

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.4-549

ИЗМЕНЕНИЕ ДОПЛЕРОВСКИХ СКОРОСТЕЙ И ПОЛУШИРИН ЛИНИИ D_3 СПИКУЛ

Д.ХУЦИШВИЛИ^{1,2}, Е.ХУЦИШВИЛИ¹, В.КАХИАНИ¹,
М.СИХАРУЛИДЗЕ¹

Поступила 17 августа 2022

Принята к печати 11 ноября 2022

В представленной работе анализируются спектральные наблюдения спикул в линии гелия D_3 , полученные в Абастуманской астрофизической обсерватории (Грузия) с помощью 53-см внеатомного коронографа. Сделан вывод, что изменения доплеровских (лучевых) скоростей и полуширины линии D_3 находятся в противофазе. Максимумы периодов колебаний доплеровских скоростей совпадают с минимумами колебаний полуширины D_3 .

Ключевые слова: *линия D_3 ; доплеровские скорости; полуширины линии*

1. *Введение.* Одной из основных проблем понимания процессов, протекающих в солнечной атмосфере, является механизм переноса энергии в короне. Согласно последним исследованиям, основными источниками нагрева короны являются солнечные спикулы, в частности, магнитогидродинамические волны (МНД) и вызываемые ими перемещения энергии и вещества из нижних слоев солнечной атмосферы в верхние. Спикулы являются связующим звеном между фотосферой и короной. Они являются тонкими динамичными образованиями. В исследовании физических процессов, происходящих в спикулах, основными проблемами являются сложность наблюдений, инструментальные ограничения, короткое время жизни, малая ширина, наложение изображений нескольких спикул друг на друга и др.

Несмотря на то, что спикулы обнаружены более 130 лет назад, в них много неразгаданного. Ряд физических характеристик до сих пор полностью не изучены, и это привело к созданию ряда различающихся между собой моделей природы спикул [1]. Новые космические наблюдения с помощью солнечного оптического телескопа (SOT aboard Hinode) выявили две категории спикул - классические спикулы I типа и спикулы II типа, которые, как выяснилось, имеют различные характер и механизмы формирования, времена жизни, скорости и др. Для спикул II типа время жизни составляет 10-150 с, диаметр и восходящая скорость равны 200 км и 50-150 км/с [2-5], в то время как для классических спикул I типа время жизни равно 5-15 мин, диаметр над диском Солнца, средняя высота и доплеровские скорости находятся в пределах

400-1500 км, 5000-10000 км и 15-40 км/с, соответственно [3,6-8]. Спикеры II типа движутся существенно быстрее и меньше живут, чем спикеры I типа, что многими исследователями объясняется их более быстрым нагреванием. Это подтверждено наблюдениями IRIS [9]. Исходя из результатов вышеприведенных наблюдений, необходимо изучение распределения полуширин линий излучения во времени. Различие результатов между классическими и космическими наблюдениями может быть обусловлено тем, что для спикеров I типа степень пространственно-временного разрешения меньше, чем для спикеров II типа и спикеры I типа доминируют в активных зонах, в то время как спикеры II типа наблюдаются в основном при спокойном Солнце и в корональных дырах.

Типичная электронная плотность спикеров составляет около $3.5 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, температура в пределах 5000-8000 К [1,6]. Плотность спикеры приблизительно в 10 раз выше плотности окружающей среды [6], поэтому их можно рассматривать как горячие магнитные трубки, опущенные в существенно более горячую корональную плазму. Магнитогидродинамические волны способны ускорять солнечный ветер и нагревать корону [2,10].

В работе [11] приведены спектры в линии Na , полученные для больших высот с целью минимизации эффекта наложения изображений спикеров друг на друга. Отмечается, что многие спикеры имеют асимметричный спектр, а некоторые имеют несколько пиков. Авторы указывают, что для 57 спикеров доплеровские скорости меняются в пределах 20-30 км/с. Также отмечается, что спикера состоит из нескольких "нитей/волокон". Для отдельных спикеров были обнаружены спектральные отклонения, что указывает на сложную динамическую структуру спикеров.

Распространено мнение, что спикеры разного типа возникают благодаря механизмам, рассмотренным в [12,13], где разработаны различные теоретические модели [1]. Эти модели должны объяснить, какая энергия необходима для удержания спикеров над краем Солнца в противоположность солнечному притяжению, какой механизм ускоряет их движение вверх и как он возникает.

Ранее Крат и др. [14-16] время высказали мнение, что спикеры состоят из разного типа "волокон" гелия, водорода и металлов с различной температурой. Никольский [17,18], Крат [15,16] и Woltjer [19] допускали, что водород излучает из внутренних, сравнительно холодных ($T \approx 6000 \text{ К}$) слоев, а гелий излучает из более горячих ($T \approx 20000 \text{ К}$) районов внешних слоев спикеров. В то же время, Никольский, Крат и Соболев [18,20,21] отметили, что в линии гелия видны более крупные и более различимые друг от друга спикеры. С увеличением высоты число водородных спикеров, по сравнению с гелиевыми, уменьшается быстрее [22]. Исследования показывают, что спикеры Na достигают высоты 10000 км, в то время как спикеры D_3

распространяются на большие высоты.

5-минутные вертикальные колебания в фотосфере впервые наблюдал Лейтон и др. [23]. Позже, 3-7-минутные (пик на 5 мин) колебания спикул отмечены в [24-29]. Колебания были изучены De Pontieu, Erdélyi & James [30], Khutsishvili et al. [31,32] и другими. Колебания спикул с меньшими периодами упоминаются в работе Nikolsky & Platova [33]. Они отмечают, что характерный период колебаний спикул составляет 1 мин. Аналогичные результаты (периоды <120 с) были получены позже [34]. Kukhianidze et al., [35] и Zaqarashvili et al., [36] получили для H α -спикул колебания доплеровских скоростей в диапазоне 30-100 с (см. также, [31,37,38]).

Возможность существования колебаний в магнитных трубках описана в работах [39-41]. Полученные в результате наблюдений периоды колебаний [42] формально можно разделить на две группы: относительно короткие (<2 мин) и длинные (>2 мин) периоды. Колебания с периодами более 2 мин статистически встречаются чаще и изучены относительно хорошо. Периоды таких колебаний в основном концентрируются в интервалах 3-7 мин и 50-110 мин.

Изучению колебаний спикул посвящено много статей [30,35,43,44]. То, что гелиосейсмология может определять свойства солнечных явлений по наблюдаемым колебаниям для хромосферных спикул, первоначально было предложено Zaqarashvili et al [36]. При оценке периода колебаний в спикулах наблюдаются два типа МГД-волн: изгибные волны [33,45,46] и альфвеновские волны, описанные Jess et al. [40]. Наблюдение колебаний солнечных спикул может служить косвенным свидетельством переноса энергии из фотосферы по направлению к короне. Статистическое исследование, проведенное Okamoto, De Pontieu [47] с использованием Hinode/SOT, показало, что 59% волн, обусловленных спикулами, распространяются вверх, 21% волн распространяются вниз и 20% волн представляют собой стоячие колебания.

Наблюдения за спикулами проводятся во многих спектральных линиях H α , CaII H и K, HeI D₃ и 10830 Å. В основном наблюдают в линиях H α , D₃, и CaII H [48]. Спикулам отводится большая роль при изучении баланса веществ солнечной атмосферы.

Спикулы это тонкие, длинные, похожие на струи, магнитные образования, расположенные в очень динамичной и сложной области между солнечной фотосферой и короной. В качестве дальнейшего приближения спикулы можно представить как осесимметричные цилиндрические волноводы, соединяющие нижнюю и верхнюю атмосферу Солнца. Поскольку спикулы плотнее окружающей их корональной плазмы [6], их можно смоделировать как холодные магнитные трубки, погруженные в горячую корональную плазму. Многие явления, протекающие на солнечной поверхности (такие как перенос тепловой энергии и солнечные колебания), вызваны воздействием магнитного поля.

На уровне фотосферы плотность газа достаточно велика для создания кинетического давления, которое доминирует над магнитным давлением, в то время как в хромосфере и короне все наоборот - энергия магнитной плотности больше кинетической.

В данной работе изучены наблюдения в линии гелия D_3 , полученные в Абастуманской астрофизической обсерватории (Грузия) на 53-см большом внеатмосферном коронографе. В разделе 1 кратко рассматриваются параметры спикул. В разделе 2 описаны методы наблюдений и обработки данных. В 3-м разделе рассмотрен характер переменности во времени для доплеровских скоростей и полуширин линии D_3 . В 4-м - представлены результаты наблюдений.

2. Наблюдение и обработка данных. Одной из основных проблем, связанных с объяснением неоднородности хромосферы, является возбуждение гелия. Действительно: а) после водорода гелий является основным элементом в составе хромосферы; б) требуются особые условия для излучения - высокая кинетическая температура, либо сильное поле излучения; в) гелий интересен еще и тем, что он существует в двух особых состояниях: парагелий и ортогелий.

Можно принять, что водород и гелий не могут излучаться с одинаковой интенсивностью со всей площади хромосферы. Ярким примером этого являются хромосферные спикулы. Процессы, происходящие в спикулах из гелия и из водорода, отличаются друг от друга, в частности, доплеровскими скоростями и др.

Наблюдения спикул проводились с помощью 53-см коронографа Абастуманской астрофизической обсерватории, оснащенного высокодисперсионным решетчатым спектрографом ($0.96 \text{ \AA} / \text{мм}$ во втором порядке в районе 6000 \AA) и ПЗС-матрицей Arogee U9000 (3056×3056 пикселей, размер пикселя: $12 \times 12 \text{ мкм}$, размер матрицы: $36.7 \times 36.7 \text{ мм}$) 14 и 17 июля 2016г. Основная линза коронографа ($D = 530 \text{ мм}$, $F = 8000 \text{ мм}$) в сочетании с двумя ахроматическими линзами и полевая линза проецируют изображение Солнца (диаметром 125 мм) в фокусе Куде с эквивалентным фокусным расстоянием 13 м . Угловой масштаб спектров в фокальной плоскости спектрографа составляет 16 угл. с на мм .

Спектрограф системы Эберта-Фасти оснащен дифракционной решеткой площадью $230 \times 250 \text{ мм}$. Решетка имеет 600 штрихов/мм , что для видимой области дает максимальную концентрацию во 2-м порядке спектра. Разрешение прибора в фокальной плоскости спектрографа составляет $25 \text{ линий на миллиметр}$. Для спектров 2-го порядка разрешение спектрографа составляет $0.04 \text{ \AA} / \text{мм}$. Спектрограф имеет круглую, концентрическую по отношению к лимбу Солнца, щель с диаметром, немного превышающим диаметр лимба, размером примерно 60° дуги лимба Солнца, в то время как изображение на CCD U9000 покрывает только 20° дуги лимба. Диаметр зеркала коллиматора

спектрографа составляет 360 мм, фокусное расстояние - 8 м, а для зеркала камеры 420 мм и 8 м, соответственно.

Во время наблюдения перед светоприемником мы размещали 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 показаны две типичные спектрограммы D_3 спикеры, полученные 14 и 17 июля 2016г. Щель спектрографа располагалась над краем Солнца на линейном расстоянии около 7500 и 8000 км. Время экспозиции каждого изображения равно 0.3 с. Изображения были получены сериями с интервалом

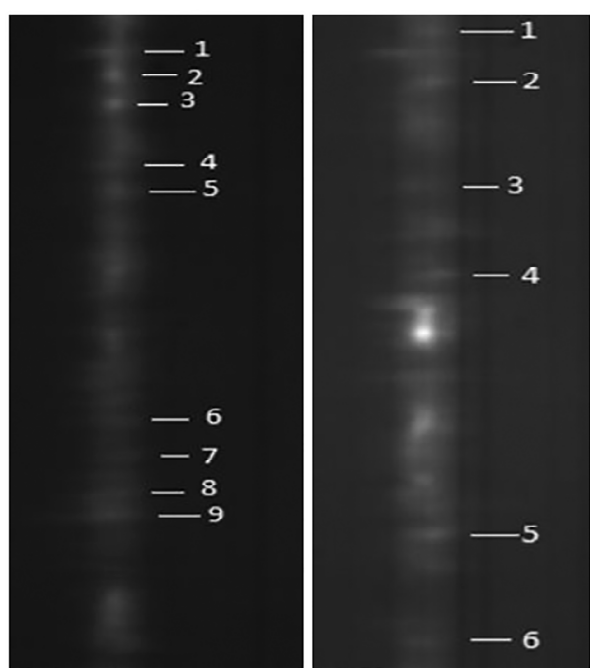


Рис.1. Типичные D_3 спектральные изображения спикер, полученные в 05:07:46 UT 14 июля 2016г. (слева) и в 04:35:53 UT 17 июля 2016г. (справа). Изображения центрированы на солнечный экватор и перекрывают $\pm 10^\circ$ широты по вертикали изображений. Спектральная дисперсия масштабом $0.91 \text{ \AA}/\text{мм}$ ориентирована по горизонтальной оси изображений. Спектральные D_3 изображения спикер видны вдоль лимба Солнца в вертикальном направлении изображений на высотах 7500 и 8000 км от фотосферы Солнца. Самые яркие объекты, видимые на снимках, это спектры D_3 протуберанцев.

около 3 с, который, в основном, обусловлен скоростью считывания данных с ПЗС. Около 25% кадров в серии были забракованы из-за низкого качества изображения. Таким образом, средний интервал между кадрами составил 4.5 с. Продолжительность каждой серии составила около 10 и 12 мин. Серия наблюдений проведена на восточной стороне лимба Солнца в пределах широт $\pm 10^\circ$ от солнечного экватора.

Методика обработки данных описана в нашей ранее опубликованной статье [32]. Для обработки ПЗС-изображений спектров спикул мы использовали обновленную версию программы обработки астрономических изображений AImaP 3.59, разработанную одним из авторов статьи (В.Кахиани). Помимо стандартной обработки ПЗС-изображения, программа позволяет вручную выбирать строку (или усреднять несколько строк) ПЗС-изображения и выполнять нелинейную полиномиальную аппроксимацию или аппроксимацию скользящим средним профилей D_3 спикулы и опорных спектральных линий. Далее программа калибрует профили с длинами волн по опорным линиям и преобразует расстояние между максимумами профиля в доплеровскую скорость спикулы. Одновременно программа вычисляет FWHM (полуширину) аппроксимированной спектральной линии D_3 . Образцы профилей D_3 изображены на рис.2. Эти профили соответствуют конкретной спикуле на рис.1, указанной белой линией с соответствующим номером.

На наблюдаемых спектрограммах были измерены серии изображений спектров для 15 спикул, в результате чего было получено распределение доплеровских скоростей и полуширин во времени. Для оценки статистической погрешности измерений доплеровских (лучевых) скоростей и полуширин спектральной линии D_3 , к полученным временным рядам была применена high pass фильтрация с частотой среза, равной 0.016 Гц (периоды 60 с), и рассчитаны стандартные отклонения отфильтрованных данных, которые равны следующим значениям: ± 0.3 км/с для доплеровских скоростей и $\pm 0.03 \text{ \AA}$ для полуширин.

3. Анализ данных. Морфологический анализ доплеровских скоростей и амплитуд колебаний полуширин ясно показывает наличие квазипериодических изменений этих параметров во времени. Однако иногда наблюдаются и "случайные" изменения. Графики изменения доплеровской скорости и полуширины во времени показаны на рис.2.

В первой серии было получено 230 спектрограмм, во второй - 290. В обеих сериях были отобраны и измерены доплеровские скорости 9 и 6-ти спикул. И в первой, и во второй сериях мы пронумеровали спикулы 1-9 и 1-6, соответственно.

Результаты обработки наших наблюдений (приведены данные только для

нескольких спикул) приведены в табл.1. В первом столбце указаны дата наблюдений и номера, которые мы условно присвоили спикулам. А второй (полуширины) и третий (доплеровские скорости) столбцы показывают периоды и фазы, соответственно. Уровень доверия равен 95% на пороговом уровне спектральной мощности 9.0, и 99% на уровне мощности 10.7, соответственно. Таким образом, уровни доверия практически всех полученных результатов достаточно высоки.

В отличие от спикул в Na , доплеровские скорости спикул в D_3 колеблются относительно ненулевых скоростей, что указывает на относительно непериодические колебания плазмы в спикулах. Такой ход доплеровских скоростей может быть вызван общими движениями хромосферной плазмы, относительно отклоненных от радиального направления спикул. Для иллюстрации на рис.2 приведены графики изменений доплеровской скорости (сплошные линии) и полуширины (штрих линии) спикул под номером 2 и 8, измеренных на спектрограммах первой серии от 14.07.2016, а также для второй серии от 17.07.2016г. (спикеры 1, 3).

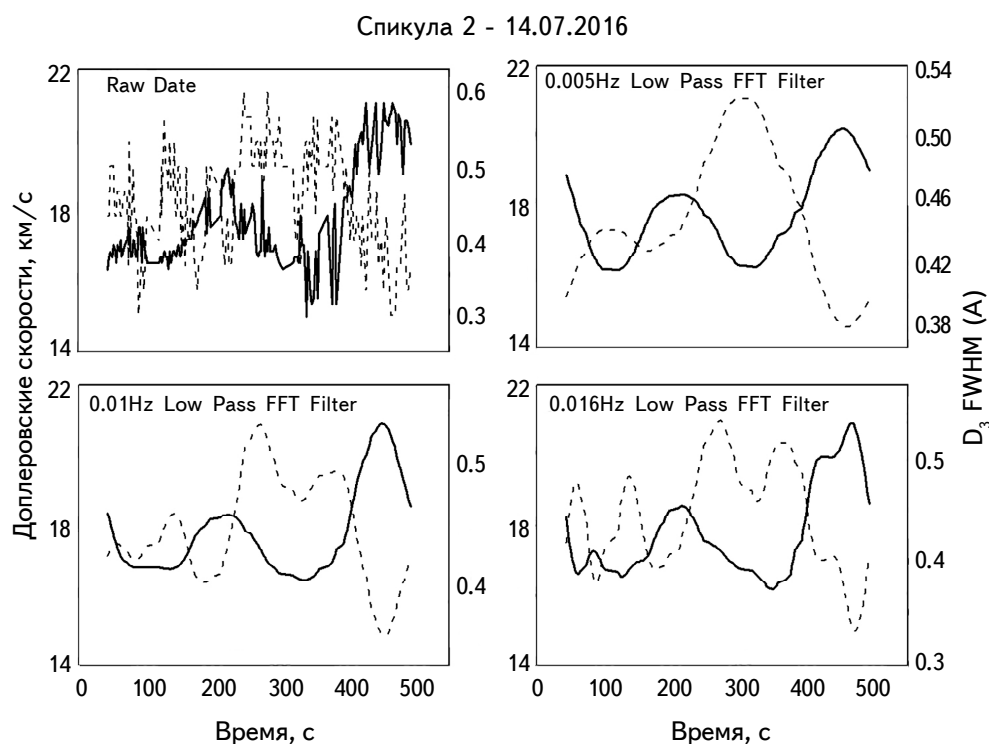
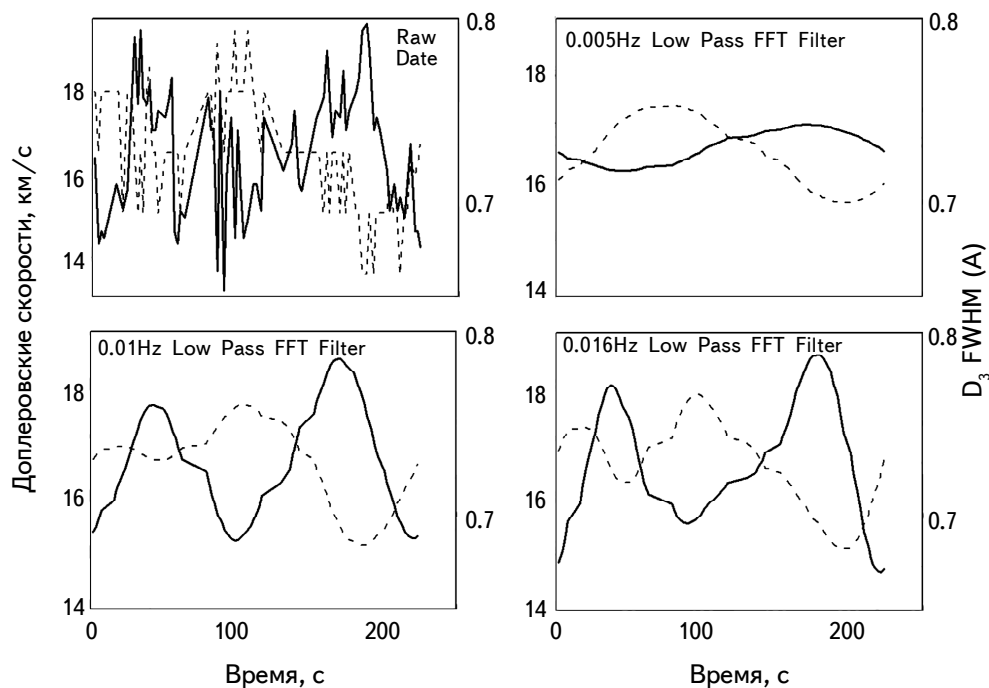


Рис.2. Изменения доплеровской скорости (сплошные линии) и полуширины (штрих линии) спикул 2, 8 (14.07.2016) и 1, 3 (17.07.2016),

Спикула 8 - 14.07.2016



Спикула 1 - 17.07.2016

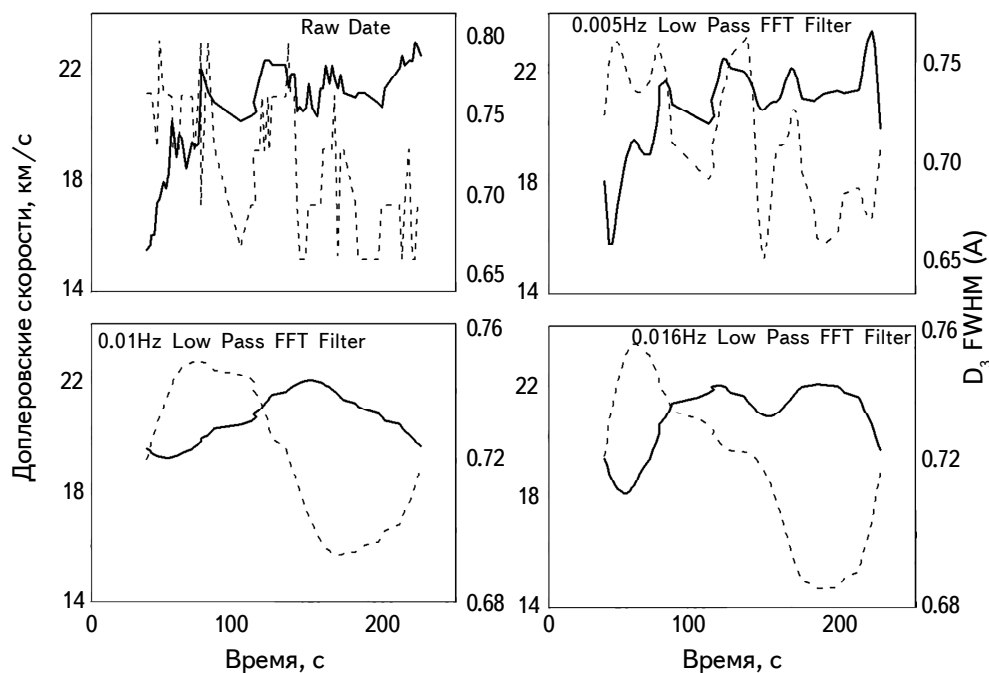


Рис.2. (Продолжение).

Спикула 3 - 17.07.2016

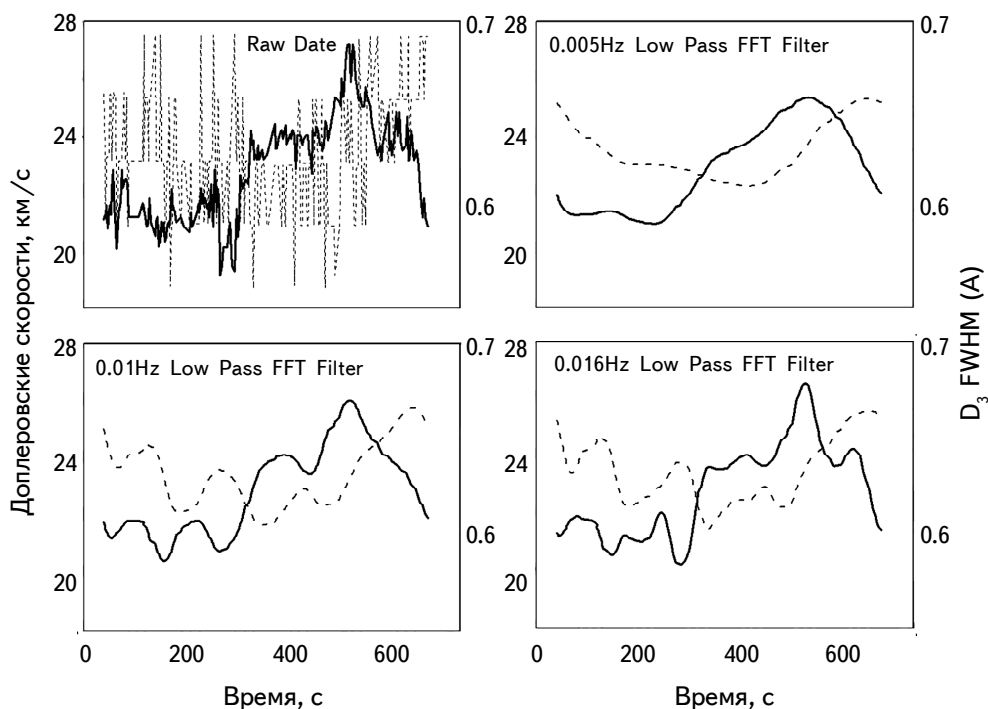


Рис.2. (Окончание).

По нашим оценкам точность определения доплеровской скорости в наших данных достигает ± 0.3 км/с, а полуширины ± 0.03 Å (рис.2). Для повышения точности периодов, отображаемых на рис.2 спикул, мы рассчитали средние спектральные мощности для одних и тех же дискретных частот в обеих группах и построили усредненную периодограмму (см. рис.3).

Таблица 1

Дата наблюдений и нумерация спикул		D ₃ FWHM		Доплеровские скорости	
		Частота	Период, с	Частота	Период, с
17.07.2016	Spic-1	0.02322	43	0.00597	167
		0.03450	29	0.01858	54
17.07.2016	Spic-3	0.00166	602	0.00228	438
		0.00394	253	0.00477	209
14.07.2016	Spic-2	0.00278	359	0.00278	359
				0.00445	225
14.07.2016	Spic-6	0.00306	326	0.00278	359
				0.00556	180
14.07.2016	Spic-8	0.00675	147	0.00844	118

На рис.3 показан график спектральной мощности колебаний доплеровских скоростей спикул, полученный "методом периодограмм Ломба-Скаргла" [50,51] Пороговые уровни доверия: горизонтальная верхняя линия - уровень доверия равен 99% и нижняя линия - уровень доверия 95%. Здесь данные доплеровских скоростей обрабатывались без фильтрации.

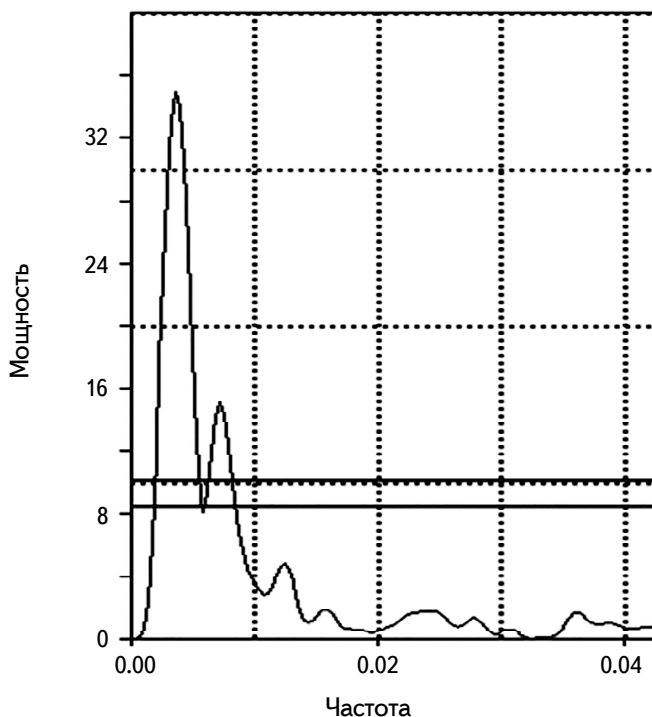


Рис.3. Периодограмма Ломба-Скаргла для колебаний доплеровских скоростей спикул.

Затем, для повышения точности анализа данных доплеровских скоростей, мы использовали известный метод фильтрации БПФ. Фильтровали в двух диапазонах 0.005-0.016 (111-63 с). Отфильтрованные данные были сначала обработаны "методом периодограмм Ломби" [49] и рассчитаны соответствующие частоты. Мы выбрали частоты, уровень доверия которых превышает 95%.

4. Выводы. Таким образом, на основании анализа данных о доплеровских скоростях и полуширинах линии исследуемых нами спикул, можно сделать вывод, что изменения доплеровских скоростей и полуширин спикул находятся в противоположных фазах. Максимум периода доплеровских колебаний скорости совпадает с минимумом периода колебаний полуширины. Приведены периоды колебаний нескольких спикул, отобранных из всего массива измеренных спикул, что наглядно показывает наличие противофазных колебаний

солнечных спикул во времени. Однако иногда наблюдаются "случайные" изменения, природа которых нами не выяснена и причина которых может быть разной.

Очевидно, что для получения спектрограмм высокого спектрального разрешения и для лучшего изучения колебательных движений в спикулах необходимы внеатмосферные наблюдения. На будущее, также хорошо было бы проводить одновременные (или хотя бы квазисовместные) наблюдения в двух разных спектральных линиях, например в линиях водорода $H\alpha$ и гелия D_3 . Эти линии имеют разные температуры возбуждения, поэтому возможно, что эти линии испускаются из разных областей спикул, и сравнение их поведения может улучшить наши знания о динамике спикул, например, турбулентные и винтовые движения в спикулах.

Объяснению подлежат также противофазные колебания наблюдаемых доплеровских скоростей и полуширин. Для решения этих вопросов полезны численные симуляции и моделирование.

¹ Национальная астрофизическая обсерватория Грузии им. Е.К.Харадзе, Грузия, e-mail: daviti.khutsishvili@gmail.com

² Тбилисский государственный университет, Тбилиси, Грузия,

CHANGE IN DOPPLER VELOCITIES AND HALF-WIDTHS OF SPICULES' D_3 LINE

D.KHUTSISHVILI^{1,2}, E.KHUTSISHVILI¹, V.KAKHIANI¹,
M.SIKHARULIDZE¹

This paper analyses spectral observations of spicules in the helium D_3 line obtained in the Abastumani astrophysical observatory (Georgia) with a 53 cm eclipse-free coronagraph. It is concluded that the changes in the Doppler radial velocities and half-widths of the D_3 line are antiphase. The maxima of the Doppler velocity oscillation periods coincide with those of the minima of the D_3 half-width oscillations.

Keywords: *line D_3 ; Doppler velocity; line half-width*

ЛИТЕРАТУРА

1. *A.C.Sterling*, *Sol. Phys.*, **196**, 79, 2000.
2. *B. De Pontieu, S.W.McIntosh, M.Carlsson et al.*, *Science*, **318**, 1574, 2007a.
3. *T.M.D.Pereira, B. De Pontieu, M.Carlsson*, *Astrophys. J.*, **759**, 18, (2012, 2013).
4. *D.H.Sekse, L.Rouppé van der Voort, B. De Pontieu et al.*, *Astrophys. J.*, **769**, 44, 2013.
5. *Y.Z.Zhang, K.Shibata, J.X.Wang et al.*, *Astrophys. J.*, **750**, 9, 2012.
6. *J.M.Beckers*, *Sol. Phys.*, **3**, 367, 1968.
7. *J.M.Pasachoff, W.A.Jacobson, A.C.Sterling*, *Sol. Phys.*, **260**, 59, 2009.
8. *T.V.Zaqarashvili, R.Erdélyi*, *Space Sci. Rev.*, **149**, 335, 2009.
9. *T.M.D.Pereira et al.*, *Astrophys. J.*, **792**, L15, 2014.
10. *H.Ebadi, T.V.Zaqarashvili, I.Zhelyazkov*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **337**, 33, 2012.
11. *H.Skogsrud, L.Rouppé van der Voort, B. De Pontieu*, *Astrophys. J. Lett.*, **795**, 6, 2014.
12. *R.Hammer, Z.E.Musielak, S.Routh et al.*, 12th European Solar Physics Meeting, Freiburg, Germany, held September, 8-12, 2008.
13. *J.Martínez-Sykora, V.Hansteen, B. De Pontieu et al.*, *Astrophys. J.*, **701**, 1569, 2009.
14. *В.А.Крам, Т.В.Крам, Л.М.Правдюк*, О физической неоднородности солнечной хромосферы. Изв. ГАО, **156**, 60, 1956.
15. *В.А.Крам, В.М.Соболев*, Солнечная хромосфера, Изв. ГАО, **21**, 116, 1957.
16. *В.А.Крам, В.М.Соболев*, О возбуждении гелия в солнечной хромосфере. Изв. ГАО, **20**, 68, 1958.
17. *Г.М.Никольский*, Строение и коротковолновое излучение верхней атмосферы Солнца. Докторская диссертация, М., с.300, 1964.
18. *Г.М.Никольский*, Наблюдения спектра спикул и тонкая структура солнечной хромосферы, *Астрон. ж.*, **42**, 86, 1965,
19. *L.A.Woltjer*, A photometric investigation of the spicules and the structure of the chromosphere, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, **12**, 165, 1954,
20. *В.А.Крам, Т.В.Крам*, О физике солнечной хромосферы. Изв. ГАО, **167**, 6-51, 1961.
21. *В.М.Соболев, Ю.А.Наговицын*, Солнечные данные, **2**, 91, 1983.
22. *E.V.Khutsishvili*, *Sol. Phys.*, **106**, 75, 1986.
23. *R.B.Leighton, R.W.Noyes, G.W.Simon*, *Astrophys. J.*, **135**, 474, 1962.
24. *V.I.Kulidzanishvili, G.M.Nikolsky*, *Solar Phys.*, **59**, 21, 1978.
25. *V.I.Kulidzanishvili*, *Sol. Phys.*, **66**, 251, 1980.
26. *V.I.Kulidzanishvili, Iu.D.Zhugzhda*, *Sol. Phys.*, **88**, 35, 1983.
27. *B. De Pontieu, R.Erdelyi, A.G. de Wijn*, *Astrophys. J.*, **595**, L63, 2003.
28. *L.D.Xia, M.D.Popescu, J.G.Doyle et al.*, *Astron. Astrophys.*, **438**, 1115, 2005.
29. *A.Ajabshirizadeh, E.Tavabi, S.Koutchmy*, *New Astron.*, **13**, 93, 2008.
30. *B. De Pontieu, R.Erdélyi, S.P.James*, *Nature*, **430**, 536D, 2004.

31. *E.Khutshishvili, V.Kulidzanishvili, T.Kvernadze et al.*, *Astrophys. Space Sci.*, **354**, 259, 2014.
32. *D.Khutsishvili, T.V.Zaqarashvili, E.Khutsishvili et al.*, *Astron. Astrophys.*, (CAUCASUS), **2**, id. 19, 2017.
33. *G.M.Nikolski, A.G.Platova*, *Sol. Phys.*, **18**, 403, 1971.
34. *E.Tavabi, S.Koutchmy, A.Ajabshirizadeh*, *New Astron.*, **16**, 296, 2011a.
35. *V.Kukhianidze, T.V.Zaqarashvili, E.Khutsishvili*, *Astron. Astrophys.*, **449**, 35, 2006.
36. *T.V.Zaqarashvili, E.Khutsishvili, V.Kukhianidze et al.*, *Astron. Astrophys.*, **474**, 627, 2007.
37. *Y.-H.Kim, S.-C.Bong, Y.-D.Park et al.*, *J. Korean Astron. Soc.*, **41**, 173, 2008.
38. *H.Ebadi, T.V.Zaqarashvili, I.Zhelyazkov*, *Astrophys. Space Sci.*, **337**, 33, 2012.
39. *B.K.Carter, R.Erdelyi*, *Astron. Astrophys.*, **475**, 323, 2007.
40. *D.B.Jess, M.Mathioudakis, R.Erdélyi et al.*, *Science*, **323**, 1582, 2009.
41. *R.Erdélyi, B.Pinter, C.Malins*, *Astron. Nachr.*, **328**, 305, 2007.
42. *T.V.Zaqarashvili, R.Erdelyi*, *Space Sci. Rev.*, **149**, 335, 2009.
43. *D.Kuridze, G.Verth, M.Mathioudakis et al.*, *Astrophys. J.*, **779**, 8220, 2013.
44. *G.Verth, M.Goossens, J.-S.He*, *Astrophys. J. Lett.*, **733**, 15D, 2011.
45. *B. De Pontieu, S.W.McIntosh, M.Carlsson et al.*, *Science*, **318**, 1574, 2007.
46. *H.Ebadi, T.V.Zaqarashvili, I.Zhelyazkov*, *Astrophys. Space Sci.*, **337**, 33, 2012.
47. *T.J.Okamoto, B. De Pontieu*, *Astrophys. J.*, **736**, L24, 2011.
48. *H.Socas-Navarro I, D.Elmore*, *Astrophys. J.*, **619**, L195, 2005.
49. *N.R.Lomb*, *Astrophys. Space Sci.*, **39**, 447, 1976.
50. *J.D.Scargle*, *Astrophys. J.*, **263**, 835, 1982.