
**НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПЯТНЕ И ЕГО ОКРЕСТНОСТЯХ.
СЛОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ**

**OBSERVATIONAL CHARACTERISTICS OF OSCILLATIONS AND WAVES
IN AND AROUND SUNSPOTS.
DIFFICULTIES IN OBSERVING AND INTERPRETING**

Н.И. Кобанов

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

А.А. Челпанов

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

N.I. Kobanov

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

A.A. Chelpanov

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

Аннотация. В настоящей статье обобщается опыт, полученный авторами в разные годы при исследовании колебательных процессов в солнечных пятнах, включая тень, полутень и ближайшие окрестности. В работе анализируется ряд факторов, затрудняющих адекватное определение некоторых характеристик распространяющихся колебаний, что может приводить к неправильной интерпретации. На примере бегущих волн полутени показано, что их распространение в строго горизонтальном направлении, сопровождаемое при этом понижением частоты, является кажущимся. Эффект вызван тем, что разные колебания распространяются вдоль разных линий магнитного поля с постепенно увеличивающимся наклоном. Это заключение справедливо и для трехминутных колебаний в хромосфере тени пятна. Изменение наклона полос на полутоновых диаграммах пространство—время, используемых для определения скорости распространения колебаний вдоль корональных петель, вызвано проекционным эффектом, а не реальным изменением скорости. Авторы предлагают использовать вспышечную модуляцию амплитуды собственных колебаний среды [Chelpanov, Kobanov, 2021] для устранения неопределенностей, возникающих при измерении фазовой разности одноименных сигналов, по которой судят о скорости распространения волновых возмущений в солнечной атмосфере.

Ключевые слова: солнечные пятна, колебания, бегущие волны полутени, вспышечная модуляция колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования колебательно-волновых явлений в солнечной атмосфере — одна из наиболее динамично развивающихся областей физики Солнца. Распространяющиеся волны вносят существенный вклад в процессы транспортировки энергии внутри солнечной атмосферы и, вероятно, в нагрев ее верхних слоев [Van Doorsselaere et al., 2020]. Кроме того,

Abstract. This paper summarizes the body of work that we have done over the years on the oscillation processes in sunspots, including their umbra, penumbra, and close vicinity. The study analyzes a number of aspects that impede adequate determining of some characteristics of propagating oscillations and lead to misinterpretation. Using running penumbral waves as an example, we show that their horizontal propagation with decreasing frequency is delusive. The effect is due to different oscillations propagating along magnetic field lines with gradually increasing inclination. This also applies to the three-minute oscillations in the sunspot umbral chromosphere. The change in the inclination of the strips in the half-tone space-time diagrams, which are employed to determine the oscillation propagation velocities along coronal loops, is caused by the projection effect as opposed to real changes in the velocity. We propose to use flare modulation of the natural oscillations of the medium to eliminate the uncertainties that arise while measuring the phase differences between signals of the same parameters, which is employed for estimating wave propagation velocities in the solar atmosphere.

Keywords: sunspots, oscillations, running penumbral waves, flare modulation of oscillations.

они используются как инструмент для зондирования солнечной атмосферы (гелиосейсмология). Исторически сложилось так, что наиболее часто в качестве объектов для исследования свойств колебаний выступают солнечные пятна [Beckers, Tallant, 1969; Giovanelli, 1972; Zirin, Stein, 1972]. Многие физические характеристики пятен резко отличаются от свойств окружающей среды, что поддерживает интерес ученых к их природе и выяснению их роли в общих

процессах, происходящих на Солнце. Количество публикаций по этой теме быстро увеличивалось, что сопровождалось пополнением и уточнением наших знаний об исследуемых процессах [Alissandrakis et al., 1988; Lites, 1988; Settele et al., 2001; Bogdan, Judge, 2006; Khomenko, Collados, 2008; Solov'ev, Kirichek, 2008, 2016; Botha et al., 2011; Zhugzhda, Sych, 2014; Felipe et al., 2014; Zhao et al., 2016; Belov et al., 2021]. Вследствие этого изменилась интерпретация некоторых наблюдаемых явлений. В частности, бегущие волны полутени (RPW — running penumbral waves) ранее объяснялись как звуковые волны, распространяющиеся в горизонтальном направлении. При этом наблюдатели отмечали, что их частота последовательно понижалась по мере удаления от внутренней границы полутени. Позднее было показано, что строго горизонтальное распространение волн в данном случае — кажущийся эффект, и реально колебания распространялись вдоль разных линий магнитного поля с постепенно увеличивающимся наклоном во внешних участках полутени [Roupe van der Voort et al., 2003; Kobanov, Makarchik, 2004; Kobanov et al., 2006; Bloomfield et al., 2007; Madsen et al., 2015; Löhner-Böttcher, Bello González, 2015; Jess et al., 2013]. Несмотря на явный прогресс в изучении колебаний в солнечных пятнах, данное направление все еще представляет большой интерес для исследователей [Jess et al., 2023].

Цель этой работы заключается в анализе ряда факторов, затрудняющих адекватное определение характеристик распространяющихся колебаний и способных привести к неправильной интерпретации наблюдаемых процессов.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Использовались данные наблюдений, проводившихся на Автоматизированном солнечном телескопе (АСТ) [Осак и др., 1979] Саянской солнечной обсерватории в разные годы, а также данные из архива космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO). АСТ состоит из целостной установки с плоскими зеркалами диаметрами 800 мм и главного сферического зеркала диаметром 800 мм с фокусным расстоянием 20 м. В центре главного зеркала расположено вспомогательное зеркало фотогида диаметром 100 мм и с фокусным расстоянием 19 м. С помощью четырех пар фотоэлементов, установленных на краях изображения, фотогид обеспечивает фиксацию изображения с точностью не хуже 1" за три часа. Телескоп осуществляет автоматическую компенсацию смещения элементов изображения, вызванного собственным вращением Солнца, и может выполнять сканирование изображения в заданном направлении. Призма Дове, установленная перед входной щелью спектрографа, позволяет ориентировать объект относительно выходной щели спектрографа. Пространственный размер пикселя CCD-камеры составляет 0.24" и вдоль дисперсии спектрографа соответствует 6–8 мÅ в зависимости от спектрального порядка. Набор поляризационной оптики позволяет регистрировать сигналы напряженности магнитного поля и лучевой скорости с использованием электрооптического модулятора поляризации или в безмодуля-

ционном режиме [Kobanov, 2001]. При выполнении временных серий каденция составляла от пяти до 16 с, в зависимости от задачи и условий наблюдений. Для того чтобы не возникали ложные сигналы низкой частоты вследствие стробоскопического эффекта, время экспозиции должно в несколько раз превышать длительность интервала между соседними кадрами. Иногда для достижения этого приходилось жертвовать интенсивностью входного светового пучка, регулируя ее с помощью нейтральных фильтров. Узкополосную частотную фильтрацию сигналов мы производили с использованием прямого и обратного преобразований Фурье. Для наблюдений мы подбирали одиночные пятна правильной формы, полагая, что результаты наблюдений пятен сложной конфигурации отличаются индивидуальностью, что затрудняет выявление общих закономерностей. Мы старались избегать пятен, содержащих неоднородности в тени типа umbral flashes [Turova et al., 2005; French et al., 2023] и umbral dots [Tian, Petrovay, 2013; Kilcik et al., 2020; Calisir et al., 2023].

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Картина распределения колебаний в солнечном пятне

В тени пятна на фотосферном уровне преобладают пятиминутные колебания лучевой скорости (средний период 300 с, средняя амплитуда 80 м/с). В опубликованной недавно работе [Stangalini et al., 2022] наблюдения крупномасштабных когерентных колебаний в тени солнечного пятна представлены как новый результат. В связи с этим следует заметить, что факт крупномасштабных пятиминутных колебаний в фотосфере тени солнечных пятен был установлен более 30 лет назад [Kobanov, 1990; Lites, 1992]. Другой интересной особенностью является наличие в фотосфере полутени и суперполутени компактных участков с повышенной мощностью трехминутных колебаний, превосходящей мощность аналогичных колебаний в фотосфере тени (см. область 1 на рис. 1). Мы связываем это со сложной топологией магнитного поля полутени. Модели [Solanki, Montavon, 1993; Lites, 1992; Schlichenmaier, Schmidt, 2000] допускают существование «шипов» вертикального магнитного поля между почти горизонтальными магнитными полями полутени и суперполутени.

В хромосфере тени основной период колебаний составляет 3 мин. В полутени на хромосферном уровне главенствуют так называемые бегущие волны полутени (RPW). Их период возрастает от 3–5 мин вблизи внутренней границы полутени до 10–12 мин вблизи внешней границы. Именно такое поведение частоты колебаний ставит под сомнение гипотезу о распространении RPW в строго горизонтальном направлении. Сценарий распространения колебаний вдоль линий магнитного поля с постепенно увеличивающимся наклоном лучше объясняет наблюдения и в тени пятна, и в его полутени. Для лучшего понимания этого явления обратимся к рис. 2. На этом рисунке ряд наклон-

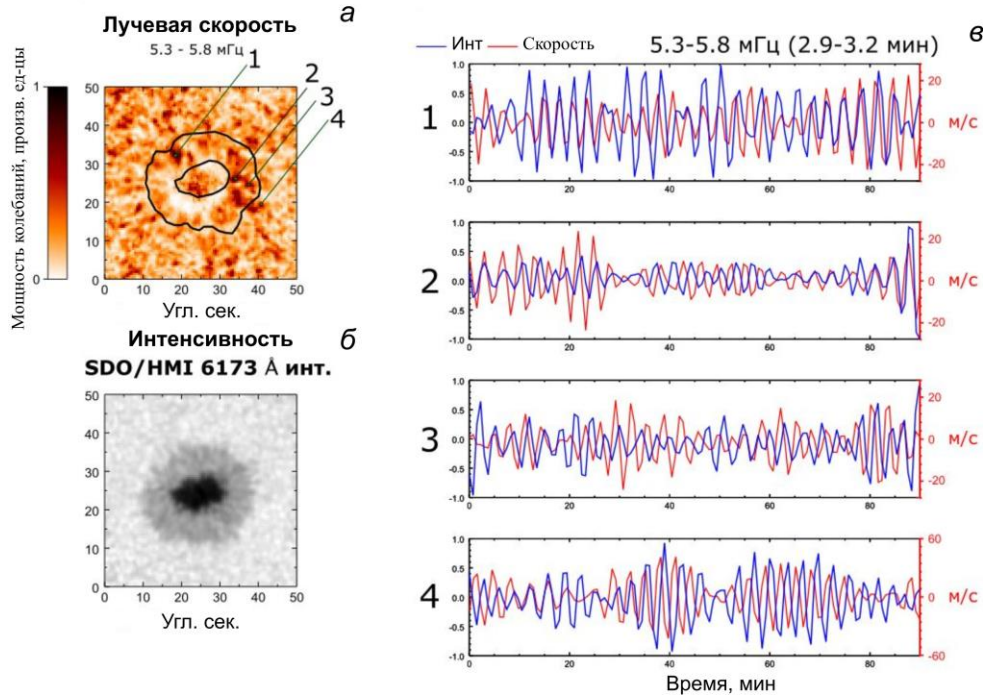


Рис. 1. Распределение трехминутных колебаний в сигнале фотосферной скорости в солнечном пятне АО 13111 (2022-10-03), спектральная линия FeI 6173 Å; сплошные линии обозначают внутреннюю и внешнюю границы полутени (а); изображение пятна в сигнале интенсивности этой же линии (б); трехминутные колебания скорости и интенсивности в фотосфере (в) в точках, указанных на панели а: синяя линия — нормированная интенсивность, красная — лучевая скорость

ных линий схематично отражает линии магнитного поля в пятне, тогда как горизонтальные линии указывают на два уровня высоты (фотосфера и хромосфера). Условимся, что мы имеем дело с продольными звуковыми колебаниями вдоль наклонных линий магнитного поля. Из рисунка следует, что при одинаковой скорости звука наблюдаемого уровня хромосферы позже будут достигать те колебания, которые распространяются вдоль более наклонных линий, что и создает иллюзию горизонтально распространяющихся колебаний. А понижение частоты обрезания с увеличением наклона линий магнитного поля [Bel, Leroy, 1977] объясняет факт увеличения периода RPW с расстоянием от внутренней границы полутени. А что будет с частотным составом колебаний, если для пятна вблизи центрального меридиана мы будем наблюдать колебания одновременно в фотосфере и хромосфере? На рис. 2 точка 2, соответствующая хромосфере, расположена на линии с меньшим наклоном магнитного поля, следовательно, колебания в ней должны быть более высокочастотные, чем в точке 1, соответствующей фотосфере. Результаты наших наблюдений (см. рис. 3), выполненных вблизи внешней границы полутени области NOAA 8263 5 июля 1998 г. в линиях H β 4861 Å и NiI 4857 Å, подтверждают правильность этого предположения. Подобное смещение спектра ранее отмечено для четырех солнечных пятен в статье [Kolobov et al., 2016]. Сдвиг хромосферного спектра, показанного на рис. 3, относительно фотосферного в сторону высоких частот является еще одним доказательством того, что строго горизонталь-

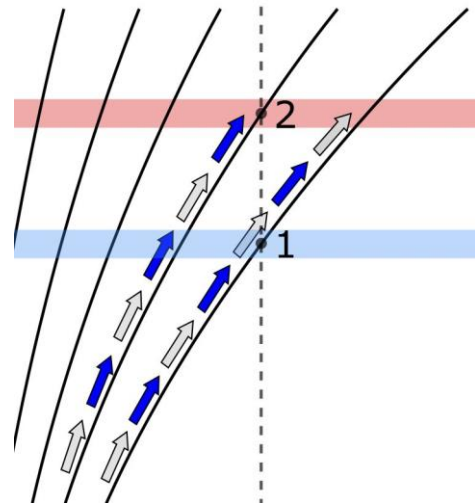


Рис. 2. Условное изображение процесса распространения колебаний в солнечном пятне вдоль линий магнитного поля разного наклона. Уровень фотосферы обозначен синим, уровень хромосферы — красным

ное распространение звуковых колебаний в хромосфере полутени является иллюзорным.

Колебания в зоне эвершедовских течений

Выдающейся особенностью полутени является наличие квазистационарного течения, открытого Эвершедом в начале прошлого века [Evershed, 1909]. На фотосферном уровне эвершедовское течение направлено от внутренней границы полутени к внешней и иногда наблюдается даже в суперполутени. В хромосфере течение меняет направление

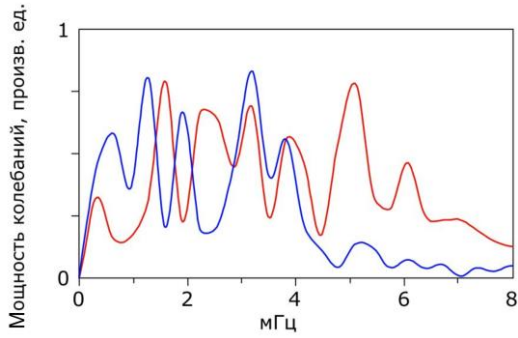


Рис. 3. Спектры колебаний лучевой скорости для внешней полутени солнечного пятна АО № 8263: синий — фотосфера в линии NiI 4857 Å (соответствует точке 1 на рис. 2); красный — хромосфера в линии Hβ 4861 Å (соответствует точке 2 на рис. 2)

на обратное (от внешней границы к внутренней) и именуется инверсным эвершедовским течением или течением Сент-Джона, по имени ученого, исследовавшего этот эффект [St. John, 1913]. Можно отметить два подхода к объяснению природы эвершедовских течений: первый допускает движение вещества [Evershed, 1909; Montesinos, Thomas, 1997], второй подход связывает это явление с колебательно-волновыми процессами [Maltby, Eriksen, 1967]. Возникает естественный вопрос — могут ли эти течения служить каналами для распространения колебательно-волновых движений? Наблюдательных результатов, в которых стационарные колебания непосредственно связаны с эвершедовскими течениями, удручающе мало, и проблема эта до сих пор не решена. Shine et al. [1994] при анализе временных серий фильтрограмм солнечных пятен указали на 10-минутную повторяемость движущихся структур изображений. Наиболее известна работа [Rimmele, 1994], в которой выявлены временные вариации скорости эвершедовских течений с периодом 15 мин. Если предполагать, что прямое и инверсное эвершедовские течения имеют общую природу, то логично искать в наблюдениях и общие временные вариации этих течений. Следуя этому предположению, мы провели наблюдения одновременно в фотосферной и хромосферной спектральных линиях. На рис. 4 верхняя панель представляет запись вариаций лучевой скорости в линиях NiI 4857 Å (фотосфера) и Hβ 4861 Å (хромосфера) в полутени пятна NOAA 8299, а нижняя — соответствующие спектры мощности. Из сглаженных временных серий и спектров мощности следует, что колебания с периодом около 35 мин наиболее вероятно связаны с прямым и инверсным эвершедовскими течениями, поскольку низкочастотные компоненты колебаний в фотосфере и хромосфере полутени, имея одинаковый период, находятся в противофазе. Заметим также, что нельзя исключать как возможную причину такого совпадения периодические вращательные движения пятна. Для большей уверенности будет полезным время наблюдений в подобном эксперименте увеличить в несколько раз.

Распространение волн между слоями атмосферы пятна

Для звуковых колебаний соотношение фаз колебаний между сигналами доплеровской скорости и интен-

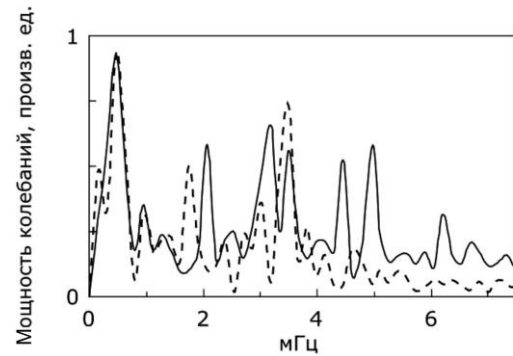
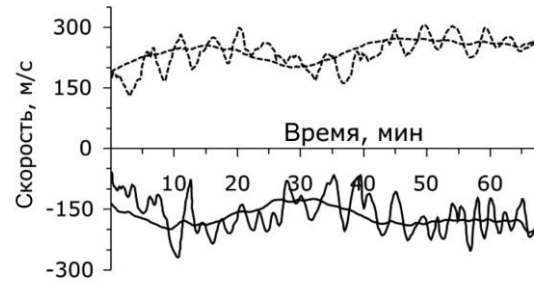


Рис. 4. Прямое (штриховая линия) и обратное (сплошная линия) эвершедовские течения в солнечном пятне АО № 8299: верхняя панель — временные серии в спектральных линиях NiI 4857 Å и Hβ 4861 Å; приведены исходный и сглаженный десятиминутным окном сигналы; нижняя панель — соответствующие спектры мощности

сивности в одной пространственной точке служит средством для определения типа наблюдаемой волны (стоячая или распространяющаяся). Сдвиг фаз 90° считается признаком стоячей волны, а сдвиг 180° или 0° — признаком распространяющейся волны. В реальных наблюдениях величина этого сдвига значительно меняется во временной серии длительностью около часа (см., например, панели 2, 3 на рис. 1). По нашему мнению, высота и прозрачность отражающих границ также варьируют в условиях высокодинамичной солнечной атмосферы над пятенной активной областью. В зависимости от соотношения между амплитудами прямой и отраженных волн, ограниченный объем, в котором отмечаются признаки стоячей волны, может являться источником распространяющихся волн для соседних областей.

При исследовании распространения колебаний в вертикальном направлении измеряют фазовые задержки одноименных сигналов на разных уровнях атмосферы, для чего подбирают соответствующие спектральные линии. В верхних слоях солнечной атмосферы скорость распространения колебаний вдоль корональных петель измеряют по фазовой задержке одноименных сигналов в двух или более точках, принадлежащих исследуемой петле. Широкое распространение получили полутоновые диаграммы пространство—время, на которых представлено изменение мощности колебаний вдоль пространственного разреза. По наклону полутоновых полос можно определять проекцию скорости распространения волновых возмущений в картинной плоскости как при реальном распространении возмущений (рис. 5),

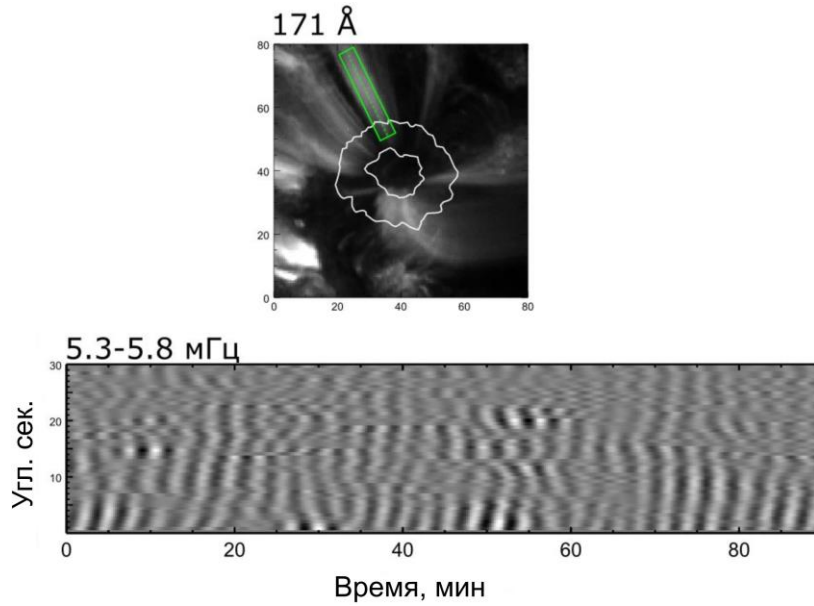


Рис. 5. Распространение трехминутных колебаний интенсивности вдоль корональной петли, АО 13140 (2022-11-10), AIA 171 Å; скан отмечен штриховой линией в зеленом прямоугольнике

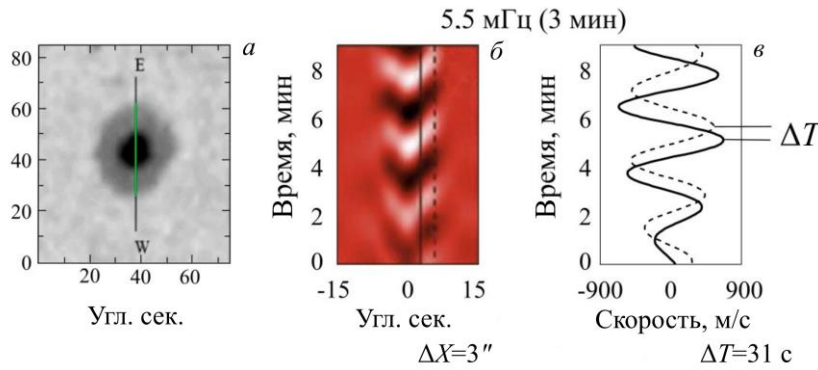


Рис. 6. Шевронные структуры, иллюстрирующие распространение трехминутных колебаний в тени пятна: *a* — изображение пятна в белом свете с указанием расположения спектральной щели; зеленым цветом обозначена часть щели, для которой строилась пространственно-временная диаграмма; *б* — пространственно-временная диаграмма лучевой скорости вдоль разреза пятна через тень и полутень, фильтрованная в трехминутном диапазоне периодов; *в* — трехминутные колебания в разрезах диаграммы, показанных на панели *б* сплошной и штриховой линиями

так и при кажущемся, как в случае с RPW в тени солнечного пятна (рис. 6). Впервые этот результат был представлен в работе [Kobanov, Makarchik, 2004], что подтверждено в работе [Madsen et al., 2015].

Очень часто на полутоновых диаграммах пространство—время, представляющих распространение колебаний вдоль корональной петли над солнечным пятном, можно видеть изменение наклона полутоновых полос, что воспринимается как изменение скорости распространения (рис. 5). Однако при более детальном анализе этого явления мы заключили, что оно вызвано проекционными эффектами вследствие кривизны канала распространения. К такому же выводу пришли Sieuga et al. [2022] в работе, посвященной исследованию распространения волновых возмущений вдоль корональных структур над солнечными пятнами. На двухмерных полутоновых диаграммах, иллюстрирующих распространение колебаний в верхние слои солнечной атмосферы, можно увидеть кольцевую форму про-

странственного распределения отдельных частот [Reznikova, Shibasaki, 2011, 2012; Jess et al., 2013]. Подобный эффект в области низких частот наблюдали Kolobov et al. [2016]. В последней работе представлены пространственные распределения доминирующих частот в диапазоне высот от глубокой фотосферы (линия FeI 6173 Å) до короны (линия FeIX 171 Å) для четырех солнечных пятен. Кольцевая структура в этих пятнах наблюдается вплоть до переходной зоны (линия HeII 304 Å), что свидетельствует о сохранении круговой симметрии в наклоне линий магнитного поля до этих высот. Однако в нижней короне (FeIX 171 Å) симметрия нарушается, очевидно, вследствие того, что часть магнитных петель уже достигла максимальной высоты.

При определении скорости распространения колебаний по фазовой разности одноименных сигналов можно столкнуться с еще одной проблемой, порождающей неопределенности оценки. Даже с применением узкополосной частотной фильтрации сравниваемых сигналов можно заметить, что их фазо-

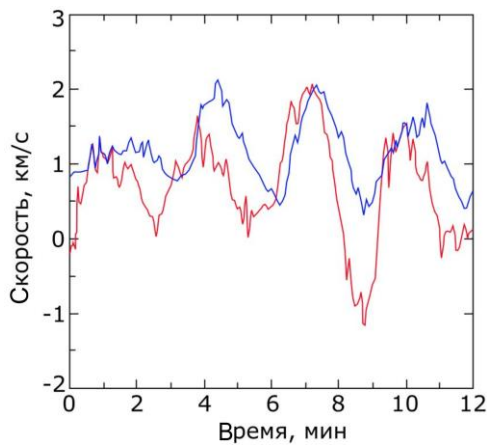


Рис. 7. Пример изменения фазовой разности сигналов лучевой скорости Na (красная линия) и HeI 10830 Å (синяя линия), измеряемых в тени пятна

вая разность меняется на протяжении анализируемой временной серии. Если же узкополосная частотная фильтрация сигналов не проводится, то адекватная оценка сигналов еще более затруднена, а иногда и вовсе невозможна вследствие того, что фазовый сдвиг меняет величину даже на коротких временных интервалах (рис. 7).

По мнению авторов, для определения скорости распространения волн в солнечной атмосфере полезно использовать вспыхивающую модуляцию колебаний, в результате ударного воздействия которой амплитуда собственных колебаний на короткое время резко возрастает в три-пять раз. Milligan et al. [2017] наблюдали трехминутные глобальные колебания в линиях Лайман-альфа и SDO/AIA 1600 и 1700 Å после мощной рентгеновской вспышки. Chelpanov, Kobanov [2018] наблюдали вспыхивающую модуляцию локальных трехминутных и пятиминутных колебаний в активной области в ходе малой вспышки класса B2. Можно заключить, что данное явление не столь уж редкое для Солнца. При анализе наблюдений, полученных одновременно на нескольких уровнях солнечной атмосферы, становится хорошо заметным образовавшийся в результате вспышки цуг колебаний с повышенной амплитудой; можно отследить его распространение на разные высоты, что уменьшает ошибки в определении фазовой задержки колебаний, по которой измеряют скорость распространения волновых возмущений [Chelpanov, Kobanov, 2021]. Заметим, что здесь просматривается очень близкая аналогия с методами, применяемыми в геофизике, когда с помощью взрывных возмущений возбуждаются колебания в среде на собственных частотах, по скорости распространения которых судят о физических свойствах окружающей среды.

ВЫВОДЫ

В статье описаны основные наблюдательные характеристики колебательных процессов, происходящих в разных частях солнечных пятен. Обсуждаются результаты исследований, в том числе полученные авторами статьи, как ранние, так и современные. Указывается на некоторые проблемы, связанные с проведением наблюдений и интерпретацией.

На фотосферном уровне пятиминутные колебания когерентны на большей части тени пятна, что может указывать на протяженный подфотосферный источник.

В фотосфере полутени и суперполутени пятен наблюдаются компактные образования, в которых доминируют трехминутные колебания. Эти участки отличаются повышенной концентрацией элементов с вертикальным магнитным полем.

Распространение хромосферных бегущих волн полутени в строго горизонтальном направлении с увеличивающимся периодом по мере удаления от баричентра пятна — кажущийся эффект, вызванный тем, что колебания распространяются вдоль разных линий магнитного поля с постепенно увеличивающимся наклоном. Это же объяснение справедливо для бегущих волн в хромосфере тени пятна [Kobanov, Makarchik, 2004].

Взаимосвязь прямого и инверсного эвершедовских течений с колебательно-волновыми процессами в настоящее время изучена слабо. По мнению авторов, наибольший интерес будут представлять исследования в диапазоне колебаний с периодом 30–35 мин, где замечена синхронность в поведении прямого и инверсного течений.

Кольцевые структуры в пространственном распределении доминирующих частот на разных высотах солнечной атмосферы свидетельствуют о сохранении круговой симметрии в наклоне линий магнитного поля для пятен правильной формы вплоть до нижней короны. Симметрия нарушается в нижней короне, где часть магнитных петель, вероятно, уже достигает максимальной высоты.

Изменение наклона полос на полутоновых диаграммах пространство—время, используемых для определения скорости распространения колебаний вдоль корональной петли, вызвано проекционным эффектом вследствие кривизны петли, а не реальным изменением скорости.

Авторы предлагают использовать вспыхивающую модуляцию амплитуды собственных колебаний среды [Chelpanov, Kobanov, 2021] для устранения неопределенности, возникающей при измерении фазовой разности одноименных сигналов, по которой судят о скорости распространения волновых возмущений в солнечной атмосфере.

Авторы надеются, что статья внесет вклад в построение целостной картины колебаний в солнечном пятне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>]. В работе использованы данные космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO). Авторы благодарны анонимным рецензентам за предложения и замечания, способствовавшие улучшению текста статьи.

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.

- Alissandrakis C.E., Dialektis D., Mein P., et al. The Evershed flow in the solar photosphere, chromosphere and chromosphere-corona transition region. *Astron. Astrophys.* 1988. Vol. 201. P. 339–349.
- Beckers J.M., Tallant P.E. Chromospheric inhomogeneities in sunspot umbrae. *Solar Phys.* 1969. Vol. 7. P. 351–365. DOI: [10.1007/BF00146140](https://doi.org/10.1007/BF00146140).
- Bel N., Leroy B. Analytical study of magnetoacoustic gravity waves. *Astron. Astrophys.* 1977. Vol. 55. P. 239.
- Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.I. Dispersion of slow magnetoacoustic waves in the active region fan loops introduced by thermal misbalance. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, 122. DOI: [10.1007/s11207-021-01868-4](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01868-4).
- Bloomfield D.S., Lagg A., Solanki S.K. The nature of running penumbral waves revealed. *Astrophys. J.* 2007. Vol. 671. P. 1005–1012. DOI: [10.1086/523266](https://doi.org/10.1086/523266).
- Bogdan T.J., Judge P.G. Observational aspects of sunspot oscillations. *Roy. Soc. London Trans. Ser. A.* 2006. Vol. 364, iss. 1839. P. 313–331. DOI: [10.1098/rsta.2005.1701](https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1701).
- Botha G., Arber T., Nakariakov V., Zhugzhda Y. Chromospheric resonances above sunspot umbrae. *Astrophys. J.* 2011. Vol. 728, 84. DOI: [10.1088/0004-637X/728/2/84](https://doi.org/10.1088/0004-637X/728/2/84).
- Calisir M.A., Yazici H.T., Kilcik A., Yurchyshyn V. Relationships between physical parameters of umbral dots measured for 12 sunspot umbras with the Goode Solar Telescope. *Solar Phys.* 2023. Vol. 298, 103. DOI: [10.1007/s11207-023-02198-3](https://doi.org/10.1007/s11207-023-02198-3).
- Chelpanov A.A., Kobanov N.I. Oscillations accompanying a He I 10830 Å negative flare in a solar facula. *Solar Phys.* 2018. Vol. 293, 157. DOI: [10.1007/s11207-018-1378-2](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1378-2).
- Chelpanov A.A., Kobanov N.I. Using flare-induced modulation of three- and five-minute oscillations for studying wave propagation in the solar atmosphere. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, 180. DOI: [10.1007/s11207-021-01910-5](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01910-5).
- Evershed J. Radial movement in sun-spots. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 1909. Vol. 69. P. 454. DOI: [10.1093/mnras/69.5.454](https://doi.org/10.1093/mnras/69.5.454).
- Felipe T., Socas-Navarro H., Khomenko E. Synthetic observations of wave propagation in a sunspot umbra. *Astrophys. J.* 2014. Vol. 795, 9. DOI: [10.1088/0004-637X/795/1/9](https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/9).
- French R.J., Bogdan T.J., Casini R., et al. First observation of chromospheric waves in a sunspot by DKIST/ViSP: The anatomy of an umbral flash. *Astrophys. J. Lett.* 2023. Vol. 945, L27. DOI: [10.3847/2041-8213/acb8b5](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acb8b5).
- Giovannelli R.G. Oscillation and waves in a sunspot. *Solar Phys.* 1972. Vol. 27. P. 71–79. DOI: [10.1007/BF00151771](https://doi.org/10.1007/BF00151771).
- Jess D.B., Reznikova V.E., Van Doorsselaere T., et al. The influence of the magnetic field on running penumbral waves in the solar chromosphere. *Astrophys. J.* 2013. Vol. 779, 168. DOI: [10.1088/0004-637X/779/2/168](https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/2/168).
- Jess D.B., Jafarzadeh S., Keys P.H., et al. Waves in the lower solar atmosphere: The dawn of next-generation solar telescopes. *Living Rev. Sol. Phys.* 2023. Vol. 20, 1. DOI: [10.1007/s41116-022-00035-6](https://doi.org/10.1007/s41116-022-00035-6).
- Khomenko E., Collados M. Magneto-hydrostatic sunspot models from deep subphotospheric to chromospheric layers. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 689. P. 1379–387. DOI: [10.1086/592681](https://doi.org/10.1086/592681).
- Kilcik A., Sarp V., Yurchyshyn V., et al. Physical characteristics of umbral dots derived from a high-resolution observations. *Solar Phys.* 2020. Vol. 295, 58. DOI: [10.1007/s11207-020-01618-y](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01618-y).
- Kobanov N.I. On spatial characteristics of five-minute oscillations in the sunspot umbra. *Solar Phys.* 1990. Vol. 125. P. 25–30. DOI: [10.1007/BF00154775](https://doi.org/10.1007/BF00154775).
- Kobanov N.I. Measurements of the differential line-of-sight velocity and longitudinal magnetic field on the Sun with CCD photodetector: part I. *Modulationless techniques. Instruments and Experimental Techniques.* 2001. Vol. 44. P. 524–529.
- Kobanov N.I., Makarchik D.V. Propagating waves in the sunspot umbra chromosphere. *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 424. P. 671–675. DOI: [10.1051/0004-6361:20035960](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20035960).
- Kobanov N.I., Kolobov D.Y., Makarchik D.V. Umbral three-minute oscillations and running penumbral waves. *Solar Phys.* 2006. Vol. 238. P. 231–244. DOI: [10.1007/s11207-006-0160-z](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0160-z).
- Kolobov D.Y., Chelpanov A.A., Kobanov N.I. Peculiarity of the oscillation stratification in sunspot penumbrae. *Solar Phys.* 2016. Vol. 291. P. 3339–3347. DOI: [10.1007/s11207-016-0953-7](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0953-7).
- Lites B.W. Photoelectric observations of chromospheric sunspot oscillations. V. Penumbral oscillations. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 334. P. 1054. DOI: [10.1086/166898](https://doi.org/10.1086/166898).
- Lites B.W. Sunspot oscillations — observations and implications. *Sunspots: Theory and Observations. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on the Theory of Sunspots, held in Cambridge, U.K., September 22–27, 1991.* 1992. Vol. 375. P. 261. DOI: [10.1007/978-94-011-2769-1_12](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2769-1_12).
- Löhner-Böttcher J., Bello González N. Signatures of running penumbral waves in sunspot photospheres. *Astron. Astrophys.* 2015. Vol. 580, A53. DOI: [10.1051/0004-6361/201526230](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526230).
- Madsen C.A., Tian H., DeLuca E.E. Observations of umbral flashes and running sunspot waves with the Interface Region Imaging Spectrograph. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 800, no. 2, 129. DOI: [10.1088/0004-637X/800/2/129](https://doi.org/10.1088/0004-637X/800/2/129).
- Maltby P., Eriksen G. The Evershed effect as a wave phenomenon. *Solar Phys.* 1967. Vol. 2. P. 249–257. DOI: [10.1007/BF00147840](https://doi.org/10.1007/BF00147840).
- Milligan R.O., Fleck B., Ireland J., et al. Detection of three-minute oscillations in full-disk Ly α emission during a solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 2017. Vol. 848, L8. DOI: [10.3847/2041-8213/aa8f3a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa8f3a).
- Montesinos B., Thomas J.H. The Evershed effect in sunspots as a siphon flow along a magnetic flux tube. *Nature.* 1997. Vol. 390. P. 485–487. DOI: [10.1038/37307](https://doi.org/10.1038/37307).
- Reznikova V.E., Shibasaki K. Flare quasi-periodic pulsations with growing periodicity. *Astron. Astrophys.* 2011. Vol. 525, A112. DOI: [10.1051/0004-6361/201015600](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015600).
- Reznikova V.E., Shibasaki K. Spatial structure of sunspot oscillations observed with SDO/AIA. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 756, A35. DOI: [10.1088/0004-637X/756/1/35](https://doi.org/10.1088/0004-637X/756/1/35).
- Rimmele T.R. On the temporal behaviour of the Evershed effect. *Astron. Astrophys.* 1994. Vol. 290. P. 972–982.
- Roupe van der Voort L.H.M., Rutten P.J., Sutterlin P., et al. La Palma observations of umbral flashes. *Astron. Astrophys.* 2003. Vol. 403. P. 277. DOI: [10.1051/0004-6361:20030237](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030237).
- Schlichenmaier R., Schmidt W. Flow geometry in a sunspot penumbra. *Astron. Astrophys.* 2000. Vol. 358. P. 1122–1132.
- Settele A., Staude J., Zhugzhda Y. Waves in sunspots: Resonant transmission and the adiabatic coefficient. *Solar Phys.* 2001. Vol. 202, iss. 2. P. 281–292. DOI: [10.1023/A:101225321105](https://doi.org/10.1023/A:101225321105).
- Shine R.A., Title A.M., Tarbell T.D., et al. High-resolution observations of the Evershed effect in sunspots. *Astrophys. J.* 1994. Vol. 430. P. 413–424. DOI: [10.1086/174416](https://doi.org/10.1086/174416).
- Sieyra M.V., Krishna Prasad S., Stenborg G., et al. Observational and numerical characterization of a recurrent arc-shaped front propagating along a coronal fan. *Astron. Astrophys.* 2022. Vol. 667, A21. DOI: [10.1051/0004-6361/202244454](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244454).
- Solanki S., Montavon C. Uncombed fields as the source of the broad-band circular polarization of sunspots. *Astron. Astrophys.* 1993. Vol. 275. P. 283–292.
- Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Sunspot as an isolated magnetic structure: Stability and oscillations. *Astrophys. Bull.* 2008. Vol. 63. P. 169–180. DOI: [10.1134/S1990341308020077](https://doi.org/10.1134/S1990341308020077).
- Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Analytical model of an asymmetric sunspot with a steady plasma flow in its penumbra. *Solar Phys.* 2016. Vol. 291. P. 1647–1663. DOI: [10.1007/s11207-016-0922-1](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0922-1).
- St. John C.E. Radial motion in sun-spots. *Astrophys. J.* 1913. Vol. 37. P. 322. DOI: [10.1086/142002](https://doi.org/10.1086/142002).
- Stangalini M., Verth G., Fedun V., et al. Large scale coherent magnetohydrodynamic oscillations in a sunspot. *Nature Commu-*

nications. 2022. Vol. 13, A479. DOI: [10.1038/s41467-022-28136-8](https://doi.org/10.1038/s41467-022-28136-8).

Tian C., Petrovay K. Structures in compressible magneto-convection and the nature of umbral dots. *Astron. Astrophys.* 2013. Vol. 551, A92. DOI: [10.1051/0004-6361/201117361](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117361).

Turova I.P., Ozhogina O.A., Yurysheva O.V. A flare and umbral flashes in a sunspot. *Solar Phys.* 2005. Vol. 227. P. 75–88. DOI: [10.1007/s11207-005-1715-0](https://doi.org/10.1007/s11207-005-1715-0).

Van Doorselaere T., Srivastava A.K., Antolin P., et al. Coronal heating by MHD waves. *Space Sci. Rev.* 2020. Vol. 216, A140. DOI: [10.1007/s11214-020-00770-y](https://doi.org/10.1007/s11214-020-00770-y).

Zhao J., Felipe T., Chen R., Khomenko E. Tracing p-mode waves from the photosphere to the corona in active regions. *Astrophys. J. Lett.* 2016. Vol. 830, L17. DOI: [10.3847/2041-8205/830/1/L17](https://doi.org/10.3847/2041-8205/830/1/L17).

Zhugzhda Y.D., Sych R.A. Model of local oscillations in sunspots. *Astronomy Lett.* 2014. Vol. 40. P. 576–593. DOI: [10.1134/S1063773714090059](https://doi.org/10.1134/S1063773714090059).

Zirin H., Stein A. Observations of running penumbral waves. *Astrophys. J.* 1972. Vol. 178. P. L85. DOI: [10.1086/181089](https://doi.org/10.1086/181089).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 23 октября 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Кобанов Н.И., Челпанов А.А. Наблюдательные характеристики колебательно-волновых процессов в пятне и его окрестностях. Сложности наблюдений и интерпретации. *Солнечно-земная физика.* 2024. Т. 10, № 1. С. 4–11. DOI: [10.12737/szf-101202401](https://doi.org/10.12737/szf-101202401).