ширина линии) неоднородна по высоте и меньше вблизи вершины, то ширина линии будет антикоррелирована с доплеровским сдвигом. Ширина линии может иметь максимальное значение, когда восходящая

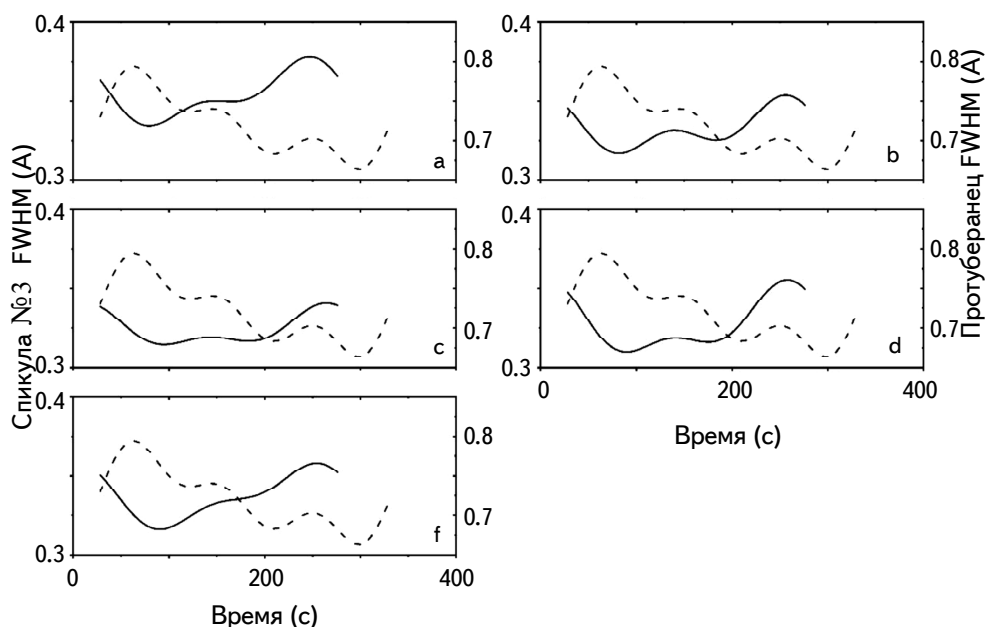


Рис.8. График изменений полуширины спикул №3 и протуберанца во времени.

плазма достигает максимальной высоты. Спиральные движения также могут вызывать антикорреляцию между доплеровской скоростью и FWHM. Конечно, для изучения этих вопросов необходимы дополнительные наблюдения [29]. В будущем было бы хорошо одновременно наблюдать две разные (например, $H\alpha$ и D_3) спектральные линии, которые имеют различную температуру возбуждения и излучают из разных областей.

С помощью наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением исследователи [75,77-79] изучили периоды колебаний в трубках - волокнах протуберанцев и установили, что периоды колебаний лежат в диапазоне 3-20 мин. Главный вопрос в таких исследованиях заключается в том, всегда ли такие периодические колебания связаны с их структурой или нет? Проанализировав численные исследования, автор [80] пришел к выводу, что волокна колеблются группами, а не индивидуально.

На основе анализа наших наблюдений были получены следующие основные результаты:

Доплеровские скорости в основаниях D_3 -протуберанцев изменяются примерно в пределах 17-18 км/с, а в спикулах - в диапазоне 16-24 км/с.

В D_3 -протуберанцах наблюдается асимметрия изменения доплеровских скоростей и полуширин FWHM во времени.

Для D_3 -протуберанцев период колебаний доплеровских скоростей изменяется в среднем в течение 3-4 мин, а период колебаний FWHM - в течение 2-3 мин.

В D_3 -спикулах период колебаний доплеровских скоростей и период колебаний FWHM изменяются в среднем в течение 2-5 мин. Из 5 исследованных нами спикул асимметрия изменения во времени наблюдается у 4-х спикул.

В "ногах" протуберанца антикорреляция между FWHM и доплеровскими флуктуациями скорости более выражена в "ноге", где солнечная плазма движется из нижних слоев в верхние. В статье [30] нами предложены/описаны два разных механизма, которые могут вызывать наблюдаемые противофазные колебания доплеровских скоростей и ширины линий в спикулах.

Работа поддержана грантом Национального Научного Фонда им. Шота Руставели FR-22-8920. Мы также благодарим рецензента за весьма полезную дискуссию и предложения.

¹ Евгений Харадзе Национальная астрофизическая обсерватория Грузии, Грузия

² Грузинский технический университет, 0160, Грузия, Тбилиси, e-mail: daviti.khutsishvili@gmail.com

³ Государственный университет им. Ильи, Тбилиси, Грузия

STUDY OF CHANGES IN DOPPLER VELOCITIES AND HALF-WIDTHS IN SOLAR SPICULES AND PROMINENCES

M.SIKHARULIDZE², D.KHUTSISHVILI², E.KHUTSISHVILI¹,
V.KAKHIANI¹, T.TSINAMDZGVRISHVILI³

The aim of this research is to study the non-stationary physical processes occurring in solar spicules and prominences, and to explore the relationship between them. By studying spicules and prominences and comparing the results, this research aims to provide novel insights into the physical processes involved. In this regard, spectrograms in the helium D_3 line at the altitude (8000 km) were obtained in the Abastumani astrophysical observatory using a coronagraph, without the need for a solar eclipse. Spectrograms in the D_3 line were acquired in the second row of the spectrograph, where the inverse dispersion is $0.96 \text{ \AA} / \text{mm}$. The standard errors for the Doppler velocities and the full width at half maximum (FWHM) are $\pm 0.35 \text{ km/s}$ and 0.04 \AA , respectively. The lifetimes of nearly all measured spicules were 20 min, indicating that they resemble type I spicules. The Doppler and half-width changes over time was analyzed using the Lomb periodogram

algorithm for non-uniform distributions. The main results of this study are as follows: The Doppler velocities in the legs of the prominences vary approximately between 17-18 km/s, while in the spicules, they range from 16-24 km/s. An asymmetry in the changes of Doppler velocities and half-widths over time is observed in the prominences. Four out of five analyzed spicules show asymmetrical changes over time. In prominences, the oscillation period of Doppler velocities in the D_3 line averages between 3-4 min, while the oscillation period of half-widths averages between 2-3 min. In D_3 spicules, the oscillation period of Doppler velocities averages between 2-5 min, and the oscillation period of half-widths is also between 2-5 min. In the "legs" of the prominence, the anticorrelation between FWHM and Doppler velocity fluctuations is more pronounced in the leg where solar plasma moves from the lower to the upper layers. The observed anti-phase oscillation with longer periods can be explained by the up and down motions of turbulent plasma in type I spicules, while oscillations with shorter periods may be caused by the helical motion of the spicule axis formed by the superposition of two linearly polarized magnetohydrodynamic kink waves.

Keywords: *spicules: prominence: spectral lines*

ЛИТЕРАТУРА

1. *B. De Pontieu, R.Erdélyi, S.P.James*, Nature, **430**, 536D, 2004.
2. *B. De Pontieu et al.*, PASJ, **59**, S655, 2007a.
3. *B. De Pontieu et al.*, PASJ, **59**, S655, 2007b.
4. *J.M.Beckers*, Solar spicules (Invited Review Paper). Solar Phys., **3**, 367, 1968.
5. *T.M.D.Pereira, B. De Pontieu, M.Carlsson*, Astrophys. J., **759**, 18, 2012.
6. *T.M.D.Pereira et al.*, Astron. Astrophys., **611**, L6, 2018.
7. *J.M.Pasachoff, W.A.Jacobson, A.C.Sterling*, Solar Phys., **260**, 59, 2009.
8. *G.Tsiropoula, K.Tziotziou, I.Kontogiannis et al.*, Space Sci. Rev., **169**, 181, 2012.
9. *J.M.Beckers*, Solar spicules, **10**, 73, 1972.
10. *L.D.Xia, M.D.Popescu et al.*, Astron. Astrophys., **438**, 1115, 2005.
11. *Г.М.Никольский, А.А.Сазанов*, Астрон. ж., **43**, 928, 1966.
12. *G.M.Nikolsky*, Solar Phys., **12**, 379, 1970.
13. *V.I.Kulidzanishvili, G.M.Nikolsky*, Solar Phys., **59**, 21, 1978.
14. *V.I.Kulidzanishvili*, Solar Phys., **66**, 251, 1980.
15. *V.I.Kulidzanishvili, Iu.D.Zhugzhda*, Solar Phys., **88**, 35, 1983.
16. *E.V.Khutsishvili*, Solar Phys., **106**, 75, 1986.

17. *B. De Pontieu, R.Erdelyi, A.G. De Wijn*, *Astrophys. J.*, **595**, L63, 2003.
18. *Э.В.Хуцишвили*, *Бюлл. Солн. Данн.*, **5**, 116, 1981,
19. *Э.В.Хуцишвили, Л.А.Геонджян*, *Бюлл. АБАО*, **56**, 123, 1983.
20. *Э.В.Хуцишвили*, *Сообщ. АН ГССР*, **108**, 57, 1983.
21. *Э.В.Хуцишвили*, *Бюлл. АБАО*, **60**, 65, 1985.
22. *E.V.Khutsishvili*, *Astron. Nachr.*, **316**, 291, 1995.
23. *Э.В.Хуцишвили и др.*, *Бюлл. АБАО*, **76**, 177, 2004.
24. *D.Khutsishvili et al.*, *Astrophysics*, **65**, 522, 2022.
25. *D.Khutsishvili et al.*, *Astrophysics*, **58**, 567, 2015,
26. *V.T.Kukhianidze, T.V.Zaqarashvili, E.V.Khutsishvili*, *Astron. Astrophys.*, **449**, L35, 2006.
27. *T.V.Zaqarashvili, E.V.Khutsishvili et al.*, *Astron. Astrophys.*, **474**, 627, 2007.
28. *K.Murawski, T.V.Zaqarashvili*, *Astron. Astrophys.*, **519**, 8, 2010.
29. *K.Murawski, A.K.Srivastava, T.V.Zaqarashvili*, *Astron. Astrophys.*, **535**, A58, 9, 2011.
30. *D.Khutsishvili et al.*, *Astrophys. Space Sci.*, **362**, Issue 12, article id. 235, 10, 2017.
31. *B.K.Carter, R.Erdelyi*, *Astron. Astrophys.*, **475**, 323, 2007.
32. *D.B.Jess et al.*, *Science*, **323**, 1582, 2009.
33. *R.Erdelyi, V.Fedun*, *Science*, **318**, 1572, 2007.
34. *T.V.Zaqarashvili*, in *3rd School and Workshop on Space Plasma Physics*, eds. I, 2011.
35. *T.V.Zaqarashvili, R.Erdelvi*, *Space Science Reviews*, **149**, 355, 2009.
36. *E.V.Khutsishvili et al.*, *Astrophys. Space Sci.*, **354**, 259, 2014.
37. *B. De Pontieu, R.Erdelyi*, *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **364**, 383, 2006.
38. *A.C.Sterling*, *Solar Phys.*, **196**, 79, 2000.
39. *Mahajan et al.*, *Physics of Plasmas*, **8**, 1340, 2011.
40. *T.M.D.Pereira, B. De Pontieu, M.Carlsson*, *Astrophys. J.*, **764**, 69, 2013.
41. *D.H.Sekse et al.*, *Astrophys. J.*, **769**, 44, 2013b.
42. *Y.Z.Zhang et al.*, *Astrophys. J.*, **750**, 9, 2012.
43. *P.Antolin et al.*, *Astrophys. J.*, **856**, 44, 2018.
44. *Martinez-Sykora et al.*, *Astrophys. J.*, **860**, 116, 2018.
45. *T.V.Zaqarashvili*, *Astrophys. J. Lett.*, **893**, L46, 2020.
46. *T.M.D.Pereira et al.*, *Astrophys. J.*, **792**, 15, 2014.
47. *S.F.Martin, R.Bilimoria, P.W.Tracadas*, in *Solar Surface Magnetism*, ed. R.J.Rutten, C.J.Schrijver (Dordrecht: Academic Publishers), 303, 1994.
48. *E.Tandberg-Hanssen*, *The nature of solar prominences* (Dordrecht, Boston: Kluwer), 1995.
49. *V.Gaizauskas*, in *IAU Colloq. 167, New Perspectives on Solar Prominences*, ed. D.F.Webb, B.Schmieder, D.M.Rust (San Francisco, CA: PASP), **150**, 257, 1998.
50. *N.Labrosse, P.Heinzl, J.V.Vial et al.*, *Space Sci. Rev.*, **151**, 243, 2010.
51. *D.H.Mackay et al.*, *Space Sci. Rev.*, **151**, 333, 2010.
52. *S.R.Habbal et al.*, *Astrophys. J.*, **719**, 1362, 2010.

53. *S.Gunár et al.*, *Astron. Astrophys.*, **543**, A93, 2012.
54. *E.J.Schmahl et al.*, *Sol. Phys.*, **39**, 337, 1974.
55. *Y.Hanaoka et al.*, *PASJ*, **46**, 205, 1994.
56. *M.J.Penn, J.Arnaud, D.L.Mickey et al.*, *Astrophys. J.*, **436**, 368, 1994.
57. *F.C.Drago et al.*, *Solar Phys.*, **199**, 115, 2001.
58. *N.Labrosse, P.Gouttebroze*, *Astron. Astrophys.*, **380**, 323, 2001.
59. *G.Stellmacher, E.Wiehr, I.E.Dammasch*, *Solar Phys.*, **217**, 133, 2003.
60. *S.Parenti, J.-C.Vial, P.Lemaire*, *Astron. Astrophys.*, **443**, 679, 2005a.
61. *O.Ramón, B.J.Luis*, *Solar Phys.*, **206**, 45, 2002.
62. *D.Banerjee et al.*, *Sol. Phys.*, **246**, 3, 2007.
63. *D.Mackay, J.Karpen, J.L.Ballester et al.*, *Space Sci. Rev.*, **151**, 333, 2010.
64. *M.Zapiyr et al.*, *Solar Phys.*, **290**, 1647, 2015.
65. *H.Balthasar et al.*, *Astron. Astrophys.*, **277**, 635, 1993.
66. *C.Foullon, E.Verwichte, V.M.Nakariakov*, *Astron. Astrophys.*, **427**, L5, 2004.
67. *R.Molowny-Horas et al.*, *JOSO Ann. Rep.*, 126, 1999.
68. *A.Costa, R.González, A.C.Sicardi Schifino*, *Astron. Astrophys.*, **427**, 353, 2004.
69. *I.Mghebrishvili, T.V.Zaqarashvili, V.Kukhianidze et al.*, Dynamics of a Solar Prominence Tornado Observed by SDO/AIA on 2012 November 7-8, *Astrophys. J.*, **810**, Issue 2, article id. 89, 9, 2015.
70. *I.Mghebrishvili, T.Zaqarashvili, V.Kukhianidze et al.*, Association between Tornadoes and Instability of Hosting Prominences, Catalyzing Solar Connections, 2018 SDO Science Workshop held October 29 - November 2, 2018 in Ghent, Belgium, 2018a.
71. *I.Mghebrishvili, T.V.Zaqarashvili, V.Kukhianidze et al.*, Association between Tornadoes and Instability of Hosting Prominences, *Astrophys. J.*, **861**, Issue 2, article id. 112, 10, 2018b.
72. *P.G.Judge, A.Tritschler, B.Chye Low*, *Astrophys. J.*, **730**, L4, 2011.
73. *W.H.Press, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling et al.*, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
74. *D.Khutsishvili, R.Khutsishvili, V.Kakhiani et al.*, *Astrophysics*, **65**, 522, 2022.
75. *R.Oliver, J.L.Ballester*, *Solar Phys.*, **206**, 45, 2002.
76. *D.Banerjee, R.Erdélyi, R.Oliver et al.*, *Solar Phys.*, **246**, 3, 2007.
77. *Yi.Zhang, E.Oddbjorn*, Vertical velocities and oscillations in quiescent, filaments, 1991.
78. *O.Engvold, H.Jakobsson, E.Tandberg-Hanssen et al.*, *Solar Phys.*, **202**, 293, 2001.
79. *A.J.Díaz, R.Oliver, J.L.Ballester*, Fast magnetohydrodynamic oscillations in a multifibril Cartesian prominence model, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 440, Issue 3, September IV, p.1167, 2005.
80. *A.J.Díaz, R.Oliver, R.Erdélyi et al.*, Fast MHD oscillations in prominence fine structures, *Astron. Astrophys.*, **379**, p.1083, 2001.