

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ В ВОЛОКНЕ И ЕГО ОКРЕСТНОСТЯХ: ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

SPECTRAL OBSERVATIONS OF THE MOTIONS IN AND AROUND FILAMENT: TRANSVERSE OSCILLATIONS

Г.П. Машнич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mashnich@iszf.irk.ru*

В.Е. Томин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, tomin@iszf.irk.ru*

В.А. Пуляев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vasily_p@iszf.irk.ru*

G.P. Mashnich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mashnich@iszf.irk.ru*

V.E. Tomin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, tomin@iszf.irk.ru*

V.A. Pulyaev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vasily_p@iszf.irk.ru*

Аннотация. Цель работы — на основе данных спектральных наблюдений в Саянской солнечной обсерватории (ССО) провести поиск признаков, которые указывают на связь колебательных движений в волокне с нижними слоями солнечной атмосферы. Мы выявили также, на каких масштабах обнаруживаются поперечные колебания в волокне. Были проанализированы одновременно полученные временные ряды интенсивности и вариаций доплеровской скорости в фотосфере ($\text{FeI } \lambda 4897 \text{ \AA}$) и хромосфере ($\text{H}\beta \lambda 4861 \text{ \AA}$) в области большого спокойного волокна при различных его положениях на Солнце. В распределении малоамплитудных колебаний доплеровской скорости вне волокна и на его краю были обнаружены небольшие участки, где вейвлет-спектры в диапазоне частот 2–4 мГц в хромосфере совпадают с вейвлет-спектрами в фотосфере. В поперечных (горизонтальных) смещениях относительно оси волокна в плоскости неба было обнаружено два типа колебаний. Отдельные участки волокна размером около 2"–4" совершали поперечные колебания в диапазоне частот $5 > f > 1$ мГц с амплитудой смещения 0.3–2.1 Мм. При положении фрагмента волокна на центральном меридиане спектры его поперечных колебаний демонстрируют два частотных диапазона: $5 > f > 1$ мГц и около 0.5 мГц. Когда волокно удаляется от центрального меридиана Солнца, в спектре присутствует только один пик около $f \approx 0.26$ мГц.

Ключевые слова: солнечная фотосфера, хромосфера, колебания в волокнах.

Abstract. The work based on spectral observations from Sayan Solar Observatory (SSO) is aimed at searching for signs that indicate a connection between oscillatory motions in the filament and the lower layers of the solar atmosphere. We also figure out on which scales transverse oscillations are detected in the filament. We analyze the simultaneously obtained time series of intensities and variations in the Doppler velocity in the photosphere ($\text{FeI } \lambda 4897 \text{ \AA}$) and in the chromosphere ($\text{H}\beta \lambda 4861 \text{ \AA}$) in the region of a large quiescent filament at its different positions on the Sun. In the distribution of the small-amplitude Doppler velocity oscillations beyond the filament and on its edge, we have found small areas, where wavelet spectra within 2–4 mHz in the chromosphere coincide with the wavelet spectra in the photosphere. In the filament transverse (horizontal) displacements in the sky plane, we have revealed oscillations of two types. Individual filament structures (about 2"–4" in size) oscillate transversely within $5 > f > 1$ mHz at the 0.3–2.1 Mm displacement amplitude. The transverse oscillation spectra of the filament fragment at its position on the central meridian demonstrate two frequency ranges: $5 > f > 1$ mHz and ~ 0.5 mHz. There is only one peak (~ 0.26 mHz) in the spectrum when the filament moves away from the Sun's central meridian.

Keywords: solar photosphere, chromosphere, filament oscillations.

ВВЕДЕНИЕ

Протуберанцы — плотные $((3\div 6)10^{11} \text{ см}^{-3})$ холодные структуры ($\sim 8000\text{--}12000 \text{ K}$), которые наблюдаются над солнечным лимбом и могут долгое время сохранять равновесие в горячей короне ($\sim 10^6 \text{ K}$) (см., например, [Tandberg-Hanssen, 1995]). На диске протуберанцы наблюдаются как темные вытянутые структуры, называемые волокнами. Форма и динамика

волокон/протуберанцев очень разнообразны и обусловлены в основном конфигурацией магнитного поля. Важным источником волновой энергии на Солнце считается подфотосферная конвекция, генерирующая вихревые потоки и широкий спектр МГД-колебаний. Deubner, Fleck [1989] исследовали вариации скорости и интенсивности, используя линии, образующиеся в фотосфере и нижней хромосфере. Анализируя разностные спектры, авторы обнаружили большие

волновые числа в области частот 2–4 мГц, что соответствует теоретическим представлениям о свойствах гравитационных волн и подтверждает их существование в фотосфере. Исследуя возможные источники нагрева хромосферы, Jefferies et al. [2006] показали, что наклонные линии магнитного поля на границах крупномасштабных конвективных ячеек (супергранул) обеспечивают «порталы», через которые магнитоакустические волны с частотой колебаний меньше 5 мГц могут распространяться в солнечную хромосферу. Kumar et al. [2023] провели поиск признаков распространения магнитоакустических волн в мелкомасштабных магнитных полях по фотосферным доплерограммам, рассчитанным по данным SDO/HMI (Solar Dynamics Observatory/Helioseismic and Magnetic Imager), и хромосферным доплерограммам, полученным в линии CaII 8542 Å с помощью MAST (Multi-Application Solar Telescope) Удайпурской солнечной обсерватории. Используя вейвлет-анализ, Kumar et al. [2023] нашли, что мощность магнитоакустических колебаний в фотосфере и хромосфере показывает соответствие в диапазоне 2.5–4 мГц. Результаты Kumar et al. [2023] иллюстрируют распространение колебаний (2.5–4 мГц) из фотосферы в хромосферу вдоль наклонных линий магнитного поля. По мнению Griffiths et al. [2018], глобальные магнитоакустические моды могут либо просачиваться из фотосферы в вышележащую атмосферу, либо напрямую распространяться в атмосферу вдоль линий магнитного поля, особенно когда эти магнитные волноводы отклоняются от вертикального направления. Эти авторы провели расчеты спектров мощности колебаний интенсивности в девяти полосах пропускания SDO/AIA (Atmospheric Imaging Assembly) в случайно выбранных точках: в активной области, спокойном Солнце и корональной дыре в период солнечного минимума. Griffiths et al. [2018] полагают, что сильные 3- и 5-минутные колебания в спектрах мощности, обнаруженные во всех каналах и выбранных областях на Солнце, а также результаты их модельных расчетов могут служить доказательством существования глобального механизма возбуждения колебаний.

В спокойных и активных волокнах/протуберанцах малоамплитудные колебания обнаруживаются в структурах размером от долей секунды до нескольких секунд. На основе наблюдений в различных спектральных линиях для колебаний волокон и протуберанцев малой амплитуды выявлен широкий диапазон периодов — от 1 мин до 1 ч и больше [Landman et al., 1977; Wiehr et al., 1984; Bashkirtsev, Mashnich, 1984; Tsubaki, Takeuchi, 1986; Balthasar et al., 1986; Molowny-Horas et al., 1997; Ning et al., 2009a, b]. Фильтровые H α -изображения Солнца с высоким разрешением [Lin et al., 2005] позволили увидеть, что волокна состоят из многочисленных нитевидных структур. Поперечный размер (0.2") сверхтонких структур находится на пределе возможного при наземных наблюдениях пространственного разрешения. В этих тонких структурах присутствуют колебания доплеровской скорости и колебательные движения поперек своей оси в плоскости неба [Lin et al., 2009; Lin, 2011]. В последние десятилетия многие исследователи используют данные с высоким пространствен-

ным разрешением, полученные с помощью приборов космических обсерваторий [Hillier et al., 2013; Ofman et al., 2015; см. обзор Arregui et al., 2018]. Hillier et al. [2013] провели статистическое исследование поперечных колебаний в большом количестве нитевидных структур спокойного протуберанца по данным с высоким пространственным разрешением (0.1"), полученным Hinode/SOT (Solar Optical Telescope). Авторы обнаружили колебания с периодами от 50 до 6000 с и с амплитудами от 0.2 до 23 км/с, а также показали, что мощность спектра поперечных колебаний тонкоструктурных элементов в спокойном протуберанце согласуется со спектром мощности горизонтальных движений фотосферных магнитных полей. Ofman et al. [2015], также используя данные Hinode/SOT в линиях CaII и H α , изучили волновую активность в основании протуберанца и обнаружили распространяющиеся вверх от хромосферы в вещество протуберанца квазипериодические колебания плотности с типичными периодами 5–11 мин и длинами волн <2000 км. Ofman, Kusera [2020] идентифицировали эти колебания с нелинейными быстрыми магнитозвуковыми волнами, сравнив модельное комбинированное воздействие нелинейных волн и потоков на плазму с наблюдаемой динамикой движений в протуберанце. Статистически значимое исследование различных типов колебаний волокон и их свойств в период высокой солнечной активности выполнено Luna et al. [2018] по ежедневным H α -данным GONG (Global Oscillation Network Group) за период с января по июнь 2014 г. Колебания были классифицированы по амплитуде: низкоамплитудные со скоростями меньше 10 км/с и высокоамплитудные со скоростями больше 10 км/с. Средний период 58 ± 15 мин определен для обоих типов колебаний, а угол между направлением движений и телом волокна в среднем составил 27°. Этот угол согласуется с наблюдаемым направлением магнитных полей волокон [Leroy, 1987; Tandberg-Nanssen, 1995].

Наша работа основана на данных спектральных наблюдений с пространственным разрешением 1"–1.5", проведенных в Саянской солнечной обсерватории (ССО). Данные получены одновременно в фотосфере (FeI λ 489.7 нм) и хромосфере (H β λ 486.1 нм) в области большого спокойного волокна. Цель работы — проанализировать взаимосвязи фотосферных и хромосферных движений и колебаний в волокне и его окрестности, а также исследовать направление колебательных движений в волокне.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились на Горизонтальном автоматизированном солнечном телескопе ССО [Осак и др., 1979]. Телескоп, питающий спектрограф, состоит из целостатной установки, главного сферического зеркала диаметром 80 см с фокусным расстоянием 20 м. Фотоэлектрический гид компенсирует вращение и удерживает изображение Солнца на спектральной щели с точностью 1". Ширина щели спектрографа соответствует 1" на поверхности Солнца, но фактическое пространственное разрешение часто

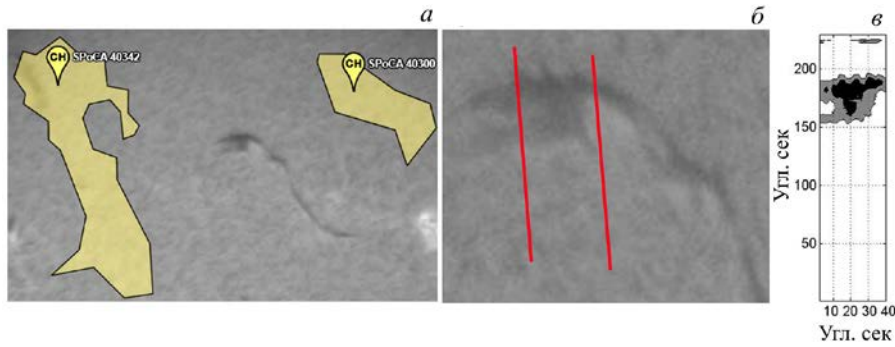


Рис. 1. Положение волокна и корональных дыр на диске по данным [http://Helioviewer.org] на момент наших наблюдений 26.06.2023 00:45 UT (а); На-изображение волокна в 26.06.2023 00:45 UT по данным GONG, красные линии отмечают область сканирования (б); фрагмент волокна в линии H β по данным наших спектральных наблюдений 26.06.2023 00:57 UT (в)

ограничивается условиями видимости примерно до 1.5"–2". Автоматизированная система управления телескопом позволяет контролировать состояние инструмента и задавать параметры наблюдений. Для регистрации спектров была использована камера FLI ProLine с матрицей 1024×1024 пкс с размером пикселя 24 мкм. Размер датчика 24.5×24.5 мм позволяет разместить вдоль дисперсии в V порядке область спектра около 8 Å. Мы использовали спектральный диапазон 4857–4865 Å, который включает фотосферную линию FeI 4859 Å и хромосферную линию H β 4861 Å.

Для анализа мы выбрали большое спокойное волокно в северном полушарии, которое в июне 2023 г. проходило по диску Солнца второй оборот. К востоку и западу от волокна располагались корональные дыры (рис. 1, а). Для визуальной проверки возможных источников колебаний в волокне использовались данные SDO/AIA для временных интервалов, включающих 1 ч до начала наблюдений и время наблюдений. На этих интервалах времени во все дни наблюдений вблизи волокна не были обнаружены поярчания, джеты, нановспышки, EIT-волны и другие возбудители колебаний [Tripathi et al., 2009]. Надо отметить, что во время первого прохождения по диску Солнца в мае 2023 г. волокно частично дважды эруптировало с последующим восстановлением. Сбор данных осуществляется путем сканирования, т. е. съемки серии спектрограмм пошаговым перемещением изображения Солнца по щели спектрографа. Область, включающая фрагмент волокна, сканируется с каденцией 57 с и с пространственным шагом 2". Длина щели соответствует 230" на поверхности Солнца. Каждый скан состоит из 20 кадров (спектрограмм, полученных с экспозицией 0.1 с). С учетом бинирования и пространственного шага область сканирования имела размер 40"×230". Здесь будут рассмотрены серии сканов, полученные 26.06.2023 для фрагмента волокна с координатами E00N33, когда волокно находилось на центральном меридиане, и 28.06.2023 для фрагмента волокна с координатами W25N33. Выбраны серии продолжительностью 145 мин (00:34–02:59 UT) 26.06.2023 и 179 мин (00:09–03:06 UT) 28.06.2023, зарегистрированные при наилучших условиях наблюдения. Перед началом обработки серии спектрограмм

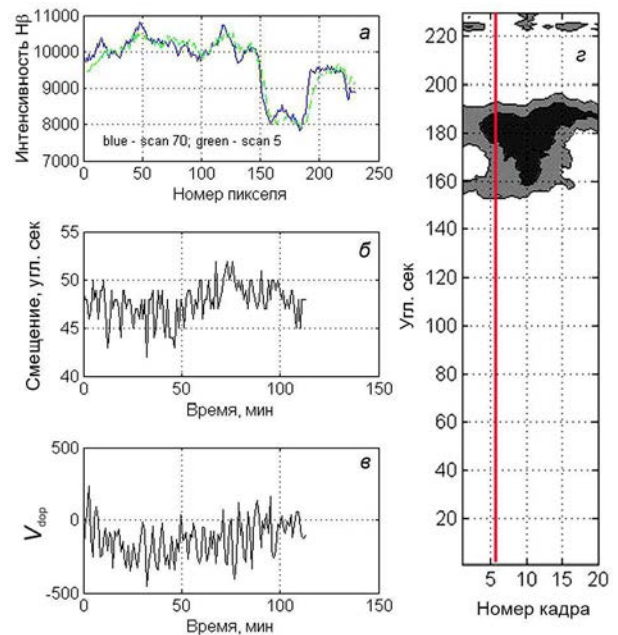


Рис. 2. Распределение интенсивности линии H β вдоль спектральной щели (а) в пятом кадре скана (отмечен красной вертикальной линией на панели д) на разных этапах сканирования; зеленым и синим цветом показаны профили интенсивности в 5-м и 70-м сканах соответственно. Смещение волокна в проекции на плоскость неба в зависимости от времени (б). Значения доплеровской скорости в хромосфере волокна в точках с минимальной интенсивностью (в). Карта интенсивности сканируемой области (д)

создается усредненный реперный кадр [Mashnich et al., 2009; Mashnich, Kiselev, 2019]. Доплеровская скорость определяется как смещение центра медианы контура рабочей линии от фиксированного положения в реперном кадре в каждой строке спектрограммы. Линия H β полушириной 4.2 Å формируется преимущественно в хромосфере, где магнитное давление доминирует над газовым [Zhang, 2023]. Чтобы исключить вклад хромосферы, расчет доплеровской скорости мы обычно выполняем вблизи ядра линии H β на расстоянии $\pm(0.4-0.45)$ Å от центра линии.

Для выявления поперечных колебаний мы применяем метод наименьшей интенсивности [Mashnich et al., 2012]. Используя этот метод, мы полагаем, что за время наблюдений условия образования линии H β

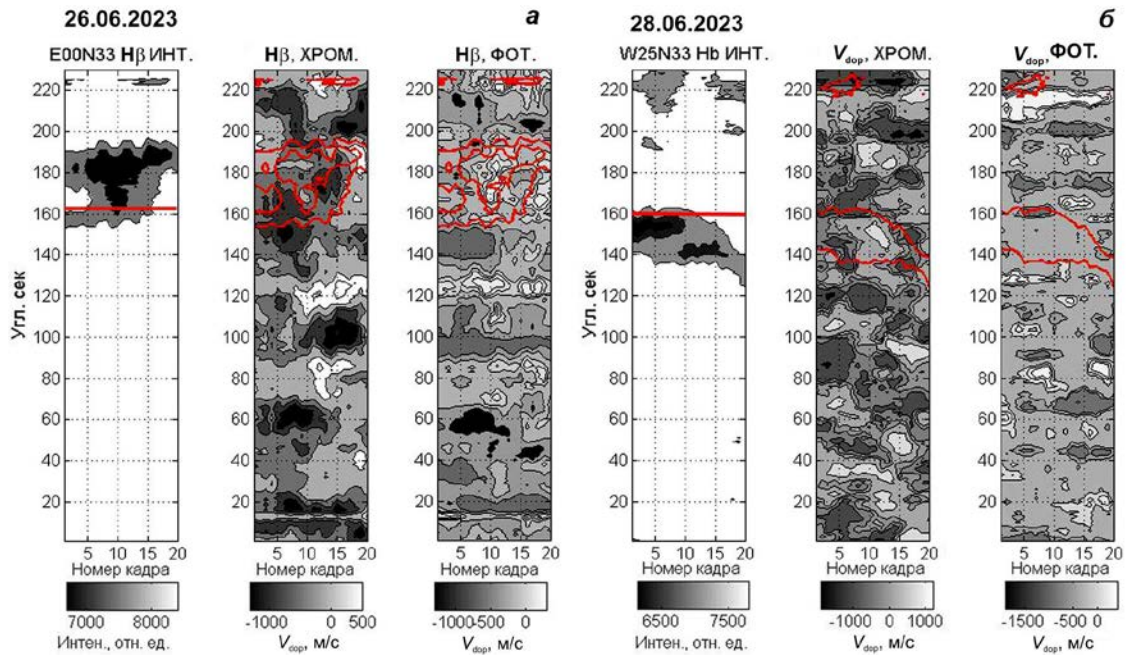


Рис. 3. Карты распределения интенсивности линии Н β (слева) и доплеровской скорости в хромосфере (посередине) и фотосфере (справа) в области сканирования 26 (а) и 28 (б) июня 2023 г. Красные контуры показывают положение волокна с 50–60 % уровнем интенсивности линии Н β . Красные горизонтальные линии отмечают строки матрицы, для которых построены пространственно-временные диаграммы интенсивности и скорости для определения поперечных колебаний в плоскости неба

в спокойном волокне меняются незначительно. Как видно из рис. 2, а, минимальная интенсивность линии Н β вдоль щели спектрографа четко определяет положение волокна на щели. При фиксированном положении волокна на спектральной щели программа обработки находит номер пикселя с минимальным значением интенсивности в каждом кадре временной серии спектров, образуя временной ряд смещений волокна в проекции на плоскость неба (см. рис. 2, б). По этим данным делается оценка амплитуды смещений волокна.

При поиске поперечных движений волокна в проекции на плоскость неба используется другой способ обработки спектрограмм, полученных в режиме сканирования. Мы выбираем расположенную в волокне строку матрицы (рис. 3, красные горизонтальные линии). Двумерная диаграмма время–расстояние строится путем извлечения значений интенсивности и доплеровской скорости в заданной строке матрицы вдоль направления сканирования в каждом скане (временном шаге). Диаграммы интенсивности показывают положение фрагмента волокна в заданной строке матрицы за время наблюдений. Для заданной строки матрицы строятся также диаграммы хромосферных и фотосферных доплеровских скоростей, которые приведены ниже на рис. 7.

2. СВЯЗЬ ДВИЖЕНИЙ ФОТОСФЕРНОЙ И ХРОМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Пространственно-временные данные, полученные сканированием области на Солнце, позволяют анализировать временные ряды значений интенсивности

и скорости в каждой точке этой области. По результатам расчетов построены карты распределения интенсивности и доплеровской скорости в области 40"×230", которая включает фрагмент волокна. На рис. 3 для примера показаны карты пространственного распределения интенсивности и доплеровских скоростей в хромосфере и фотосфере для отдельного скана. При просмотре видеоролика, собранного из последовательных сканов, видно, что холмы доплеровской скорости сталкиваются, сливаются и разделяются, постепенно меняя знак.

Для анализа колебаний в фотосфере и хромосфере использованы временные ряды значений интенсивности линии Н β и доплеровской скорости в хромосфере и фотосфере в каждой точке скана пространственно-временной серии изображений. По результатам фурье-анализа временных рядов для различных диапазонов частот построены карты распределения колебаний, на которых представлена пространственная локализация пиков на уровне мощности 0.7. В области волокна в распределениях колебаний обнаруживаются участки с характерными для волокон/протуберанцев колебаниями в диапазонах частот 0.24–0.26 мГц (~60 мин), 0.6–0.8 мГц (20–25 мин), 1.3–0.8 мГц (10–13 мин). В работе мы уделили внимание колебаниям в диапазоне частот 2–4 мГц, которые на картах распределений колебаний в хромосфере и в фотосфере локализованы на одних и тех же участках. На рис. 4 синими крестиками отмечены места пространственного совпадения частотного спектра колебаний доплеровской скорости в фотосфере и хромосфере вне волокна и на его краях, вейвлет-спектры для которых приведены на рис. 5 и 6.

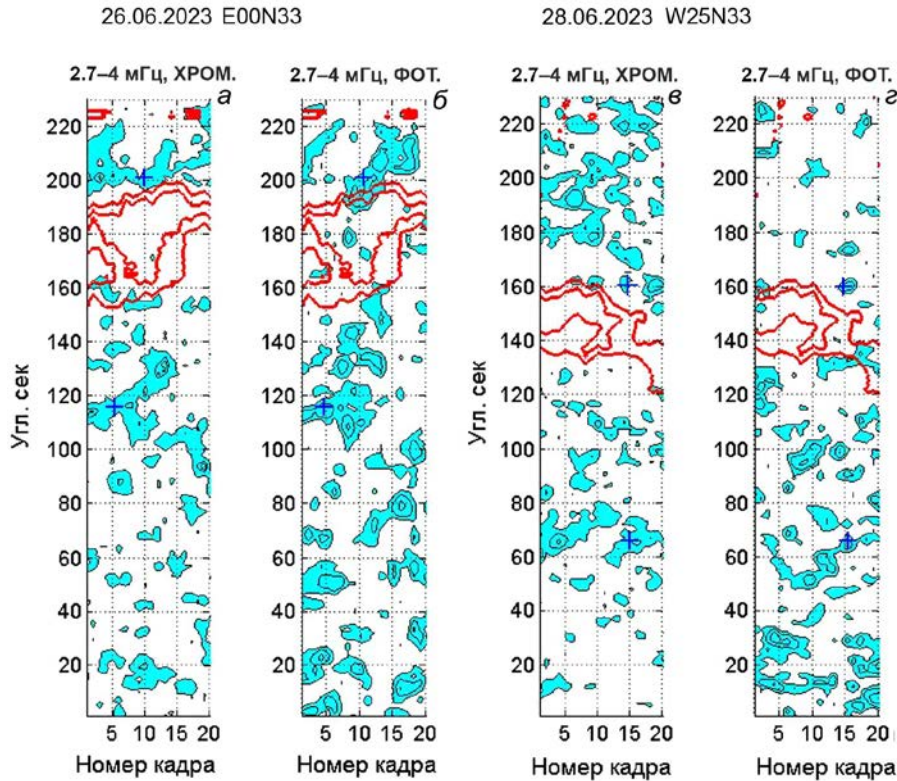


Рис. 4. Распределение колебаний в диапазоне частот 2.7–4 мГц в волокне и его окрестностях в хромосфере (а, в) и фотосфере (б, г) 26 (слева) и 28 (справа) июня 2023 г. на уровне 0.7 максимального значения спектра мощности на данной частоте. Красными контурами показано местоположение волокна, синими крестиками отмечены места пространственного совпадения частотного спектра колебаний в фотосфере и хромосфере на краях волокна и вне его, вейвлет-спектры для которых приведены на рис. 5, б

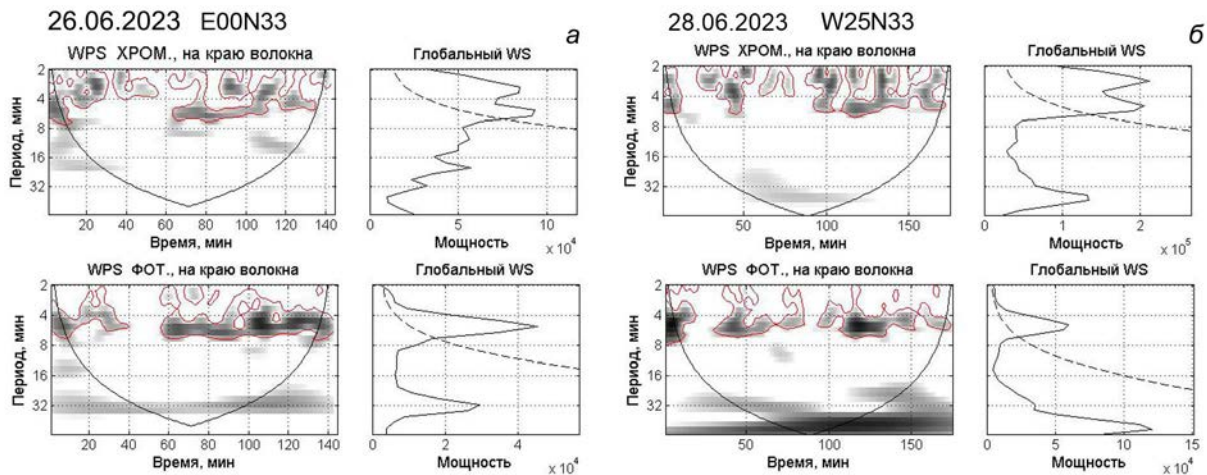


Рис. 5. Вейвлет-анализ временных рядов доплеровской скорости на краю волокна в хромосфере (вверху) и фотосфере (внизу) на основе данных наблюдений 26 (а) и 28 (б) июня 2023 г. На спектрах мощности (левые панели) наиболее мощная периодическая компонента показана черно-серым цветом с красным контуром, который соответствует уровню достоверности 85 %, на глобальных спектрах (правые панели) штриховой линией отмечен уровень достоверности 95 %

Вейвлет-анализ [Тоггенсе, Сомро, 1998] позволяет проследить временное изменение мощности спектров колебаний и выявить нестационарные явления в характеристиках исследуемых параметров.

На краю волокна широкий максимум с частотой $f > 2$ мГц разделяется на два пика ~ 3 и ~ 5 мГц (рис. 5). В деталях временная структура вейвлет-спектров фотосферных и хромосферных колебаний в диапазоне 3–3.5 мГц во многом совпадает. Карты распре-

деления мощности колебаний около 3 мГц ясно показывают подавление мощности колебаний в месте расположения волокна (см. рис. 4, а, в). Это, возможно, объясняется тем, что колебания с $f > 2$ мГц свойственны тонким структурам, заполняющим тело волокна. Предполагается (см., например, [Lin et al., 2009; Lin, 2011; Mashnich et al., 2009]), что на луче зрения интегрируется множество волоконцев с несколькими отличающимися скоростями, амплитудами

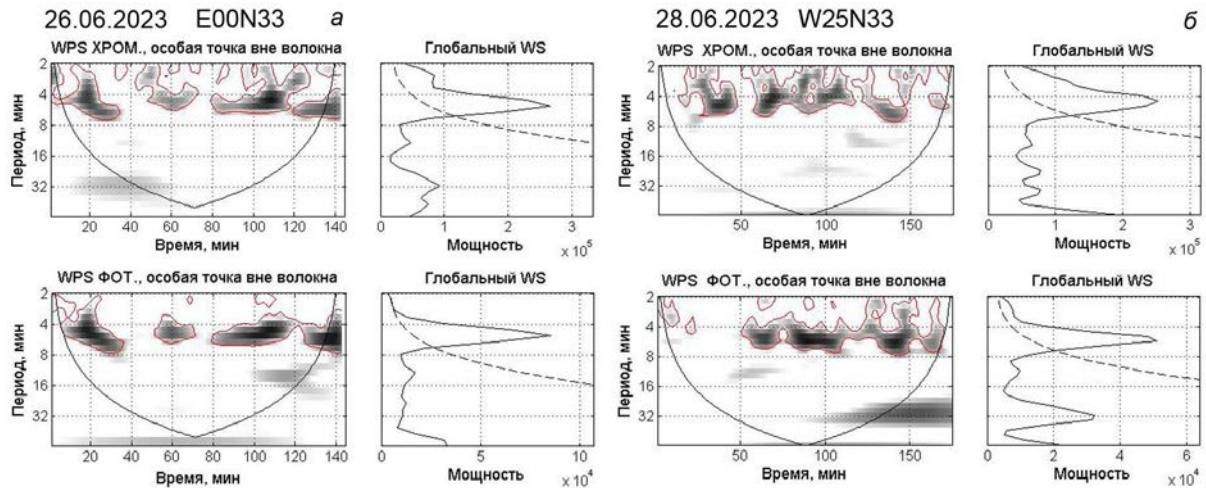


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для особых точек вне волокна

и фазами колебаний. Различие этих параметров определяется локальными условиями. Плотность на краях волокна уменьшается, это позволяет разрешить отдельные тонкие структуры, составляющие волокно, и измерить характеристики их колебаний. Мы обнаружили также в распределениях колебаний вне волокна небольшие участки пространственного совпадения колебаний доплеровской скорости в фотосфере и хромосфере в диапазоне частот 2–4 МГц. Обнаружена корреляция временных изменений мощности вейвлет-спектров, хромосферной и фотосферной доплеровской скорости по данным наблюдений 26.06.2023. Кроме того, пики около 3.5 МГц в глобальных вейвлет-спектрах фотосферы и хромосферы совпадают (см. верхнюю и нижнюю правые панели рис. 6, а). Хромосферные вейвлет-спектры также указывают на присутствие характерных для хромосферы колебаний частотой около 5 МГц. Результаты, аналогичные представленным на рис. 6, а, мы нашли в других местах пространственного совпадения распределений фотосферных и хромосферных колебаний. Исследуемая область 28.06.2023 переместилась на 25° к западу от центрального меридиана. В этом случае в вейвлет-спектрах фотосферы и хромосферы временное совпадение мощности обнаруживается в отдельные периоды наблюдений (см. рис. 6, б), причем наблюдается небольшое расхождение пиков в глобальных вейвлет-спектрах хромосферы (4 МГц) и фотосферы (3.5 МГц).

3. ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВОЛОКНА

Двадцать шестого июня 2023 г. волокно находилось на центральном меридиане, спектральная щель перпендикулярно пересекала тело волокна. Положение волокна на центральном меридиане предпочтительно при исследовании поперечных относительно тела волокна колебаний в плоскости неба, поскольку исключает большую часть эффектов проекции. Компоненту поперечных движений волокна в плоскости неба (в горизонтальной плоскости) относительно его оси можно определить по минимальной

интенсивности спектральной линии вдоль щели спектрографа в случае одномерных наблюдений (вертикальная красная линия на правой панели рис. 2). Мы строим временные ряды значений смещений волокна в каждом кадре и проводим анализ горизонтальных поперечных колебаний деталей волокна размером ~2". Из данных по 20 кадрам получены амплитуды смещений в диапазоне 0.3–2.1 Мм и периоды колебаний 200–990 с. Эти результаты согласуются с данными о поперечных колебаниях сверхтонких структур (0.1") волокна (см., например, [Hillier et al., 2013]). Обнаружение поперечных движений фрагмента волокна в серии спектров, полученных сканированием, не является тривиальной задачей. При обработке серии сканов мы строим двумерную диаграмму время–расстояние путем извлечения значений интенсивности линии H β и доплеровской скорости в фотосфере и хромосфере в заданной строке матрицы для строк матрицы, отмеченных красными горизонтальными линиями на рис. 3.

Вариации интенсивности линии H β на диаграмме время–расстояние (см. рис. 7) отражают горизонтальные поперечные движения всего фрагмента волокна относительно заданной строки матрицы. Периодическая смена знака на картах поля скоростей в кадре, вероятно, свидетельствует о движениях по спиралям. Из поляриметрических измерений магнитного поля в спокойных протуберанцах [Leroy et al., 1984; Orozco Suárez et al., 2014] известно, что вектор магнитного поля составляет угол 20°–30° с осью волокна. Такие же углы между осью волокна и направлением движений для всех типов колебаний определены на основе статистического анализа большого количества наблюдений Luna et al. [2018].

Временные ряды вариаций интенсивности на рис. 8 получены из локальных значений интенсивности на диаграмме время–расстояние, определенных в кадрах вблизи края волокна. После удаления из временных рядов интенсивности линейного тренда, обусловленного изменением высоты Солнца над горизонтом, к ним применялся вейвлет-анализ для определения периодичностей в горизонтальных поперечных

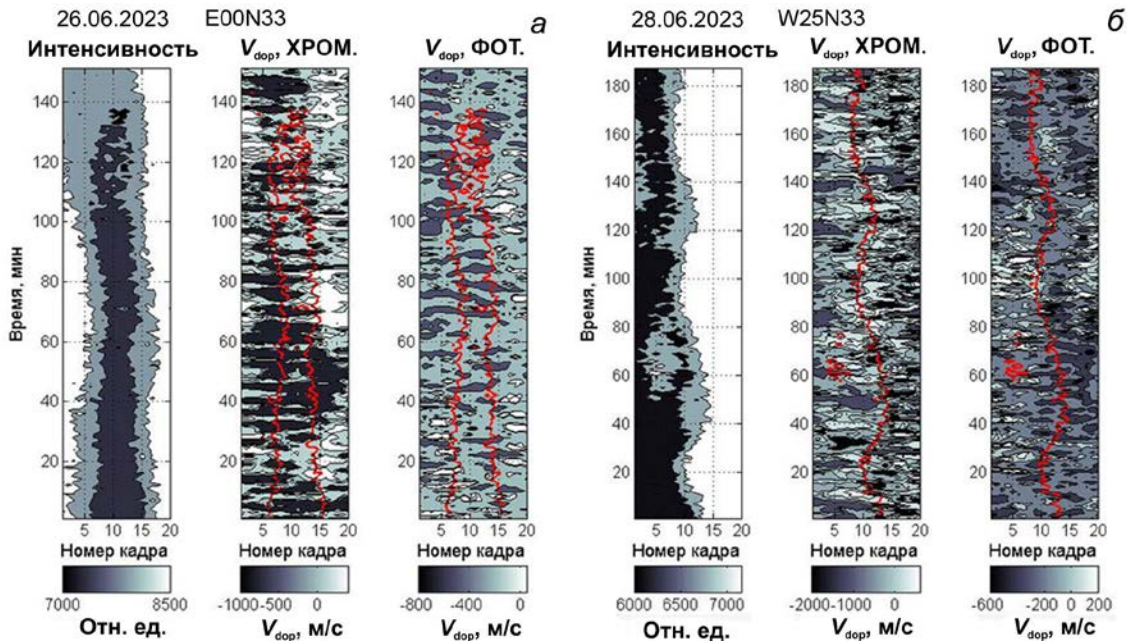


Рис. 7. Временные вариации интенсивности, показывающие положение фрагмента волокна (левые панели), и временные ряды доплеровской скорости в хромосфере (средние панели) и фотосфере (правые панели) в заданной строке матрицы по данным наблюдений 26 (а) и 28 (б) июня 2023 г. Строки матрицы, для которых строятся диаграммы время–расстояние, отмечены горизонтальными красными линиями на левых панелях рис. 3

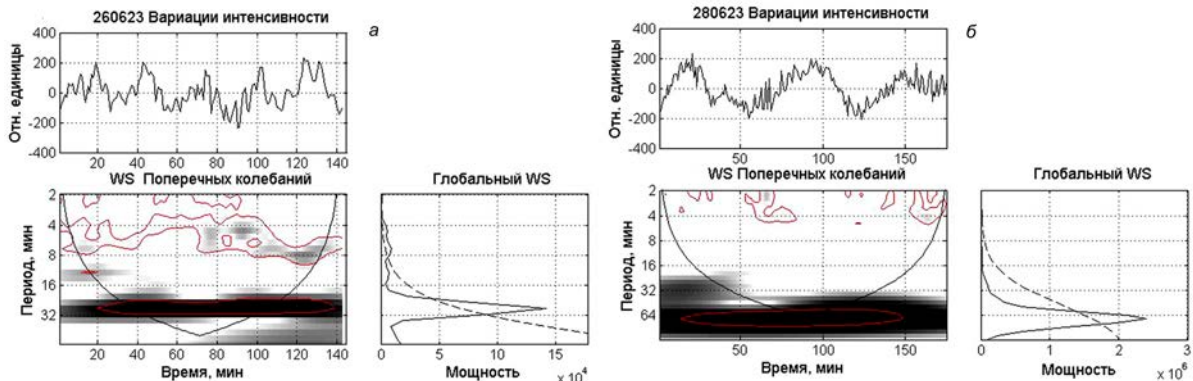


Рис. 8. Полученные по данным наблюдений 26 (а) и 28 (б) июня 2023 г. вариации интенсивности, связанные со сдвиговыми движениями волокна относительно его оси (вверху); вейвлет-спектры мощности поперечных колебаний (внизу слева), красный контур — уровень достоверности 85 %; глобальный спектр мощности (внизу справа), штриховая линия — уровень достоверности 95 %

движениях волокна. По данным наблюдений 26.06.2023 (см. рис. 8, а) значимые периоды поперечных колебаний волокна определяются в двух диапазонах: $>f> 1$ мГц и около 0.5 мГц (30 мин). При удалении волокна от центрального меридиана 28.06.2023 (см. рис. 8, б) в вейвлет-спектре присутствует один пик около 0.26 мГц (64 мин). За время наших наблюдений затухания длиннопериодических поперечных колебаний не были выявлены. В модели глобальных поперечных колебаний и устойчивости спокойного протуберанца Kolotkov et al. [2016] рассматривают протуберанец как прямой провод с током. «Глобальными» Kolotkov et al. [2016] называют колебания структуры как целого, в отличие от колебаний отдельных волоконцев. Свойства как вертикальных, так и горизонтальных колебаний определяются плотностью и высотой протуберанца над фотосферой и величиной тока в нем. Протуберанец может быть одновременно устойчивым к колебаниям

в обоих направлениях, когда ток в нем больше, чем в фотосферных источниках, а его высота меньше половины расстояния между ними. В этой модели вертикально и горизонтально поляризованные колебания не связаны, а периоды колебаний в обоих направлениях независимы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Используя спектральные сканы области с волоконном размером $40'' \times 230''$, мы одновременно получаем временные ряды интенсивности и доплеровской скорости в фотосфере и хромосфере в волокне и вне его. Пространственное разрешение позволяет нам обнаружить коллективные колебания, усредненные по области $1'' \times 2''$. В распределении мощности колебаний доплеровской скорости в диапазоне частот 2–4 мГц обнаружены небольшие участки на краях волокна и вне его, где одновременно локализованы

фотосферные и хромосферные колебания. Мы нашли, что корреляция временных изменений фотосферных и хромосферных вейвлет-спектров доплеровской скорости в диапазоне частот 2–4 мГц проявляется на краях волокна. Это согласуется с результатами [Ofman et al., 2015; Ofman, Kusera, 2020], полученными с более высоким разрешением. Мы получили тот же диапазон периодов колебаний, но значения амплитуды меньше. Мы нашли также вне волокна в особых точках пространственного совпадения колебаний однозначную корреляцию временных изменений мощности хромосферных и фотосферных вейвлет-спектров доплеровской скорости в диапазоне частот 2–4 мГц. Этот результат согласуется с выводами, представленными в работе [Kumar et al., 2023], в которой приведены наблюдательные доказательства, что периодический характер взаимодействия акустических волн конвективной зоны с фоновыми магнитными полями является причиной появления эпизодических колебаний в фотосфере и хромосфере. Корреляция временных изменений мощности фотосферных и хромосферных вейвлет-спектров колебаний скорости, обнаруженная нами, дает основание предполагать возможность проникновения фотосферных колебаний в хромосферу и волокно. В литературе такая возможность рассматривается (см., например, [Deubner, Fleck, 1989; Jefferies et al., 2006; Ofman et al., 2015; Griffiths et al., 2018]). В поперечных смещениях волокна в плоскости неба обнаружены мелкомасштабные и крупномасштабные колебания. Некоторые детали волокна размером около 2" совершали поперечные колебания в диапазоне частот $5 > f > 1$ мГц с амплитудой смещений 0.3–2.1 Мм. При положении фрагмента волокна на центральном меридиане спектры поперечных колебаний демонстрируют два диапазона частот: $5 > f > 1$ мГц и около 0.5 мГц. При удалении волокна от центрального меридиана в спектре присутствует только один пик около 0.26 мГц. В волокне одновременно наблюдаются поперечные колебания и колебания доплеровской скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В фотосфере и хромосфере на краях волокна и вне его найдено пространственное совпадение небольших областей в распределениях мощности хромосферных и фотосферных колебаний доплеровской скорости в диапазоне частот 2–4 мГц.

2. Мы обнаружили корреляцию периодических изменений мощности колебаний фотосферных и хромосферных вейвлет-спектров доплеровской скорости на краю волокна и вне его в диапазоне 2–4 мГц. Временное совпадение деталей этих спектров хорошо выражено при положении волокна на центральном меридиане.

3. Поперечные (горизонтальные) относительно оси волокна колебания с периодами 200–990 с и амплитудами смещений в диапазоне 0.3–2.1 Мм зарегистрированы в структурах волокна размером около 2".

4. Предложен способ определения поперечных смещений в плоскости неба больших фрагментов волокна с использованием спектральных наблюдений. С помощью этого способа мы зарегистрировали

поперечные колебания фрагмента волокна с периодами несколько десятков минут.

5. В волокне одновременно наблюдаются поперечные колебания и колебания доплеровской скорости.

Наблюдательные исследования колебаний малой амплитуды интенсивности и доплеровской скорости вносят вклад в понимание связи фотосферных и хромосферных колебаний, что необходимо для моделирования распространения волн из фотосферы в волокно.

Авторы благодарны рецензентам за критические замечания и предложения по улучшению текста статьи. Мы благодарим также команды SDO/AIA и GONG за возможность доступа к базам данных по сети Интернет. Наблюдения выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осак Б.Ф., Григорьев В.М., Круглов В.И., Скоморовский В.И. Автоматизированный солнечный телескоп. *Новая техника в астрономии*. 1979, т. 6, с. 84–90.
- Arregui I., Oliver R., Ballesteret J.L. Prominence oscillations. *Living Rev. Solar Phys.* 2018, vol. 15, no. 3. DOI: [10.1007/s41116-018-0012-6](https://doi.org/10.1007/s41116-018-0012-6).
- Balthasar H., Knoelker M., Wiehr E., Stellmacher G. Evidence for quasi-periodic Doppler motions in solar prominences. *Astron. Astrophys.* 1986, vol. 163, no. 1-2, pp. 343–346.
- Bashkirtsev V.S., Mashnich G.P. Oscillatory processes in prominences. *Solar Phys.* 1984, vol. 91, pp. 93–101. DOI: [10.1007/BF00213616](https://doi.org/10.1007/BF00213616).
- Deubner F.-L., Fleck B. Dynamics of the solar atmosphere I- Spatio-temporal analysis of waves in quiet solar atmosphere. *Astron. Astrophys.* 1989, vol. 213, pp. 423–428.
- Griffiths M.R., Fedun V., Erdélyi R., Zheng R. Solar atmosphere waves dynamics generated by solar global oscillating eigenmodes. *Adv. Space Res.* 2018, vol. 61, iss. 2, pp. 720–737. DOI: [10.1016/j.asr.2017.10.053](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.053).
- Hillier A., Morton R.J., Erdélyi R.A. Statistical study of transverse oscillations in a quiescent prominence. *Astrophys. J. Lett.* 2013, vol. 779, no. 2, p. 16. DOI: [10.1088/2041-8205/779/2/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/779/2/L16).
- Jefferies S.M., McIntosh S.W., Armstrong J.D., et al. Magnetoacoustic portals and the basal heating of the solar chromosphere. *Astrophys. J. Lett.* 2006, vol. 648, no. 2, pp. 151–155. DOI: [10.1086/508165](https://doi.org/10.1086/508165).
- Kolotkov D.Y., Nisticò G., Nakariakov V.M. Transverse oscillations and stability of prominences in a magnetic field dip. *Astron. Astrophys.* 2016, vol. 590, p. 120. DOI: [10.1051/0004-6361/201628501](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628501).
- Kumar H., Kumar B., Rajaguru S.P., et al. A study of the propagation of magnetoacoustic waves in small-scale magnetic fields using solar photospheric and chromospheric Dopplergrams: HMI/SDO and MAST observations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2023, vol. 247, p. 106071. DOI: [10.1016/j.jastp.2023.106071](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106071).
- Landman D.A., Edberg S.J., Laney C.D. Measurements of H β , He D3, and Ca+ λ 8542 line emission in quiescent prominences. *Astrophys. J.* 1977, vol. 218, pp. 888–900. DOI: [10.1086/155744](https://doi.org/10.1086/155744).
- Leroy J.L. Observation of prominence magnetic fields. *Proc. of the Workshop "Dynamics and Structure of quiescent solar prominences"*. Palma de Mallorca, Spain, 1987, pp. 77–113. DOI: [10.1007/978-94-009-3077-3_13](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3077-3_13).
- Leroy J.L., Bommier V., Sahal-Brechot S. New data on the magnetic structure of quiescent prominences. *Astron. Astrophys.* 1984, vol. 131, no. 1, pp. 33–44.

- Lin Y. Filament thread-like structures and their small-amplitude oscillations. *Space Sci. Rev.* 2011, vol. 158, pp. 237–266. DOI: [10.1007/s11214-010-9672-9](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9672-9).
- Lin Y., Engvold O., Rouppe van der Voort L., et al. Thin threads of solar filaments. *Solar Phys.* 2005, vol. 226, pp. 239–254. DOI: [10.1007/s11207-005-6876-3](https://doi.org/10.1007/s11207-005-6876-3).
- Lin Y., Soler R., Engvold O., et al. Swaying threads of a solar filament. *Astrophys. J.* 2009, vol. 704, pp. 870–876. DOI: [10.1088/0004-637X/704/1/870](https://doi.org/10.1088/0004-637X/704/1/870).
- Luna M., Karpen J., Ballester J.L., et al. GONG catalog of solar filament oscillations near solar maximum. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2018, vol. 236, pp. 35–65. DOI: [10.3847/1538-4365/aabde7](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aabde7).
- Mashnich G.P., Kiselev A.V. Spectral observations of the eruption of a filament. *Astronomy Rep.* 2019, vol. 63, no. 7, pp. 608–617. DOI: [10.1134/S1063772919070060](https://doi.org/10.1134/S1063772919070060).
- Mashnich G.P., Bashkirtsev V.S., Khlystova A.I. Spatial distribution of oscillations in filaments. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2009, vol. 49, no. 7, pp. 891–897. DOI: [10.1134/S0016793209070111](https://doi.org/10.1134/S0016793209070111).
- Mashnich G.P., Bashkirtsev V.S., Khlystova A.I. Small-amplitude oscillations in solar filaments. *Astronomy Reports.* 2012, vol. 56, no. 3, pp. 241–249. DOI: [10.1134/S1063772912030055](https://doi.org/10.1134/S1063772912030055).
- Molowny-Horas R., Oliver R., Ballester J.L., Baudin F. Observations of Doppler oscillations in a solar prominence. *Solar Phys.* 1997, vol. 172, pp. 181–188. DOI: [10.1023/A:1004922809950](https://doi.org/10.1023/A:1004922809950).
- Ning Z., Cao W., Goode P.R. Behavior of the spines in a quiescent prominence observed by Hinode/SOT. *Astrophys. J.* 2009a, vol. 707, pp. 1124–1130. DOI: [10.1088/0004-637X/707/2/1124](https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/2/1124).
- Ning Z., Cao W., Okamoto T.J., et al. Small-scale oscillations in a quiescent prominence observed by HINODE/SOT: Prominence oscillations. *Astron. Astrophys.* 2009b, vol. 499, pp. 595–600. DOI: [10.1051/0004-6361/200810853](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810853).
- Ofman L., Kucera T. Fast magnetosonic waves and flows in a solar prominence foot: Observations and modeling. *Astrophys. J.* 2020, vol. 899, no. 2, pp. 99–109. DOI: [10.3847/1538-4357/aba2eb](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba2eb).
- Ofman L., Knizhnik K., Kucera T., Schmieder B. Nonlinear MHD waves in a prominence foot. *Astrophys. J.* 2015, vol. 813, pp. 124–135. DOI: [10.1088/0004-637X/813/2/124](https://doi.org/10.1088/0004-637X/813/2/124).
- Orozco Suárez D., Asensio Ramos A., Trujillo Bueno J. The magnetic field configuration of a solar prominence inferred from spectropolarimetric observations in the He I 10 830 Å triplet. *Astron. Astrophys.* 2014, vol. 566, A46. DOI: [10.1051/0004-6361/201322903](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322903).
- Tandberg-Hanssen E. *The Nature of Solar Prominences*. Dordrecht: Kluwer, 1995, 413 p. DOI: [10.1007/978-94-017-3396-0](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3396-0).
- Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Americ. Meteorolog. Soc.* 1998, vol. 79, pp. 61–78. DOI: [10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- Tripathi D., Isobe H., Jain R. Large amplitude oscillations in prominences. *Space Sci. Rev.* 2009, vol. 149, pp. 283–298. DOI: [10.1007/s11214-009-9583-9](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9583-9).
- Tsubaki T., Takeuchi A. Periodic oscillations found in the velocity field of a quiescent prominence. *Solar Phys.* 1986, vol. 104, pp. 313–320. DOI: [10.1007/BF00159084](https://doi.org/10.1007/BF00159084).
- Wiehr E., Balthasar H., Stellmacher G. Oscillations of the H α emission in solar prominences. *Solar Phys.* 1984, vol. 94, pp. 285–288. DOI: [10.1007/BF00151318](https://doi.org/10.1007/BF00151318).
- Zhang H. *Solar Magnetism*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 91–101. DOI: [10.1007/978-981-99-1759-4](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1759-4). URL: <http://Heliviewer.org> (дата обращения 25 июля 2025 г.). URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 25 июля 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Машнич Г.П., Томин В.Е., Пуляев В.А. Спектральные наблюдения движений в волокне и его окрестностях: поперечные колебания. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 1, с. 5–13. <https://doi.org/10.12737/szf-121202601>.