

МЕТОД ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКИХ СМЕЩЕНИЙ И ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА ПО ОПТИЧЕСКИМ ЦИФРОВЫМ СПЕКТРОГРАММАМ СОЛНЦА И ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

© 2008 г. В. И. Ефремов, канд. физ-мат. наук; Л. Д. Парфиненко, канд. физ-мат. наук;
А. А. Соловьев, доктор физ-мат. наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

E-mail: solov@gao.spb.ru

Описан разработанный и применяемый в Главной (Пулковской) обсерватории РАН метод регистрации доплеровских смещений, а также уширенных спектральных линий, вызванных их зеemannовским расщеплением, по оптическим цифровым спектрограммам активных областей Солнца. Показано, что при достаточно длительных (более 4 часов) непрерывных наблюдениях в солнечных пятнах и в магнитных элементах окружающей фотосферы обнаруживаются долгопериодические вариации лучевых скоростей и магнитного поля с характерным периодом около 80 минут. Эти вариации интерпретируются как вертикально-радиальные колебания всего пятна (или магнитного элемента) как целого, вызванные возмущающим действием со стороны окружающей турбулентной среды (фотосферы и конвективной зоны).

Коды OCIS: 230.0230.

Поступила в редакцию 26.09.2007.

1. Введение

Для изучения Солнца разработано много специальных инструментов. Из-за большой яркости Солнца солнечные телескопы имеют малую светосилу и строят большие изображения Солнца. Наряду с адаптивными системами в солнечной астрономии для получения высококачественных изображений используют методы спекл-интерферометрии, ставшие возможными с появлением мощных быстродействующих компьютеров. Интересное развитие получила идея солнечного телескопа открытого типа, т. е. не имеющего закрытой трубы. Первым таким телескопом был пулковский 0,5-метровой автоматический солнечный рефлектор [1], установленный еще в 1977 г. на высоте 4350 м на Восточном Памире (изготовитель – Казанский оптико-механический завод (КОМЗ)). В те годы доминировала идея создания больших вакуумных телескопов и выбора мест с особым по качеству солнечным астроклиматом. Разумеется, вакуумизация телескопа ценой больших материальных затрат может дать неплохие результаты. Однако работы пулковских астрономов доказали, что и рефлектор открытого типа, находящийся в тепловом равновесии с окружающей атмосферой, оснащенный системой анализатора качества и автофокусировки, способен обеспечить теоретическое разрешение полуметрового телескопа не только в горах, но и в пыльном Вольске, и во дворе КОМЗ. Новый нидерландский телескоп открытого типа DOT, снабженный цифровой видеокамерой и системой спекл-интерферометрии, позво-

лил получить непревзойденные по качеству длительные серии изображений Солнца с разрешением лучше 0,3" [2].

В данной работе будет описан разработанный в Главной астрономической обсерватории (ГАО) РАН метод измерения доплеровских смещений и зеemannовского расщепления спектральных линий по цифровым спектрограммам солнечного пятна и прилегающих к нему слоев фотосферы. При обработке полученных этим методом достаточно длительных (до 4-х ч) рядов наблюдений удастся надежно установить, что в солнечном пятне и в окружающих его магнитных элементах наблюдаются не только широкоизвестные 3–5-минутные колебания, но и низкочастотная составляющая часть колебательного спектра с периодами от 40 до 80 мин, которая до недавнего времени оставалась практически неисследованной. Исследованиями в этом направлении занимались и занимаются, главным образом, пулковские астрономы [3–10]. Если высокочастотные, 3–5-минутные колебания, представляющие собой захваченные внутри вертикальной магнитной трубки пятна медленные МГД-волны, давно известны и достаточно хорошо исследованы [например, 11–13], то низкочастотные осцилляции пятна с периодом около 1 ч есть проявление совершенно другого по своей физической природе эффекта. В данном случае мы имеем дело с вертикально-радиальными смещениями всего пятна (или магнитного элемента) в целом как устойчивого локального образования [14–17]. Эти колебания пятна (или мелкомасштабного магнитного элемента) относительно неко-

того состояния глобального равновесия вызваны возмущающим действием на пятно со стороны турбулизованной внешней среды (фотосферы и конвективной зоны). В процесс вовлечены достаточно глубокие (до 2–3 тыс. км) и, соответственно, достаточно плотные слои, а потому характерная частота таких собственных колебаний оказывается довольно низкой. Указанные колебания отчетливо проявляются в наблюдаемых слоях пятна (или магнитного элемента) как по вариациям доплеровских смещений, так и по земановскому расщеплению магниточувствительных линий: когда пятно в целом смещается вверх, оно расширяется в стороны и магнитное поле в нем вследствие сохранения магнитного потока падает, при погружении пятна в более плотные слои фотосферы его магнитное поле, напротив, растет.

Настоящая работа структурирована следующим образом: во втором разделе кратко описаны телескоп и приемная аппаратура, третий раздел посвящен методике обработки исходных спектрометрических данных, в четвертом дается анализ результатов обработки одного из 4-х часовых рядов наблюдений и выявляются особенности колебательных процессов в солнечном пятне и прилегающей фотосфере, пятый раздел содержит краткую интерпретацию полученных результатов на основе модели “мелкого” солнечного пятна, в шестом разделе формулируются выводы работы.

2. Телескоп и приемная аппаратура

Данная работа выполнена на базе телескопа АЦУ-5, являющегося модернизированным горизонтальным солнечным телескопом, оснащенным четырехкамерным термостатированным спектрографом. Все зеркала телескопа изготовлены из ситалла. Целостатная пара свободно установлена на откатной части телескопа, поднятой на 4 м над поверхностью почвы (см. рис. 1). Остальная часть телескопа с объективом, спектрографом и электроникой находится внутри павильона, отделенного от внешней среды толстой плоскопараллельной пластиной диаметром $d = 500$ мм, изготовленной из оптического стекла К-8, через которую и поступает солнечный луч от целостата.

Такая конструкция уменьшает влияние конвективных потоков от почвы и снижает амплитуду дрожаний изображения. Павильон телескопа стоит среди большого поля, которое летом покрывается густой травой, что также благоприятно сказывается на качестве изображения. Недостаток конструкции в том, что откатная часть телескопа смещается на юг и ее нагретая крыша может нарушать температур-



Рис. 1. Откатная часть телескопа с целостатом.

ное равновесие в окружающей воздушной среде. В результате наилучшее качество изображения (в среднем это 2", в отдельные моменты бывают улучшения до 0,5") наблюдается с утра, пока не нагреты павильон и инструмент. В жаркий день с дымкой стабильно хорошее качество может держаться весь день. На памирском солнечном телескопе наилучшее качество наблюдалось около полудня, при максимальной высоте Солнца, что свидетельствует об отсутствии влияния инструментального эффекта на качество изображения.

Кожух спектрографа – двойной с воздушным промежутком и обшит изнутри железными листами. Внутри кожуха стоят светозащитные экраны, экранирующие рассеянный свет от коллиматора на светоприемник и от входной щели на камерные зеркала. Дополнительно боковые стенки изнутри обиты черным бархатом. В результате рассеянный свет внутри спектрографа не превышает нескольких десятых процента.

В спектрографе используется дифракционная решетка 140×150 мм (600 штр/мм) с концентрацией света в желто-зеленой области второго левого порядка и красно-желтой области четвертого правого порядка. Диаметр коллиматорного зеркала 250 мм, фокусное расстояние 8530 мм. Четыре камерных зеркала имеют диаметр 300 мм и фокусное расстояние 8450 мм. Камерные зеркала расположены на одном уровне по дуге окружности с центром на оси решетки. В плоскости камерных зеркал расположено и коллиматорное зеркало, но на 307 мм выше. Решетка располагается внизу под щелью на расстоянии 198 мм по вертикали. Главное зеркало телескопа диаметром $d = 440$ мм имеет фокусное расстояние 17,5 м, что дает на щели спектрографа масштаб 1 мм – 11,78".

В качестве приемной аппаратуры используется или спектрогелиограф-магнитограф на CCD-видеокамере VEC-135 с матрицей 1,2 дюйма с USB-интерфейсом [18], или цифровая зеркальная камера CANON с 8,2-мегапиксельной матрицей размером 22,2x14,8 мм [19]. Матрица (высококачественный CMOS-датчик) дает небольшие шумы даже при чувствительности 1600 ISO. Изображение можно выводить на компьютер в файл формата JPEG или RAW (12 бит). Спектрогелиограф-магнитограф обеспечивает получение: видеокарт магнитных полей и лучевых скоростей активных образований в атмосфере Солнца, монохроматических изображений (спектрогелиограмм) Солнца в любой длине волны видимого спектра, изображений Солнца в ИК линии HeI 1083,0 нм (темные гелиевые точки и корональные дыры).

Цифровая зеркальная камера позволяет автоматически получать временные серии высококачественных спектрограмм выбранного участка Солнца на протяжении светового дня (минимальный интервал 10 с).

3. Методика обработки данных

Исходные данные, полученные на солнечном телескопе АЦУ-5 в ГАО РАН в период 2004–2006 гг., представлены в виде последовательности спектрограмм (битовых карт в формате jpg) участка солнечного спектра в диапазоне 649,379–649,965 нм. Основной исследовательской задачей является изучение квазипериодических низкочастотных колебаний лучевых скоростей и магнитного поля в активных областях Солнца. Наблюдаемая спектральная область выбиралась как в разных долготных областях, так и в центральной части солнечного диска. В основном щель спектрографа проходила через центр достаточно крупного солнечного пятна и активной области, и лишь для сравнительного анализа мы выбирали спокойные области вблизи центра солнечного диска. Щель спектрографа вырезает на поверхности Солнца область размером 3"×180", естественным образом фильтруя практически все гранулярное поле скорости [20]. В зависимости от длительности наблюдений (от 1 до 4 ч) интервалы между спектрограммами выбираются в пределах от 15 до 30 с. Как правило, это была последовательность из 512 спектрограмм. Обработку данного материала можно разбить на два основных этапа: подготовительный и расчетный, позволяющий получить частотно-пространственные карты колебаний лучевых скоростей и магнитного поля для исследуемой области на Солнце. Измерение лучевых скоростей в атмосфере Солнца, как известно, основано на оп-

ределении смещений спектральных линий, обусловленного эффектом Доплера, а измерение солнечных магнитных полей основано в большинстве случаев на эффекте Зеемана, когда при взаимодействии излучающих атомов с внешним магнитным полем спектральная линия поглощения с частотой ν_0 расщепляется в поперечном поле на три компонента. Один компонент с частотой ν_0 линейно поляризован с электрическим вектором перпендикулярным полю. Два других компонента с частотами $\nu_0 \pm \frac{e}{m} \frac{H}{4\pi c}$, где e и m – заряд и масса

электрона, H – напряженность магнитного поля, поляризованы линейно с электрическим вектором, параллельным полю. Если смотреть вдоль поля, центральный π -компонент исчезает, а σ -компоненты имеют круговую поляризацию.

В сильных магнитных полях величина расщепления сравнима с шириной спектральной линии, и это позволяет измерять величину расщепления непосредственно на спектрограммах. В случае слабых магнитных полей компоненты расщепления сильно блендируются и прямая регистрация расщепления невозможна.

Таким образом, изменение ширины спектральной линии δW является прямым следствием изменения величины магнитного поля δH . Разумеется, кроме магнитного поля, целый ряд других физических эффектов влияет на контур линии (в частности, микротурбуленция), но разумно предположить, что за время наблюдения в области формирования излучения линии физические значения параметров среды изменяются несущественно (если вообще как-то изменяются).

3.1. Подготовка данных

Подготовка в основном состоит в разработке сценария действий над одной спектрограммой и применения его ко всей последовательности. Как правило, в сценарий включены следующие действия: изменение размера, перевод в 8-битную графику, инверсия битовой карты (при необходимости), использование фильтров сглаживания, что позволяет выбрать нужную рабочую область, устранить локальные дефекты (царапины, пробитые пиксели), повысить контраст спектральных линий для более точного определения положения центра контура линии.

Сценарий может несколько меняться от наблюдения к наблюдению в зависимости от качества имеющихся спектрограмм. Заключительным этапом подготовки данных является перевод битовой кар-

ты в ASCII коды. Для этого мы используем разработанную нами программу “bmp2sym”, которая формирует текстовый файл в стандартном формате “sym”, принятом на фотометрическом комплексе MFK-200 (ГАО РАН) [21].

3.2. Создание доплер-карт и карт полуширин линий

Это основной этап обработки данных, требующий больших ресурсов компьютера и времени. На процессорах типа AMD Athlon XP 1700+ для создания 7 доплер-карт (т. е. для 7 спектральных линий в выбранном интервале солнечного спектра), используя последовательность из 512 спектрограмм, требуется 8–10 ч счетного времени. Предварительно для определения поля доплер-смещений в солнечном пятне применяется процедура фильтрации интенсивности самого пятна – снятие рельефа пятна, что требует дополнительно 2,5–3 ч работы компьютера. Без этой процедуры практически не удастся построить контур спектральной линии в этой области и, следовательно, определить доплеровское смещение в ней. Для каждой спектральной линии определяются границы области спектра (спектральной полосы) так, чтобы флуктуации линии не выходили за границы полосы за все время наблюдения. Размеры полосы выбираются в зависимости от ширины спектральной линии так, чтобы контур линии в крыльях был достаточно пологим. Это позволяет с высокой точностью определять положения максимума, величину полуширины контура спектральной линии и, соответственно, величины смещений его относительно следующих сканов. Сканирование спектральной линии выполняется на программном уровне: в каждом разрезе (поперек спектральной линии) строится контур, в котором центральная его часть аппроксимируется полиномом 2-й или 4-й степени, за счет чего устраняются отдельные локальные выбросы на профиле линии. Размеры аппроксимируемой части контура зависят от параметра захвата. Для определения доплер-смещений dx он, как правило, варьируется в пределах 60–80% от величины центральной депрессии, а для определения полуширины контура dw – в пределах 40–60%. Выбор таких значений параметра захвата связан с тем, что именно “доплеровская” часть контура наиболее чувствительна к изменениям магнитного поля, в то время как точность измерения доплеровских смещений выше в центральной части контура, если ее аппроксимационная часть не слишком велика. Величина полуширины определяется разностью значений точек захвата на контуре спектральной линии.

Определив при первом сканировании положение центра контура линии (центра тяжести), мы выбираем эту точку в качестве реперной для последующих сканов. Таким образом, при каждом сканировании мы определяем три параметра: смещение, полуширину и фотометрический отсчет в центре контура линии. В результате сканирования линии мы получаем вектор смещений (файл lndat.dx), вектор полуширин (файл lndat.dw) и вектор флуктуации яркости в центральной части контура линии (файл lndat.df). В векторе смещений присутствуют тренды, но порядок их невысок: параметры нейтральных течений для каждой точки поверхности Солнца (точки щели спектрографа) на высотах формирования излучения в ядре каждой из рассматриваемых линий изменяются незначительно, так что скорость таких течений входит в общее поле скорости как константа. Наклон спектральных линий дает линейный тренд, а дисторсия – тренд второго порядка со смещенным или несмещенным центром дисторсии соответственно. Поэтому на предварительном этапе исследования в целях экономии счетного времени основного этапа очень важно правильно определить порядок полинома фильтрации. Проведя такую процедуру для каждой точки спектральной линии по всей последовательности спектрограмм, мы получаем два флуктуационных поля: доплер-смещений для данной спектральной линии и флуктуаций полуширин. Учитывая дисперсию в данной спектральной области, из карты смещений окончательно получаем карту доплер-скоростей, а из карты изменения полуширин – карту флуктуации магнитного поля (в сильном поле магниточувствительная линия расщепляется на сигма-компоненты, что усложняет, но не изменяет принцип измерения).

Полученные таким образом карты позволяют провести необходимый для решения поставленной задачи анализ данных: щель спектрографа вырезает определенную область на Солнце, захватывающую солнечное пятно, а диапазон выбранных линий позволяет рассмотреть распределение доплер-скоростей по всей высоте фотосферы. Считая, что флуктуации скорости обусловлены волновыми и колебательными движениями плазмы активных областей, а флуктуации полуширины контура спектральной линии – изменениями магнитного поля, обусловленными этими же колебательными процессами, мы можем определить характеристики этих полей, установить характерные частоты наблюдаемых квазипериодических колебаний и сопоставить их с имеющимися теоретическими зависимостями.

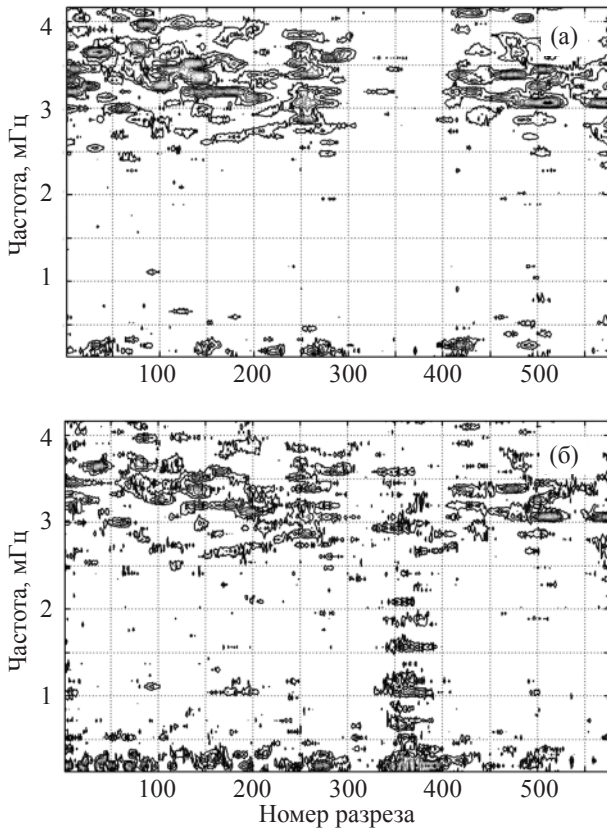


Рис. 2. Частотно-пространственные спектры колебаний лучевых скоростей. а – спектральная карта сильной линии ($h \approx 500$ км), б – слабой линии ($h \approx 190$ км).

4. Анализ результатов обработки и особенности колебательных процессов в солнечном пятне и в прилегающей фотосфере

В качестве примера приведем результаты обработки 4-часовой серии наблюдений активной области 7 мая 2006 г. На рис. 2 приведены частотно-пространственные карты колебаний лучевых скоростей в линии FeI $\lambda = 649,499$ нм, излучающей с высоты 535 км (рис. 2а), и в линии FeI $\lambda = 649,647$ нм с высоты 190 км (рис. 2б) [22]. Сразу обращает на себя внимание тот факт, что колебания в солнечном пятне (область между 300-м и 400-м пикселями по оси абсцисс) ярко выражены во втором и отсутствуют в первом случае. При этом в пятне преобладает низкочастотная 80-минутная мода колебаний.

На рис. 3 приведены фурье-спектры, построенные по одиночным сканам центральной части пятна для колебаний лучевых скоростей и для колебаний магнитного поля соответственно. Видно, что в поле доплер-смещений (рис. 3а) мощность колебаний скорости максимальна на пятой гармонике – это соответствует периоду $T = 256/5 = 51$ мин. Длина

реализации 256 мин. Здесь 1 рх в смещениях (на битовой карте) – 31 м/с, т. е. с такой точностью измеряется доплер-скорость. В поле изменений полуширины контура линий присутствуют два значимых периода: $T_1 \sim 40$ мин и $T_2 \sim 18$ мин. Последний есть и в поле скорости, но там он статистически незначим ($< 1\sigma$). Некоторое различие значений периодов T_1 для разных полей связано с падением частотного разрешения на низких частотах. Необходимо отметить, что рядом с пятном изменения полуширины контура линий dw , т. е. вариации магнитного поля, отсутствовали. Это дает верхнюю оценку изменений магнитного поля в магнитных элементах $\delta H \leq 300$ Гс. В то же время в пятне соответствующие оценки дают $\delta H \sim 600-700$ Гс. Оба спектральных компонента (пики T_1 и T_2 в спектре мощности для пятна) превышают уровень доверия 3σ .

Представленные выше пространственно-частотные спектры (в виде контурных карт) доплеровских смещений и магнитных вариаций показывают, что в солнечном пятне и в окружающей его фотосфере имеются две основные частотные области, в которых амплитуды колебательных процессов выражены наиболее отчетливо. Это, как уже отмечалось во введении, – высокочастотная (2,8–4,2 мГц) полоса с характерным периодом колебаний 5 мин и четко отделенная от нее практически пустым промежутком область низкочастотных колебаний, в которой основная, “несущая” частота (пример-

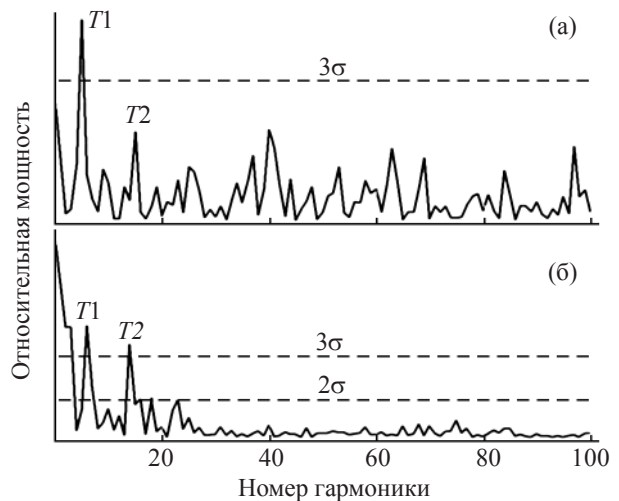


Рис. 3. Фурье-спектры в полях доплер-смещений и изменения уширения линий. а – фурье-спектр, полученный в центральной части пятна (скан № 395) в поле доплер-смещений; б – фурье-спектр того же скана, но в поле изменений полуширины контура линии.

но 0,2 мГц) соответствует периоду колебаний около 80 мин (см. рис. 2б).

Подчеркнем, что в спокойной атмосфере, где нет не только пятен, но и заметных вкраплений достаточно сильных магнитных полей (магнитных элементов), низкочастотная часть спектра колебаний полностью отсутствует. Этот эффект был нами специально тщательно исследован, поэтому мы с полной уверенностью можем утверждать, что долгопериодические колебания характерны только для магнитных структур; в спокойной фотосфере, свободной от сильного магнитного поля, они не наблюдаются.

Вместе с тем, есть заметные различия в структуре спектра долгопериодических колебаний и его распределении по высоте для небольших магнитных элементов (пор) и для самого пятна.

Во-первых, для магнитных элементов, наблюдающихся в окрестности солнечного пятна, указанное выше разделение частотных полос выражено очень отчетливо, в промежутке между двумя основными полосами колебаний нет. В то же время в солнечном пятне интервал между основными полосами с периодами 3–5 и 80 мин заполнен промежуточными колебательными модами (обертонными) с периодами приблизительно 10, 20 и 40 мин (рис. 2б).

Во-вторых, такая картина хорошо прорисовывается только для колебаний на малых высотах ($h < 200$ км). В спектральных линиях, образующихся выше ($h > 500$ км), низкочастотные моды в пятне уже не проявляются (рис. 2а). Это говорит о том, что в пятне амплитуды долгопериодических колебаний затухают с высотой достаточно быстро на шкале, сравнимой с высотой однородной атмосферы. В магнитных элементах амплитуда долгопериодических колебаний также падает с высотой, но на более протяженной шкале. Видимо, это различие связано с тем, что величина вильсоновской депрессии (ζ) (рис. 4) в пятне заметно больше, чем в магнитном элементе, который характеризуется и меньшей напряженностью магнитного поля, и меньшей степенью охлаждения поверхностного слоя плазмы. Аналогичные эффекты для другой активной области отмечались нами в работе [23], но там речь шла только о поле доплеровских смещений, вариации магнитного поля вообще не рассматривались.

5. Интерпретация полученных результатов на основе модели “мелкого” солнечного пятна

Основной интерес для нас представляют именно низкочастотные колебания, поскольку их физическая природа принципиально отличается от при-

роды высокочастотной составляющей, которая обусловлена особенностями распространения магнитозвуковых волн внутри магнитной трубки пятна. Этот тип колебаний с периодами 3–5 мин в пятнах давно обнаружен, широко обсуждается в литературе, и его механизм неплохо изучен [например, 11–13]. В случае же колебаний с периодами порядка часа и более мы имеем дело с квазипериодическими вертикальными смещениями всего пятна или магнитного элемента как целого. Далее мы будем рассматривать только модель пятна и говорить только о собственных колебаниях пятна, имея в виду, что все сказанное относится и к магнитному элементу, который можно рассматривать как малое пятно (пору) с небольшим значением напряженности магнитного поля, около 1–2 кГс и относительно небольшим падением эффективной температуры по отношению к невозмущенной фотосфере. Указанные смещения плазмы пятна носят колебательный характер, поскольку солнечное пятно в целом является устойчивым долгоживущим образованием. Эти смещения, сохраняя общую структуру пятна, затрагивают глубокие его слои, вплоть до глубин 2–3 тыс. км. Благодаря этому в колебательный процесс вовлекаются большие массы газа и периоды колебаний оказываются достаточно большими.

Мы говорим о колебаниях пятна как целого, имея в виду, что это магнитное образование четко локализовано в солнечной атмосфере не только по радиусу, но и по глубине. Теоретически еще в начале 80-х гг. одним из авторов настоящей работы было показано, что магнитная силовая трубка, формирующая пятно, уже на глубинах около 3000 км резко расширяется в стороны и идет дальше, в глубокие слои конвективной зоны, уже в сильно ослабленном, диффузном виде [8, 14, 24]. Таким образом, солнечное пятно как область относительно более холодной плазмы и сильно сжатого магнитного поля с напряженностью 2–5 кГс оказывается сугубо поверхностным образованием, оно проникает вглубь Солнца лишь на 2–4 тыс. км. В настоящее время этот теоретический вывод о малой эффективной глубине солнечного пятна, впервые сделанный более 20 лет назад [24], надежно подтвержден данными современной локальной гелиосейсмологии, методы которой позволяют, “заглянув” под солнечное пятно, восстановить поле температур и течений на глубинах от 0 до 25–45 тыс. км [25, 26]. Оказалось, что, действительно, область, в которой магнитное поле сильно сжато (до нескольких кГс), а температура заметно понижена, простирается всего лишь до глубин в 3–4 тыс. км. В более глубоких слоях температура плазмы в магнитной трубке пятна становится уже заметно выше, чем в окружающей среде. По ус-

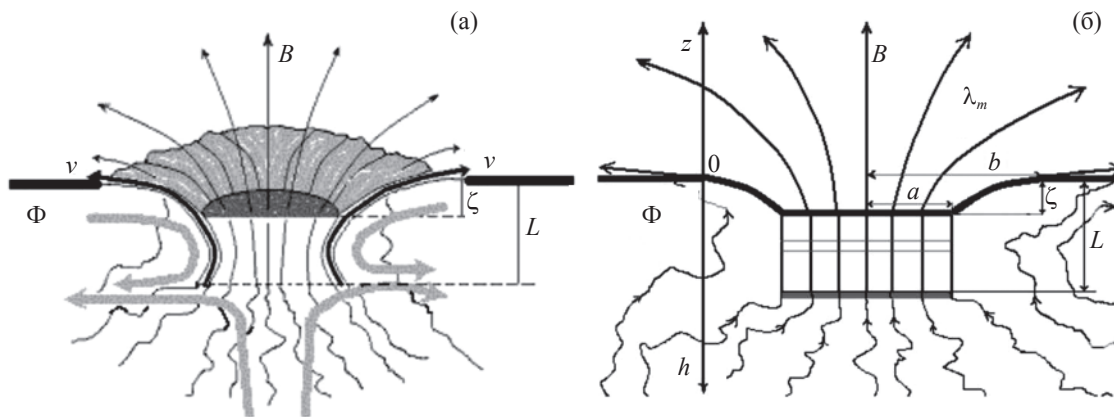


Рис. 4. Схема модели “мелкого” солнечного пятна. а – вертикальный разрез солнечного пятна. Магнитное поле пятна имеет перетяжку на глубине нескольких тыс. км. ζ – вильсоновская депрессия, L – глубина нижней магнитной границы. Толстые серые линии – течения вне пятна: сходящиеся при $h < L$ и расходящиеся при $h > L$; б – упрощенная модель пятна на глубинах $\zeta < h < L$. λ_m – магнитная шкала высот над пятном, a – радиус тени, b – радиус пятна с полутенью. Характерное значение внешнего вертикального магнитного поля в окружающей пятно фотосфере (Φ) 250 Гс.

ловиям вертикального равновесия плотность плазмы в области, где магнитное поле падает с глубиной, также не может быть меньше, чем в конвективной зоне без магнитного поля на том же геометрическом уровне. Следовательно, из простого условия поперечных давлений вытекает, что уже на глубине около 3–4 тысяч км магнитное поле в силовой трубке, формирующей пятно, должно быть пренебрежимо мало по сравнению с газовым давлением и с магнитным полем в ее холодной части, т. е. собственно в пятне. В энергетическом смысле магнитное поле солнечного пятна неэффективно на глубинах в 3–4 тыс. км, хотя геометрически магнитные силовые линии, разумеется, обрывать не могут, поскольку $\text{div } B = 0$. Они проходят и дальше, может быть, вплоть до основания конвективной зоны, но это магнитное поле – слабое, диффузное, рассеянное турбулентными пульсациями. Таким образом, согласно изложенному модель солнечного пятна, представленная на языке средних по его сечению величин и обобщенных интегральных характеристик (мы не учитываем при таком подходе обычно присутствующую в солнечном пятне тонкую структуру магнитного поля), может быть описана не только средней напряженностью магнитного поля в пятне B , радиусом тени a , магнитной шкалой высот λ_m , величиной вильсоновской депрессии ζ , но также и глубиной нижней магнитной границы пятна L .

Именно физическое существование такой характерной границы и позволяет нам говорить о колебаниях солнечного пятна как целого. На рис. 4 представлена схематично модель “мелкого” солнечного

пятна. Более подробное описание модели можно найти в работе [17], а здесь мы ограничимся лишь ее основным результатом в виде теоретической зависимости частоты собственных колебаний пятна от напряженности его магнитного поля (от размера

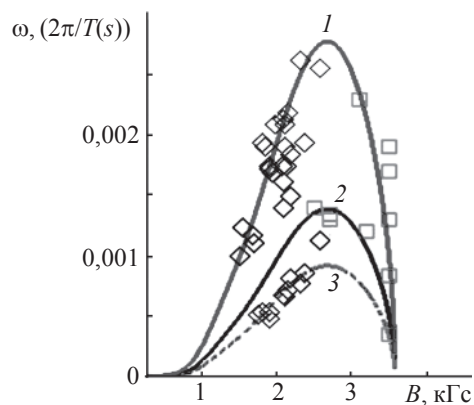


Рис. 5. Зависимость частоты основной моды и субгармоник от величины магнитного поля пятна. 1 – теоретическая зависимость $\omega_1(B)$ для основной моды, когда колеблется только тень пятна (магнитный цилиндр с радиусом сечения a и длиной L); 2, 3 – та же зависимость для второй и третьей субгармоник. $\omega_2 = \omega_1/2$, $\omega_3 = \omega_1/3$, возникающих, когда в колебательный процесс вовлекается полутень пятна [17]. Ромбиками отмечены значения $\omega(B)$, полученные по данным о временных вариациях магнитного поля пятен [15, 17]. Квадраты – данные, полученные независимо по измерениям лучевых скоростей в пятнах.

пятна эта функция не зависит, поэтому все сказанное ниже о пятне можно отнести и к поре, и к любому малому магнитному элементу).

На рис. 5 значение циклической частоты $0,00052 \text{ с}^{-1}$ соответствует периоду колебаний в 200 мин, а $0,0026 \text{ с}^{-1}$ – периоду в 40 мин. В этих пределах и находятся периоды реально наблюдаемых собственных колебаний пятна. Область устойчивости пятна ограничена, как видно из приведенного рисунка, значениями магнитного поля $0,8\text{--}3,5 \text{ кГс}$ (напомним, что здесь речь идет о напряженности среднего по тени пятна магнитного поля, локальные значения поля в центре пятна могут превосходить эту среднюю величину в $1,2\text{--}1,5$ раза). Найденный теоретически интервал устойчивости солнечных пятен полностью соответствует наблюдаемым фактам.

6. Выводы

1. Благодаря применению современных цифровых двумерных CCD-приемников излучения появляется возможность систематически изучать тонкую структуру колебательных процессов атмосферы Солнца по спектрам, регистрируемым на малосветосильных классических солнечных телескопах горизонтального типа.

2. Примененная в настоящей работе методика регистрации доплеровских смещений и зеемановских уширений, проводящейся одновременно для всех линий, попадающих на матрицу, дает возможность исследовать изменения характеристик колебательных процессов с высотой в солнечной атмосфере в зависимости от уровня образования спектральных линий.

3. Длительные ряды непрерывных наблюдений вариаций поля скорости и магнитного поля в активных областях позволяют надежно выявить долгопериодические (от 40 до 80 мин) колебания солнечных пятен и магнитных элементов, расположенных в прилегающей к пятну фотосфере. Этот эффект является малоисследованным и нуждается в дальнейшем тщательном изучении.

4. Наблюдаемые долгопериодические вариации лучевой скорости в пятнах были предсказаны в рамках современной модели солнечного пятна, учитывающей существование выраженной “нижней магнитной границы” пятна, и интерпретируются как собственные вертикально-радиальные колебания пятна как целого около положения устойчивого равновесия.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 16 “Солнечная активность и физические процессы в системе “Солнце–Земля”, а также гранта СПб НЦ № 23.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Парфиненко Л.Д.* Наблюдения Солнца на Памире // Международный ежегодник. “Знание”. Сер. “Наука и Человечество”. 1981. 317 с.
2. *Sobotka M., Sütterlin P.* Fine structure in sunspots. IV. Penumbra grains in speckle reconstructed images // *A&A*. 2001. V. 380. P. 714–718.
3. *Borzov V.V., Vialshin G.F., Nagovitsyn Yu.A.* Variations of the Field Strengths in the Sunspots of 1982 June and July Groups and 1984 June Group // *Contrib. Astr. Obs. Skalnaté Pleso*. 1986. V. 15. P. 75–85.
4. *Наговицын Ю.А., Наговицына Е.Ю.* Определение точных гелиографических координат на Горной станции ГАО АН СССР // *Солн. данные*. 1984. № 11. С. 76–81.
5. *Gelfreikh G.B., Shibasaki K., Nagovitsyna E.Yu., Nagovitsyn Yu.A.* Analysis of quasi-periodic oscillations of position and brightness of details of the radio sources of the solar active regions based on observations made with the radio heliograph Nobeyama // *Proc. of IAU Symposium № 223. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*. St. Petersburg. 2004. P. 525–528.
6. *Gelfreikh G., Nagovitsyn Yu.A., Nagovitsyna E.Yu.* Quasi-periodic oscillations of the radio emission of the solar plasma structures and their nature // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2006. V. 58. № 1. P. 29–35.
7. *Гельфрейх Г.Б., Наговицын Ю.А., Наговицына Е.Ю., Гольдварг Т.Б., Рябов Б.И.* Квазипериодические колебательные процессы над солнечными пятнами по данным радиогелиографа Нобейма // *Тр. Междунар. конф. “Климатические и экологические аспекты солнечной активности”*. СПб., 2003. С. 111–116.
8. *Наговицын Ю.А.* Крутильные колебания и эффективная глубина солнечных пятен // *Письма в Астрон. журн*. 1997. Т. 23. № 11–12. С. 859–862.
9. *Nagovitsyn Yu.A., Vyalshin G.F.* Quasi-periodic Variations of Magnetic Field Strength in Sunspots // *Астрон. циркуляр*. 1992. № 1553. С. 1–2.
10. *Наговицын Ю.А., Наговицына Е.Ю.* Квазипериодические колебания солнечных пятен на временных шкалах десятки минут и сотни часов // *Тр. X Пулковской конф. по физике Солнца “Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления”*. СПб.: ГАО РАН, 2006. С. 73–104.
11. *Thomas J.H., Cram L.E., Ney A.H.* Five-minute oscillations as a subsurface probe of sunspot structure // *Nature*. 1982. Т. 297. P. 485.
12. *Bogdan T.J.* Sunspot oscillations: review // *Solar Phys*. 2000. V. 192. P. 373–394.
13. *Zhukov V.I.* On the calculation of the sunspot umbral oscillations // *A&A*. 2005. V. 433. P. 1127–1132.
14. *Соловьев А.А.* Элементарная энергетическая модель солнечного пятна // *Астрономический журнал*. 1984. Т. 61. В. 4. С. 764–770.
15. *Соловьев А.А., Наговицын Ю.А.* Долгопериодические колебания солнечных пятен // *Тр. конф. “Солнечная*

- активность как фактор космической погоды”. СПб., 2005. С. 593–598.
16. *Соловьев А.А.* Модель солнечного пятна с гравитационной энергией связи // Тр. конф. “Солнечная активность как фактор космической погоды”. СПб., 2005. С. 577–588.
 17. *Соловьев А.А., Киричек Е.А.* Магнитная структура, равновесие, устойчивость и долгопериодические колебания солнечных пятен // Тр. X Пулковской конф. по физике Солнца “Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления”. СПб.: Пулково, ГАО РАН, 2006. С. 49–72.
 18. *Parfinenko L.D.* Research of sunspot oscillations. The Pulkovo CCD spectroheliograph-magnitograph // *Solar Phys.* 2003. V. 213. № 2. P. 291–299.
 19. *Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д.* Получение лучевых скоростей из цифровых изображений солнечного спектра // *Изв. ГАО.* 2004. № 217. С. 531–535.
 20. *Deubner F.L.* The Sun as a Star // NASA. SP-450. 1981. P. 75.
 21. *Вахтов В.Н. и др.* Микрофотометрический комплекс МФК-200 // *Известия ГАО.* 1996. № 211. С. 213–220.
 22. *Weihr E., Kneer F.* Spectroscopy of the solar photosphere with high spatial resolution // *A&A.* 1988. V. 195. P. 310–314.
 23. *Ефремов В. И., Парфиненко Л. Д., Соловьев А. А.* Исследование долгопериодических колебаний лучевых скоростей в пятне и вблизи солнечного пятна на разных уровнях фотосферы // *Астрон. Журнал.* 2007. Т. 84. В. 5. С. 450–460.
 24. *Соловьев А.А.* Крутильные колебания пятен// *Солнечные данные.* 1984. № 1. С. 73–78.
 25. *Zhao J., Kosovichev A. G., Duval T.L.* Investigation of mass flows beneath a sunspot by time-distance helioseismology // *Astrophys. J.* 2001. V. 557. P. 384–388.
 26. *Zhao J., Kosovichev A. G.* Torsional Oscillation, Meridional Flows, and Vorticity Inferred in the Upper Convection Zone of the Sun by Time-Distance Helioseismology // *Astrophys. J.* 2004. V. 603. P. 776–784.
-