МОЩНЫЕ ПОЯРЧЕНИЯ И ЛОКАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ

© 2019 г. Ю. Д. Жугжда^{1*}, Р. А. Сыч²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Москва, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия Поступила в редакцию 26.10.2018 г.; после доработки 23.11.2018 г.; принята к публикации 28.11.2018 г.

Анализ наблюдений колебаний в пятне по данным SDO AIA длительностью 6 ч показал, что мощные поярчения в пятнах возникают в ячейках локальных колебаний. Обнаружено, что спектр локальных колебаний искажается короткими импульсами, создаваемыми мощными поярчениями. Для одного из одиночных поярчений удалось выделить неискаженный спектр локальных колебаний для этой ячейки. Оказалось, что поярчение возникает на фоне локальных трехминутных колебаний. Сопоставление наблюдений в каналах 1600 Å и 1700 Å показало, что самые мощные поярчения возникают на уровне верхней фотосферы ниже температурного минимума. Мощные поярчения в пятнах наблюдаются в виде одиночных или повторяющихся с интервалом порядка двадцати минут коротких импульсов. Это отличает их от давно известных менее мощных поярчений, представляющих собой цуги импульсов с интервалами порядка трех минут. Оба типа поярчений находят свое объяснение в рамках гипотезы о существовании подфотосферного резонатора на медленных волнах и различных режимах его работы.

Ключевые слова: солнечные пятна, подфотосферный резонатор, поярчения в пятне, трехминутные колебания.

DOI: 10.1134/S0320010819030070

ВВЕДЕНИЕ

Кратковременные повторяющиеся поярчения в солнечных пятнах в линиях К и Н хромосферной линии Ca⁺ были открыты Беккерсом и Та-лантом (1969). Это явление было подтверждено рядом исследователей (Витманн, 1969; Джиованелли, 1972). Вскоре Зирин и Штейн (1972) открыли бегущие волны в полутени и обнаружили их тесную связь с пятенными поярчениями. Почти одновременно были обнаружены трехминутные колебания в пятнах (Беккерс, Шульц, 1972). Поярчения представляют собой последовательность резких увеличений яркости, которые происходят с интервалом в три минуты (Руппе и др., 2003; Круз и др., 2013; Сыч, Накаряков, 2014). Они возникают случайным образом в различных местах тени пятна (Юань и др., 2014). Обнаружено (Сыч, Ванг, 2018), что последовательность из нескольких поярчений всегда находится внутри цуга трехминутных колебаний. В настоящее время не вызывает сомнения, что трехминутные колебания, пятенные поярчения и бегущие волны полутени взаимосвязаны между

собой. Пятенные поярчения прослеживаются во всех слоях атмосферы пятна от фотосферы вплоть до короны (Шарма и др., 2017; Сыч, Ванг, 2018). По оценкам Сентено и др. (2005), они имеют малый пространственный размер (порядка 0.13") и возникают в результате прихода медленных волн из нижних слоев пятна по узким каналам вдоль магнитного поля. В хромосфере их амплитуда возрастает, и они превращаются в ударные волны (Родригес и др., 2013). В фотосфере пятна единственными объектами с такими малыми угловыми размерами являются так называемые яркие точки (Джесс и др., 2012; Чудари, Шимицу, 2013; Прасад и др., 2015; Гударзи и др., 2016). Более того, оказалось, что яркие точки колеблются с периодами порядка трех минут (Джесс и др., 2012; Чае и др., 2017; Эбади и др., 2017). Таким образом, возможно, что именно яркие точки в фотосфере пятна являются источником колебаний, которые из-за роста амплитуды превращаются в нелинейные волны и наблюдаются как хромосферные поярчения. Колебания в пятне распределены неравномерно по площади пятна с локализацией в ячейках с малыми угловыми размерами (Джесс и др., 2012; Жугжда, Сыч, 2014; Прасад и др., 2015; Чае и др., 2017). Амплитуды

^{*}Электронный адрес: YZhugzhda@mail.ru

этих колебаний значительно превосходят амплитуды колебаний вне этих ячеек. Жугжда и Сыч (2014) предложили колебания, локализованные в ячейках малых размеров, называть локальными, в отличие от нелокальных колебаний, рассредоточенных по всему пятну и связанных с усилением отдельных частей волновых фронтов (Сыч, Ванг, 2018), распространяющихся вдоль магнитных трубок.

В настоящее время не вызывает сомнения, что источником колебаний в пятне являются подфотосферные слои. Жугжда и Сыч (2014) рассмотрели возможные сценарии возникновения локальных и нелокальных колебаний в рамках монолитной модели пятна. Теория трансформации магнитогравитационных волн (Жугжда, 1979; Жугжда, Джалилов, 1981) позволила установить, что нелокальные колебания, охватывающие всю площадь пятна, могут возникать в результате трансформации крупномасштабных быстрых волн в медленные нелокальные колебания (Жугжда, Сыч, 2014). Быстрые волны в подфотосферных слоях пятна, где $\beta \gg$ ≫ 1, представляют собой слегка модифицированные магнитным полем р-моды. Это означает, что эти крупномасштабные волны должны возникать в результате воздействия на подфотосферные части пятна р-модами колебаний, присутствующими в окружающей пятно спокойной атмосфере. Преобразование быстрых волн в медленные должно происходить в тех слоях атмосферы, где $\beta \sim$ ~ 1. В рамках этого сценария локальные колебания на медленных волнах возникнуть не могут, так как коэффициент трансформации мелкомасштабных быстрых волн в медленные очень мал (Жугжда, Сыч, 2014). Это означает, что должен быть какой-то другой источник медленных мелкомасштабных волн, ответственных за локальные колебания в пятне. В работе Жугжда и Сыч (2014) предположено, что источником колебаний может быть резонатор на медленных волнах, предсказанный Жугждой (1984). Анализ свойств медленных волн на основе приближения Робертса (2006) показал, что действительно медленные волны в подфотосферных слоях являются бегущими и существуют условия для резонанса на медленных волнах. Жугжда (2018) рассчитал модель подфотосферного резонатора на основе модифицированной модели пятна Штауде (Сеттеле, 2001). Оказалось, что широкий спектр локальных колебаний (Резникова, 2012; Жугжда, Сыч, 2014), включающий в себя большое количество спектральных линий, может возникнуть, если резонатор на медленных волнах возникает в магнитной трубке с магнитным полем порядка 500 Гс. Согласно численным экспериментам Шусслера и Воглера (2006), конвекция в магнитном поле пятна приводит к появлению конвективных струй, которые проникают в пятно, раздвигая силовые линии магнитного поля. При

этом магнитное поле в этих тонких струях оказывается значительно слабее окружающего магнитного поля. Эти конвективные элементы, по общему представлению, и наблюдаются как яркие точки в пятне. Параметры этих струй неплохо согласуются с параметрами приближенной модели резонатора, предложенной Жугждой (2018). Таким образом, в рамках данной модели локальные колебания должны быть взаимосвязаны с ярким точками в пятне, в подфотосферных частях которых возникает резонанс на медленных волнах.

Взаимосвязь локальных колебаний и поярчений была рассмотрена Жугждой (2018). Оказалось, что все зависит от свойств подфотосферного резонатора на медленных волнах и режима его работы. В работе Жугжда и Сыч (2014) сделан вывод, что наличие подфотосферного резонатора может объяснить спектр трехминутных колебаний, если фундаментальная частота резонатора соответствует периодам колебаний порядка десятков минут. В этом случае спектр колебаний в диапазоне трехминутных периодов будет представлять собой систему эквидистантных линий. Расстояния между линиями этого спектра определяются фундаментальной частотой резонатора.

Жугжда (2018) показал, что режим работы подфотосферного резонатора сильно зависит от фаз и амплитуд эквидистантных линий в его спектре. Если распределение фаз эквидистантных гармоник спектра трехминутных колебаний случайно, то сигнал, приходящий из подфотосферного резонатора в верхние слои атмосферы пятна, представляет собой последовательность цугов трехминутных колебаний. Средняя длительность цугов равна периоду фундаментальных колебаний подфотосферного резонатора и оказывается порядка десятков минут (Сыч и др., 2012). Если составляющие спектра трехминутных колебаний эквидистанты то, несмотря на их случайные фазы, в какой-то момент времени колебания мод резонатора могут оказаться в близких фазах. В этом случае амплитуды этих гармоник складываются, и возникает серия из резких увеличений мощности колебаний, отстоящих друг от друга на период колебаний. Это и есть классические поярчения в хромосфере пятна, описанные Беккерсом и Талантом (1969). В следующем цуге колебаний происходит расфазировка мод колебаний резонатора и поярчения отсутствуют. Вероятность этого эффекта возрастает, если случайное распределение фаз гармоник спектра не покрывает весь диапазон возможных значений от $-\pi/2$ до $\pi/2$, а сосредоточено в более узком диапазоне, например, от $-\pi/4$ до $\pi/4$. Возможен и другой уникальный режим работы подфотосферного резонатора, когда имеет место синхронизация всех мод колебаний резонатора. Этот режим работы резонатора широко известен в физике лазеров и применяется для создания сверхкоротких мощных импульсов (Карлов, 1983). В этом случае вся энергия, запасенная в резонаторе, излучается в виде импульса, так как отсутствует деструктивная интерференция, приводящая к взаимному погашению резонансных колебаний. Фазировка мод колебаний в подфотосферном резонаторе должна приводить к генерации последовательности мощных поярчений. Интервал времени между ними равен периоду фундаментальной моды, который, в соответствии с моделью подфотосферного резонатора (Жугжда, Сыч, 2014; Жугжда, 2018), должен быть порядка десятков минут. В отличие от классических поярчений, эти поярчения значительно более мощные, так как в них вкладывается вся или почти вся энергия, запасенная в подфотосферном резонаторе. В случае лазера происходит непрерывная подпитка энергии в резонатор и поддерживается синхронность мод колебаний в резонаторе. В случае подфотосферного резонатора не ясно, существует ли такой механизм возбуждения резонатора, который обеспечивает постоянную фазировку колебаний и постоянную подпитку энергии в резонаторе. Если имеет место фазировка колебаний, но нет подпитки колебаний, то возможно появление одиночных мощных поярчений. Одиночные поярчения также могут возникать из-за расфазировки мод колебаний в резонаторе. Режим работы подфотосферного резонатора определяется условиями его возникновения в подфотосферных слоях пятна (Шусслер, Воглер, 2006), а также возбуждения посредством колебательной конвекции (Сыроватский, Жугжда, 1967).

Мощные поярчения в солнечных пятнах особенно интересны в связи с их влиянием на хромосферу и корону. Настоящая работа посвящена исследованию редких мощных поярчений и сопоставлению их свойств с механизмом возникновения, предложенным Жугждой (2018).

1. НАБЛЮДЕНИЯ

Использовались данные наблюдений Solar Dynamic Observatory (SDO/AIA; Лемен и др., 2012). Активная область NOAA 11131 с симметричным солнечным пятном наблюдалась 8 декабря 2010 г. (00 : 00–06 : 00 UT). Наблюдения проводились в момент прохождения группой центрального меридиана. Использовался временной куб изображений пятна, полученный с помощью инструмента SDO/AIA в диапазонах 1600 и 1700 Å, излучение которых возникает на уровне температурного минимума и верхней фотосферы соответственно. Использованы также данные каналов 304, 171 и 193 Å, излучение которых возникает на уровне верхней хромосферы,



Рис. 1. Изображение пятна в активной области NOAA 11131, полученное SDO/AIA 08 декабря 2010 г. Белым квадратом показана область исследования колебаний в центре пятна.

переходной зоны и короны. Пространственное разрешение составляло 0.6 угл. сек. Данные были получены со скважностью 12 и 24 с. Длительность наблюдений составляла 6 ч. что позволило исследовать колебания в диапазоне периодов от 0.5 мин до 120 мин. На рис. 1 показано исследуемое пятно в 02 : 30 UT, с наложением в виде контуров границ тени и полутени в белом свете. Размер тени пятна составлял 25", полутени 50". Яркость на рисунке представлена в логарифмической шкале. Для получения изображений использовался ресурс SDO/AIA http://www.lmsal.com/get aia data/, позволяющий получать калиброванные изображения Lev1 для различных длин волн в заданном интервале времени. Дифференциальное вращение исследуемого пятна на протяжении наблюдений было убрано с использованием программного обеспечения Solar Soft.

В нашем анализе использовались результаты измерений интенсивности приборами Solar Dynamic Observatory (SDO/AIA). Все измерения представлены в единицах DN. Подробное описание методики этих измерений приведено в Боернер и др. (2014) и Ли и др. (2018)

2. МОЩНЫЕ ПЯТЕННЫЕ ПОЯРЧЕНИЯ В ТЕМПЕРАТУРНОМ МИНИМУМЕ НАД ТЕНЬЮ ПЯТНА

Жугжда и Сыч (2014, 2018) для поиска локальных колебаний в пятне использовали следующий метод. Для каждого пикселя в исследуемой области пятна находился спектр колебаний временной



Рис. 2. (а) — Гистограмма распределения амплитуд колебаний на частоте $\nu = 5.33$ мГц в диапазоне 1600 Å. (b) — Гистограмма распределения максимальных амплитуд колебаний для каждого пиксела в изучаемом квадрате за все время наблюдений. (c) — Полный сигнал с мощными поярчениями в пикселе с координатами (4, 15). Шкала амплитуд показана на левой оси ординат. Второй сигнал на графике — сигнал, в котором поярчения с амплитудой более чем 85 единиц заменены нулевыми значениями. Шкала амплитуд для этого сигнала показана на правой оси ординат. (d) — Спектры двух сигналов, показанных на рис. 2с. (e), (f) — Поярчения в пикселах (14, 17) и (8, 20).

серии длительностью 6 ч. После этого выбиралась частота колебаний, которая соответствовала одному из пиков в амплитудном спектре для произвольно выбранного пиксела. Затем на основе амплитудных спектров колебаний всех пикселов строилась гистограмма распределения амплитуд колебаний пикселов на выбранной частоте по всей исследуемой площадке. На рис. 2а приведена такая гистограмма, построенная для частоты $\nu =$ = 5.33 мГц. Для исследования взято то же пятно, что и в работах Жугжда и Сыч (2014, 2018), но с существенно большей областью исследования тени. Если в работах Жугжда и Сыч (2014, 2018) исследовались колебания в центре пятна в области размером 9×9 пикселей, то на рис. 2а приведена гистограмма для области 31×31 пиксела (см. рис. 1). Для построения гистограммы на рис. 2а использованы данные наблюдений на частоте 1600 А. Излучение на этой частоте возникает в температурном минимуме и нижней хромосфере пятна. Для того чтобы сопоставить локальные колебания и поярчения в пятне, была построена еще одна гистограмма (рис. 2b). Эта гистограмма составлена из максимальных значений сигнала для каждого пикселя на протяжении 6 ч наблюдений.

Гистограммы на рис. 2а, b очень похожи. Ячейки с максимальными амплитудами различаются по величине, но приходятся на одни и те же пикселы. На рис. 2с показаны два сигнала с различающимся уровнем амплитуд. Один из сигналов — это полный сигнал с очень мощным поярчением в пикселе с координатами (4,15). Кроме основного мощного поярчения, в течение 6 ч наблюдался еще ряд менее мощных поярчений, значительно превышающих обычный уровень сигнала. Второй сигнал на рис. 2c — это сигнал, в котором все поярчения с амплитудой более 85 единиц заменены нулевыми значениями. Этот сигнал мы будем называть фоновым. Для совмещения этих двух сигналов на одном графике использованы две шкалы амплитуд, показанные соответственно на левой и правой оси ординат. Полный сигнал показывает самое мощное (≈ 3150) поярчение в пятне в пределах исследуемой площадки за все 6 ч наблюдений на частоте 1600 Å. Кроме этого мощного поярчения, в данном пикселе наблюдались еще несколько поярчений, значительно превышавших обычный уровень сигнала на этой частоте. Фоновый сигнал показан для того, чтобы были видны относительно слабые флуктуации сигнала между этими мощными поярчениями и их взаимосвязь. Фоновый сигнал показывает наличие относительно слабых поярчений, повторяющихся как правило через 150 с. Эти поярчения являются классическими поярчениями в хромосфере пятна, описанными Беккерсом и Талантом (1969). Мы сосредоточимся на исследовании мощных поярчений. На рис. 2d приведены спектры полного и фонового сигналов, показанных на рис. 2с. Амплитуды всех компонент спектра полного сигнала, включающего в себя мощные поярчения, значительно превосходят амплитуды компонент спектра фонового сигнала. Это является следствием того, что короткие импульсы мощных поярчений имеют широкий спектр с большой амплитудой, который добавляется к спектру флуктуаций со значительно меньшими амплитудами. Это приводит к тому, что гистограммы спектральных амплитуд на разных частотах фактически совпадают, как это видно на коллекции гистограмм, приведенной на рис. 4 в статье Жугжда и Сыч (2018). При рассмотрении фонового сигнала на рис. 2с видно, что существует последовательность мощных и менее мощных пятенных поярчений, которые появляются более менее регулярно с интервалами порядка десятков минут. Главным отличием этих мощных поярчений является то, что они возникают не в виде серий с интервалом порядка 150 с, а гораздо реже.

Надо отметить, что наличие мощных и не очень мощных поярчений приводит к значительному искажению спектров полного и фонового сигналов, как это видно из рис. 2d. Это создает трудности для исследования связи поярчений колебаний фонового сигнала с локальными колебаниями, которые, по мнению Жугжды (2018), ответственны за возникновение мощных поярчений. Спектр полного сигнала на рис. 2d настолько сильно искажен, что даже не видно характерных для пятна трехминутных и пятиминутных колебаний.

На рис. 2e,f представлены изменения интенсивности на частоте 1600 А в течение 6 ч для двух различных пикселей. На этих графиках видны как повторяющиеся поярчения с временным интервалом длительностью в несколько десятков минут, так и нерегулярные поярчения различной мощности. Все эти особенности укладываются в механизм, предложенный в работе Жугжды (2018). Но возникают закономерные вопросы, существуют ли локальные колебания в местах появления мошных поярчаний и совпадают ли эти места с яркими точками в пятне, как это предполагается в модели локальных колебаний (Жугжда, Сыч, 2014, 2018; Жугжда, 2018). Проблема состоит в том, что при исследовании локальных колебаний не учитывались сильные искажения спектра колебаний из-за поярчений, которые обсуждались выше.

3. ТРЕХМИНУТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И МОЩНЫЕ ПОЯРЧЕНИЯ

До недавнего времени считалось, что трехминутные колебания в пятне — это хромосферные колебания, и в фотосфере они не наблюдаются. В фотосфере пятна наблюдались только пятиминутные колебания. Предполагалось, что трехминутные колебания не наблюдаются в фотосфере изза их малой амплитуды по сравнению с пятиминутными колебаниями. В хромосфере трехминутные колебания становятся видны из-за того, что пятиминутные колебания отфильтровываются при прохождении через температурный минимум. При этом амплитуда трехминутных колебаний сушественно увеличивается из-за сильного уменьшения плотности плазмы в хромосфере по сравнению с фотосферой. Считалось, что источником как пяти-, так и трехминутных колебаний являются Р-моды глобальных колебаний, которые проникают в пятно из окружающей спокойной атмосферы, трансформируясь при этом в медленные магнитозвуковые волны. Однако наблюдения с высоким пространственным разрешением изменили общепринятые представления о трехминутных колебаниях. Оказалось, что трехминутные колебания с достаточно большими амплитудами наблюдаются в фотосфере пятна, но они сосредоточены в ярких точках (Джесс и др., 2012; Прасад и др., 2015; Чае и др., 2017; Эбади и др., 2017).

Для того чтобы исследовать фотосферные поярчения и их связь с колебаниями, в пятне была выбрана ячейка из четырех пикселей с координатами (25-26, 25-26). Часть гистограммы максимальных амплитуд рис. 2b приведена рис. За. На этой гистограмме видна группа из этих четырех пикселей, в которых амплитуда поярчений достигает уровня порядка 240-250. Длительность поярчений в этих четырех пикселях меньше, чем интервал измерений, что видно на рис. 3b, где показан средний сигнал для четырех пикселей. Шкала амплитуд для среднего сигнала показана на левой оси ординат. Для исследования фонового сигнала значение среднего сигнала в момент поярчения было заменено на среднее от значений сигнала в два соседние измерения. Фоновый сигнал показан на том же рис. 3b, но с использованием шкалы амплитуд, показанной на правой оси ординат. Надо отметить, что в фоновом сигнале видны повторяющиеся слабые классические поярчения. Но это очень слабые поярчения, почти не превышающие средний уровень сигнала. На рис. Зс сплошными линиями показаны спектры основного и фонового сигналов. На этом же графике штриховой линией показан спектр импульса поярчения за вычетом



Рис. 3. (а) — Небольшой участок гистограммы рис. 2b. (b) — Средний сигнал для четырех пикселов (25–26, 25–26) и фоновый сигнал. Масштабы этих сигналов показаны соответственно на левой и правой оси ординат. (c) — Сплошными линиями показаны спектры полного среднего сигнала (верхний) и фонового сигнала (нижний). Горизонтальная штриховая линия — спектр пятенного поярчения за вычетом фонового сигнала. (d) — Полный сигнал и фоновый сигнал после фильтрации в диапазоне частот 5.35 ≤ ν ≤ 7.47 мГц показаны с использованием двух масштабов подобно тому, как это сделано на графике рис. 2b. (e) — Спектр от среднего сигнала 10 пикселов, примыкающих к четырем пикселам на рис. За (верхний), и спектр от среднего сигнала 24 пикселов, отстоящих от четырех средних пикселов на два пиксела (нижний). (f) — Спектр от среднего сигнала 12 пикселов с координатами (20–23, 3–5).

фонового сигнала. Он представляет собой практически непрерывный спектр. Спектр полного сигнала имеет большие амплитуды, чем спектр фонового сигнала, так как он представляет собой сумму спектра фонового сигнала и непрерывного спектра, создаваемого импульсом поярчения. На первый взгляд. структура спектров полного и фонового сигналов не должна отличаться, как это имеет место для случая, приведенного на рис. 3с. В действительности они отличаются, так как складываются комплексные спектры фонового сигнала и импульса поярчения, а не их амплитудные спектры. Однако искажение спектра при переходе от фонового сигнала к полному незначительно по сравнению с типичным случаем, приведенным на рис. 2с. Это существенно, так как не вызывает сомнений, что спектры полного и фонового сигнала — это типичные спектры трехминутных колебаний. При этом в спектре практически полностью отсутствуют пятиминутные колебания, которые доминируют в фотосфере пятна. Тот факт, что пятиминутные колебания отсутствуют в спектрах на рис. Зс, указывает на то, что излучение на

частоте 1600 А возникает в основном в температурном минимуме, где пятиминутные колебания должны ослабляться из-за частоты отсечки. Для выяснения связи трехминутных колебаний и пятенных поярчений был отфильтрован полный сигнал в диапазоне частот $5.35 < \nu < 7.47$ мГц. На рис. 3d представлен график отфильтрованного сигнала в двух масштабах амплитуд в тот короткий период времени длительностью в 14.5 мин, когда возникает поярчение. Фильтрация проведена следующим образом. Была выделена полоса частот 5.35 < ν < < 7.47 мГц в спектре фонового сигнала, и добавлен к ней полный спектр поярчения, показанный пунктирной линией на рис. Зс. После этого было применено обратное преобразование Фурье. Такой метод фильтрации позволил в результирующем сигнале воспроизвести без искажений как трехминутные колебания, так и пятенное поярчение. На рис. 3d хорошо видно, что пятенное поярчение приходится почти точно на тот момент времени, когда должен быть очередной максимум трехминутных колебаний. Для того чтобы выяснить, приходится ли пятенное поярчение на то место тени

пятна, где усилены трехминутные колебания, на рис. Зе представлены два спектра. Один из этих спектров, расположенный в верхней части графика со шкалой амплитуд на левой оси ординат, --это спектр сигнала, усредненного по 10 пикселам, непосредственно примыкающим к четырем пикселям, где имело место мощное поярчение. Второй спектр на графике со шкалой амплитуд на правой оси ординат — это средний спектр 24 пикселов. находящихся в третьем ряду от края ячейки из четырех центральных пикселов. Если сравнить характерные амплитуды трехминутных колебаний в этих двух спектрах и спектре фонового сигнала, то можно увидеть быстрое убывание амплитуд по мере удаления от ячейки из четырех пиксел. Это убывание будет более быстрым, если сравнивать квадраты амплитуд колебаний, которые характеризуют мощность колебаний. С нашей точки зрения, это указывает на то, что поярчение в ячейке из четырех пикселов связано с ячейкой локальных трехминутных колебаний. Для того чтобы быть уверенным в этом выводе, нами для сравнительного анализа была выбрана площадка площадью в 12 пикселов, в которой отсутствуют поярчения. Спектр среднего сигнала от этой площадки приведен на графике рис. 3f. Трехминутные колебания в этом спектре сильно ослаблены. Наряду с ними стали видны слабые четырехминутные колебания. Очевидно, что трехминутные колебания в этой спокойной площадке существенно слабее, чем в четырех пикселях, в которых произошло мощное поярчение. Таким образом, наблюдения в диапазоне 1600 А показывают усиление трехминутных колебаний в месте возникновения мощного поярчения. Искажения спектра не позволяют исследовать этот эффект в других местах возникновения мощных поярчений. Многочисленные наблюдения (Джесс и др., 2012; Прасад и др., 2015; Чае и др., 2017; Эбади и др., 2017) показывают, что трехминутные колебания наблюдаются только в ярких точках, которые имеют очень малые угловые размеры. Наш анализ наблюдений в диапазоне 1600 Å не может обнаружить ячеек трехминутных колебаний столь малых размеров из-за недостаточно большого пространственного разрешения.

4. ПОЯРЧЕНИЯ И ТРЕХМИНУТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ВЕРХНЕЙ ФОТОСФЕРЕ

Анализ наблюдений в диапазоне 1600 Å показал, что поярчения в температурном минимуме связаны с трехминутными колебаниями, которые в виде медленных волн приходят в температурный минимум и далее в хромосферу из фотосферных слоев пятна. Естественно, имеет смысл исследовать, что происходит в фотосфере в тех ее областях, над которыми наблюдаются поярчения. Это оказалось возможным благодаря наблюдениям в диапазоне 1700 Å. Излучение на этой частоте исходит из верхних слоев фотосферы. На рис. 4а представлена гистограмма максимальных амплитуд в диапазоне 1700 Å, построенная по тому же принципу, что и гистограмма для диапазона 1600 А, показанная на рис. 2b. Оказалось, что в верхней фотосфере также наблюдаются мощные одиночные поярчения, которые соответствуют наиболее мощным поярчениям в температурном минимуме. Но в тех местах, где в температурном минимуме возникали относительно более слабые поярчения, никаких даже слабых поярчений не наблюдается. Причем имеет место удивительная особенность поярчения в диапазоне 1700 Å наблюдаются только в той половине пятна, в тех же пикселах, что и в диапазоне 1600 А, но с меньшей амплитудой. Подробно проанализированное нами одиночное поярчение в диапазоне 1600 Å (см. рис. 3) полностью отсутствует в диапазоне 1700 Å. На рис. 4b показаны флуктуации средней интенсивности в диапазоне 1700 Å в тот же отрезок времени, что и в тех же четырех пикселах на рис. 3d. Никаких, даже ничтожных следов поярчения в диапазоне 1700 Å не наблюдается. Так же как и в случае диапазона 1600 Å, мы нашли амплитудный спектр колебаний среднего сигнала от четырех пикселов, в которых мы ожидали найти поярчение. Этот спектр показан в верхней части рис. 4с со шкалой амплитуд на левой оси ординат. Для сравнения на этом же графике показан средний спектр от квадрата из 24 пикселов, окружающих центральные четыре пиксела и отстоящих от них на два пиксела. Этот спектр показан в нижней части графика на рис. 4с со шкалой амплитуд на правой оси ординат. Оказалось, что в центральных четырех пикселах доминируют трехминутные колебания точно так же, как это имеет место в диапазоне 1600 Å. В то же время в 24 пикселах, окружающих на некотором расстоянии центральные четыре пиксела, доминируют четырех-пятиминутные колебания, хотя трехминутные колебания также присутствуют. Присутствие трехминутных колебаний вне центральной ячейки может быть следствием недостаточно высокого пространственного разрешения наблюдений. Надо отметить, что в отличие от диапазона 1600 Å пятиминутные колебания наблюдаются в сигнале от многих пиксел в диапазоне 1700 А. Это является следствием того, что излучение в диапазоне 1700 А возникает в фотосфере, в то время как излучение в диапазоне 1600 Å возникает в температурном минимуме, где отсутствуют пятиминутные колебания вследствие их фильтрации. Однако, как это видно на графике рис. 4с, пятиминутные колебания



Рис. 4. (а) — Гистограмма максимальных амплитуд для канала 1700 Å. (b) — Средний сигнал для тех же четырех пикселов, что и на рис. 3. (c) — Средний спектр от четырех пикселов, как и на рис. 3е (верхний), и средний спектр 24 пикселов, образующих квадрат вокруг ячейки из четырех пикселов (нижний). (d), (e), (f) — Гистограммы максимальных амплитуд для каналов 304, 193, 171 Å.

отсутствуют в ячейке из четырех пиксел, в которых на уровне температурного минимума возникает мощное поярчение. Вместе с данными наблюдений трехминутных колебаний в ярких точках (Джесс и др., 2012; Прасад и др., 2015; Чае и др., 2017; Эбади и др., 2017) это свидетельствует в пользу того, что именно яркие точки в пятне это те места, где возникают мощные поярчения.

Мощные поярчения после их возникновения в нижних слоях атмосферы пятна распространяются вверх через хромосферу в корону. Это подтверждается наблюдениями в диапазонах 304, 193 и 171 Å. Гистограммы максимальных амплитуд в пикселах представлены на рис. 4d,e,f.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ наблюдений показывает, что наряду с классическими, повторяющимися с интервалом порядка трех минут поярчениями, наблюдаются мощные одиночные поярчения, иногда возникающие с интервалами порядка десятков минут. Все эти типы поярчений описываются в рамках модели, предложенной Жугждой (2018). Не вызывает сомнений связь классических поярчений с трехминутными колебаниями. Изучение взаимосвязи трехминутных колебаний и мощных поярчений осложняется искажениями спектра колебаний короткими импульсами поярчений. Однако на примере единичных мощных поярчений удалось установить взаимосвязь трехминутных колебаний и мощных поярчений. Как стало выясняться в последние годы, источниками трехминутных колебаний являются яркие точки в тени пятна. Таким образом, взаимосвязь ярких точек, трехминутных колебаний соответствует гипотезе о существовании подфотосферного резонатора на медленных волнах, развитой в работах Жугжды (1984, 2018) и Жугжда и Сыч (2014, 2018). Очевидно, что необходимо дальнейшее развитие этой гипотезы и анализ наблюдений с более высоким разрешением, ставших доступными в последние годы (Чае и др., 2017).

Наряду с разработкой механизма возникновения поярчений в пятнах стоит задача построения модели этого явления, которая необходима для интерпретации наблюдений. Для разработки моделей поярчений в пятнах используется численное моделирование (см., например, Фелипе и др., МОЩНЫЕ ПОЯРЧЕНИЯ И ЛОКАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

2018), которое учитывает как перенос излучения, так и нелинейные гидродинамические процессы. К сожалению, до сих пор численное моделирование проводилось для случая однородного магнитного поля. В действительности поярчения имеют место в ячейках с малым пространственным размером, т.е. в тонких магнитных трубках. Нелинейные процессы в тонких магнитных трубках могут существенно отличаться от нелинейных процессов в атмосфере с вертикальным однородным магнитным полем.

Авторы благодарны команде SDO/AIA, обеспечивающей работу аппаратуры и производящей предварительную обработку наблюдений, и за политику открытых данных. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16 и гранта РФФИ № 17-52-80064 БРИКС_а. Авторы благодарны двум анонимным рефери, замечания которых способствовали исправлению ряда недочетов и прояснению ряда вопросов, поднятых в статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Беккерс, Талант (J.M. Beckers and P.E. Tallant), Solar Phys. 7, 351 (1969).
- 2. Беккерс, Шульц (J.M. Beckers and R.B. Schulz), Solar Phys. 27, 61 (1972).
- 3. Боернер и др. (P.F. Boerner, P. Testa, H. Warren, M.A. Weber, and C.J. Schrijver), Solar Phys. **289**, 2377 (2014).
- 4. Витман (A. Witmann), Solar Phys. 7, 366 (1969).
- 5. Гударзи и др. (H. Goodarzi, S. Koutchmy, and A. Adjabshirizadeh), Astrophys. Sp. Sci. **361**, 366 (2016).
- 6. Джесс и др. (D.B. Jess, D.B. De Moortel, M. Mathioudakis, D.J. Christian, K.P. Reardon, P.H. Keys, and F.P. Keenan), Astrophys. J. **757**, 160 (2012).
- 7. Джиованелли (A. Giovanelli), Solar Phys. 27, 71 (1972).
- 8. Жугжда (I.D. Zhugzhda), Sov. Astron. 23, 42 (1979).
- 9. Жугжда (Y.D. Zhugzhda), MNRAS 207, 731 (1984).
- Жугжда Ю.Д., Письма в Астрон. журн. 44, 354 (2018) [Y.D. Zhygzhda, Astron. Lett. 44, 331 (2018)].
- 11. Жугжда, Джалилов (I.D. Zhugzhda and N.S. Dzhalilov), Sov. Astron. **25**, 477 (1981).
- Жугжда Ю.Д., Сыч Р.А., Письма в Астрон. журн. 40, 638 (2014) [Y.D. Zhugzhda and R.A. Sych, Astron. Lett. 40, 576 (2014)].
- 13. Жугжда, Сыч (Y.D. Zhugzhda and R.A. Sych), Res. Astron. Astrophys. **18**, 105 (2018).
- 14. Зирин, Штейн (H. Zirin and A. Stein), Astrophys. J. **178**, L85 (1972).
- Карлов Н.В., Лекции по квантовой электронике (М.: Наука, 1983).

- 16. Крузидр. (R.J. de la Cruz, L. Rouppe van der Voort, H. Socas-Navarro, and M. van Noort), Astron. Astrophys. **556**, A115 (2013).
- 17. Лемен и др. (J.R. Lemen, A.M. Title, D.J. Akin, et al.), Solar Phys. **275**, 12 (2012).
- 18. Лиидр. (D. Li, D.E. Innes, and Z.J. Ning), Astron. Astrophys. 587, A11 (2016).
- 19. Прасад и др. (K.S. Prasad, D.B. Jess, and E. Khomenko), Astrophys. J. **812**, L15 (2015).
- 20. Резникова и др. (V.E. Reznikova, K. Shibasaki, R.A. Sych, and V.M. Nakariakov), Astrophys. J. **746**, 119 (2012).
- 21. Робертс (В. Roberts), Phil. Trans. R. Soc. A **364**, 447 (2006).
- 22. Родригес и др. (J. de la Cruz Rodriguez, L. Rouppe van der Voort, H. Socas-Navarro, and M. van Noort), Astron. Astrophys. **556**, 115 (2013).
- 23. Руппе ван де Ворт и др. (L. Rouppe van der Voort, R. J. Rutten, P. Sütterlin, P. J. Sloover, and J. M. Krijger), Astron. Astrophys. **403**, 277 (2003).
- 24. Сентено и др. (R. Centeno, H. Socas-Navarro, M. Collados, and J. Trujillo Bueno), Astrophys. J. 635, 670 (2005).
- 25. Сеттеле и др. (A. Settele, J. Staude, and Yu.D. Zhugzhda), Solar Phys. **202**, 281 (2001).
- 26. Сыроватский С.И., Жугжда Ю.Д., Астрон. журн. **44**, 1180 (1967).
- 27. Сыч, Ванг (R. Sych and H. Wang), Astron. Astrophys. **618**, A123 (2018).
- 28. Сыч, Накаряков (R. Sych and V.M. Nakariakov), Astron. Astriphys. **569**, 72 (2014).
- 29. Сыч и др. (R. Sych, R.T.V. Zaqarashvili, V.M. Nakariakov, S.A. Anfinogentov, K. Shibasaki, and Y. Yan), Astron. Astrophys. **539**, A23 (2012).
- 30. Фелипе и др. (Т. Felipe, H. Socas-Navarro, and D. Przybylski), Astron. Astrophys. **614**, A73 (2018).
- 31. Хоменко, Колладос (E. Khomenko and M. Collados), Liv. Rev. Solar Phys. **12**, 6 (2015).
- 32. Чае и др. (J. Chae, J. Lee, K. Cho, D. Song, K. Cho, and V. Yurchyshyn), Astrophys. J. **836**, 18 (2017).
- 33. Чудари, Шимицу (D.P. Choudhary and T. Shimizu), Solar Phys. **288**, 171 (2013).
- 34. Шарма и др. (A. Sharma, G.R. Gupta, D. Tripathi, V. Kashyap, and A. Pathak), Astrophys. J. **880**, 206 (2017).
- 35. Шусслер, Воглер (М. Schüssler and A. Vögler), Astrophys. J. **641**, L73 (2006).
- 36. Эбади и др. (H. Ebadi, V. Abbasvand, and H. Pourjavadi), Astron. Nachr. **338**, 662 (2017).
- 37. Юань и др. (D. Yuan, V.M. Nakariakov, Z. Huang, B. Li, J. Su, Y. Yan, and B. Tan), Astrophys. J. **749**, 49 (2014).