

УДК 523.94; 523.-1/-8

Исследование короткопериодических вариаций напряженности и профилей Стокса спектральных линий при наблюдениях крупномасштабных магнитных полей Солнца

М.Л. Демидов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, а/я 291, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 31 января 2007 г.

Аннотация. Исследование возможных короткопериодических вариаций (в диапазоне “минуты-часы”) крупномасштабных магнитных полей (КМП) Солнца, включая общее, является весьма актуальной проблемой современной гелиофизики и некоторых аспектов геофизики. Обычно изучение таких вариаций ограничивалось спектральным анализом временных серий только одного параметра – эффективной напряженности. Однако значительный интерес представляет исследование возможных проявлений колебательных процессов в изменениях других параметров, детектирование которых стало возможным с внедрением в практику наблюдений стоксометрических методов. В частности, интенсивности в различных частях профилей спектральных линий, различных характеристик V-профилей. Такой подход значительно обогащает физическую картину динамических явлений в солнечной атмосфере. Предметом анализа данной работы является длительный ряд наблюдений КМП, выполненных на телескопе СТОП Саянской обсерватории. Исходя из полученных данных, сделан вывод о реальности вариаций напряженности с периодами около 80, 60 и, возможно, 35, 21 и 12 минут. Колебания с периодом 5 минут в вариациях напряженности не обнаружены, но присутствуют в вариациях некоторых других параметров.

STUDY OF THE SHORT-PERIOD VARIATIONS OF STRENGTH AND SPECTRAL LINES STOKES PROFILES IN OBSERVATIONS OF THE LARGE-SCALE MAGNETIC FIELDS OF THE SUN, *by M.L.Demidov*. A study of possible short-period variations (in the diapason “minutes-hours”) of the large-scale magnetic fields (LSMF) of the Sun, including the mean magnetic field, is a most topical problem of modern astrophysics and some aspects of geophysics. Usually, an investigation of such variations has been restricted by time series spectral analysis of only one parameter – an effective magnetic field strength. However, there is a significant interest in studying possible manifestation of oscillatory phenomena in variations of others parameters, such as intensities in various parts of spectral lines, various Stokes V-profile characteristics. Their detection has been made possible with implementation of spectropolarimetric methods in observations. Such an approach enriches significantly the physical picture of dynamic processes in solar atmosphere. The aim of this paper is to analyze the long-term LSMF observations taken on the STOP telescope at the Sayan observatory. It may be inferred that strength variations with periods 80, 60 and, probably, 35, 21 and 12 minutes are real. Oscillations with 5-minute period have not been found in strength variations, but there are in variations of some other parameters.

Ключевые слова: Солнце, магнитное поле, осцилляции, параметры Стокса

1 Введение

Исследование временной переменности глобального магнетизма Солнца, одним из важных индикаторов которого является общее магнитное поле (ОМП) – это актуальное направление гелиофизики, имеющее к тому же важное значение для многих астрофизических проблем, а также некоторых аспектов геофизики. Масштабы времени, на которых исследуется переменность крупномасштабных магнитных полей (КМП) Солнца, весьма обширны – от вековых и циклических до короткопериодических, возможно связанных с глобальными пульсациями и (или) определенными динамическими явлениями. Интерес к изучению короткопериодических колебаний (КПК) ОМП Солнца зародился давно, буквально с началом регулярных наблюдений. Отрадно отметить, что неоспоримый мировой приоритет и в этом вопросе (Северный, 1971a; Северный, 1971b; Котов и др., 1976), как и в исследованиях ОМП вообще, принадлежит Крымской астрофизической обсерватории, в которой наблюдения ОМП были начаты в 1968 г. (Северный, 1969). Следует отметить, что аналогичная проблема – существование быстрых (меньше суток) временных флуктуаций магнитного поля – давно обсуждается и применительно к некоторым магнитным звездам (Марси, 1984).

Одной из причин, обуславливающих важность изучения КПК ОМП Солнца, является проверка, в перспективе, возможности детектирования таким способом колебательных процессов (в частности, гравитационных волн), передаваемых из солнечных недр посредством силовых линий магнитного поля (Гарсия и др., 1999; Чаплин и др., 2003; Чаплин и др., 2004). Для проверки существования 160-минутных колебаний в общем магнитном поле Солнца были проанализированы длительные ряды (до 11 часов в день) наблюдений, выполненные в Крымской и Маунт-Вилсоновской обсерваториях (Котов и др., 1976; Котов и др., 1983), и сделан вывод о реальности таких колебаний с амплитудой около 1 мкТ. В последующем, с использованием этого же наблюдательного материала и добавлением новых измерений, выполненных в Саянской обсерватории, был проанализирован вопрос о переменности ОМП и в более широкой области периодов, вплоть до 20 минут (Демидов и др., 1990; Котов и др., 1992). Интересен полученный (Котов и др., 1992) результат (для одного из дней длительных измерений ОМП в Крыму и в Саянах (25 августа 1988 г.)): приблизительно на протяжении одного часа, с 08^h UT до 09^h UT, измерения перекрывались и показали практически идентичные вариации (относительно среднего значения) напряженности сигнала, от –10 мкТ до +10 мкТ. Обсуждение вопроса о достоверности наблюдаемых периодичностей в вариациях напряженности ОМП Солнца выполнено в (Демидов, 1995), где был также вычислен когерентный спектр мощности для двух последовательных дней длительных наблюдений. Анализу возможности существования 5-минутных колебаний ОМП посвящены работы (Йошпа и др., 1973; Григорьев и Демидов, 1991). В последние годы интерес к исследованию КПК ОМП Солнца возродился в совершенно ином и весьма интересном аспекте – возможной связи КПК с некоторыми конкретными периодами с таким интересным и важным с прикладной точки зрения явлением, как корональные выбросы массы (Боберг и Лундстедт, 2002; Боберг и др., 2002; Чаплин и др., 2004).

Следует особо отметить, что все предыдущие исследования КПК ОМП и КМП Солнца выполнялись с использованием исключительно магнитографических измерений. Других просто не существовало. Ситуация коренным образом изменилась с внедрением в практику наблюдений на телескопе СТОП Саянской обсерватории стоксометрических измерений. Подробную информацию об особенностях таких измерений, а также о первых результатах применительно к исследованиям ОМП Солнца, можно найти в работах (Демидов и др., 2002; Демидов и др., 2005). Совершенно очевидно, что обладание подробной информацией о распределении I- и V-параметров Стокса по контурам спектральных линий значительно расширяет диагностические возможности исследований солнечного магнетизма. В данной

работе такие наблюдения впервые исследованы на предмет наличия возможных периодичностей в вариациях различных параметров применительно к линии FeI 525.02 нм.

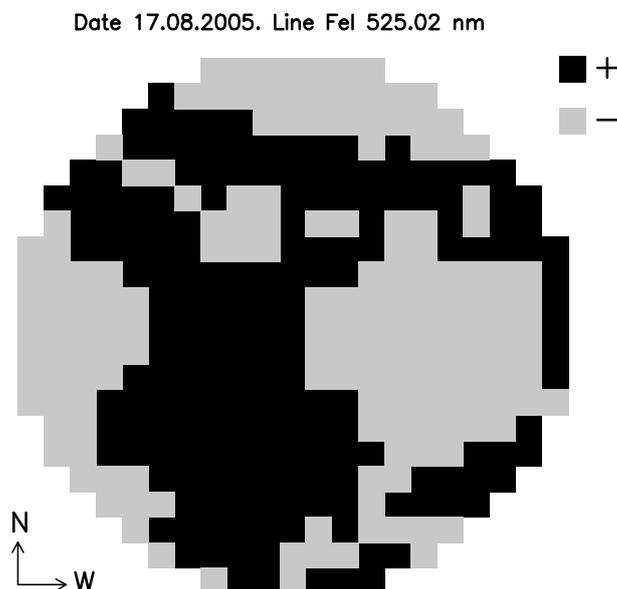


Рис. 1. Карта распределения по диску Солнца полярностей крупномасштабных магнитных полей (спектральная линия FeI $\lambda 525.02$ нм, пространственное разрешение $100''$), построенная по наблюдениям на телескопе СТОП Саянской обсерватории 17 августа 2005 г.

Анализировались: напряженность магнитного поля (B), лучевая скорость (S) (выраженное в единицах скорости смещение спектральной линии относительно некоторого репера), асимметрия амплитуд (δa) и площадей (δA) V-профиля Стокса, относительное смещение I- и V-профилей (V_{zc}) (выраженное в единицах лучевой скорости расстояние между центром линии и точкой пересечения V-параметром нулевого уровня – zero-crossing shift). Несомненно, что совместный анализ таких параметров способен значительно обогатить картину возможных проявлений колебательных процессов в солнечной атмосфере. Кроме того, появляется возможность отделить кажущиеся вариации напряженности, вызванные вариациями параметров спектральной линии (Гроссман-Доерс и др., 1987), от истинных изменений магнитного поля.

2 Наблюдения и результаты

Предметом анализа данной работы являются наблюдения магнитного поля Солнца, выполненные автором на телескопе СТОП Саянской обсерватории 17 августа 2005 г. Как и ранее при аналогичных исследованиях в магнитографическом режиме (Григорьев и Демидов, 1991; Демидов, 1995), для увеличения светового потока наблюдения проводились не от всего диска Солнца, как при обычных наблюдениях ОМП, а только от центральной зоны диаметром 0.5 полного диаметра, что достигалось соответствующей расфокусировкой изображения. Как показано в (Шеррер, 1973), а также позднее с использованием квазиодновременных измерений ОМП и магнитограмм всего диска Солнца в стоксометрическом режиме (Демидов и др., 2002; Демидов и др., 2005), сигнал ОМП формируется преимущественно в пределах именно такой области диска. Контроль нулевого уровня выполнялся, как обычно, с использованием

полуволновой ($\lambda/2$) фазовой пластинки, периодически вводимой в пучок света перед целостатом. Прежде, чем приступить к записи длительного ряда, были выполнены стандартные программы наблюдений ОМП и КМП в обычном режиме. Напряженность ОМП в линии FeI $\lambda 525.02$ нм составила 0.25 Гс, магнитограмма КМП в черно-белом мозаичном виде показана на рис. 1.

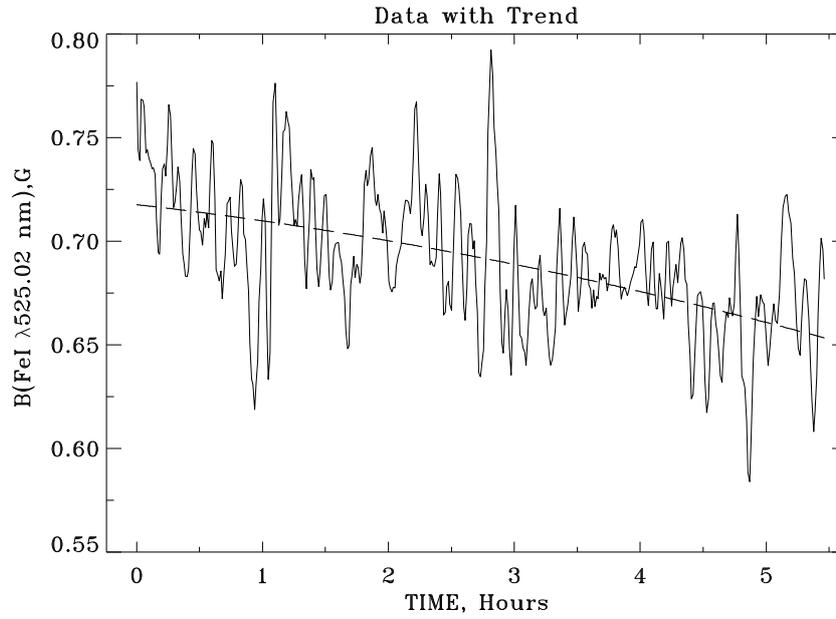


Рис. 2. Временная серия измерений напряженности магнитного поля от центральной области диска Солнца диаметром, равным половине полного диаметра Солнца. Дата наблюдений 17.08.2005 г., спектральная линия FeI $\lambda 525.02$ нм. Пунктирной линией показан тренд, аппроксимированный параболой

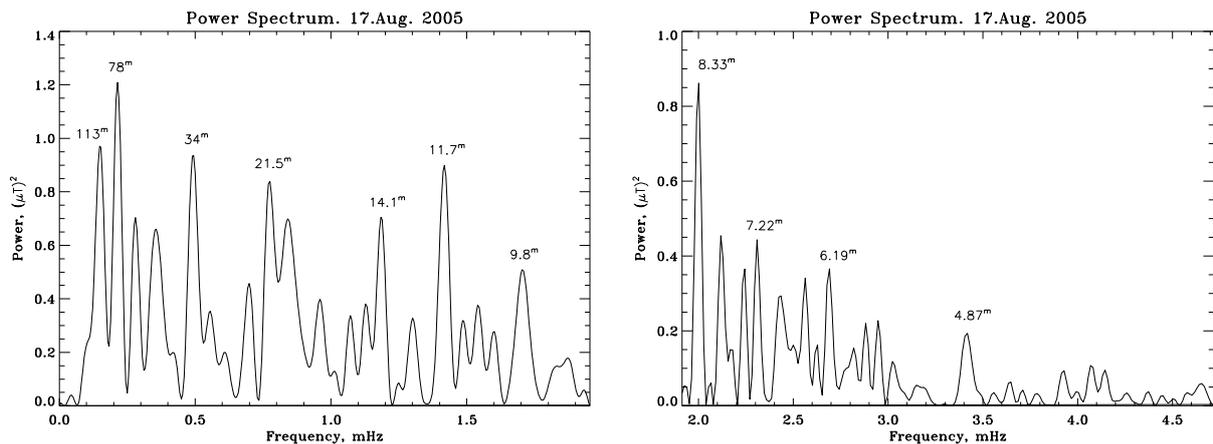


Рис. 3. Спектры мощности вариаций напряженности магнитного поля В в линии FeI $\lambda 525.02$ нм в области длинных (левая панель) и коротких (правая панель) периодов

Длительность непрерывных измерений от полдиска Солнца для анализа искомых вариаций составила около 5 часов 21 мин. – 444 точки со временем накопления 44 секунды каждая. В

последующем, чтобы уменьшить высокочастотные шумы, использовалась процедура двукратного скользящего усреднения по 3 точкам. В результате временной ряд напряженности в линии FeI $\lambda 525.02$ нм принял вид, показанный на рис. 2. Пунктирной линией на рисунке показан тренд, рассчитанный методом наименьших квадратов в приближении полинома второго порядка. Массив, полученный вычитанием тренда из исходных данных, подвергался в последующем спектральному анализу. Для расчета спектров мощности (периодограмм) использовался алгоритм, изложенный в (Диминг, 1975), преимуществом которого (например, по сравнению с быстрым преобразованием Фурье) является возможность его использования для рядов с перерывами в наблюдениях и/или неравномерной дискретностью по времени. Обработка данных и графическое представление результатов выполнялись с помощью программ, созданных на IDL.

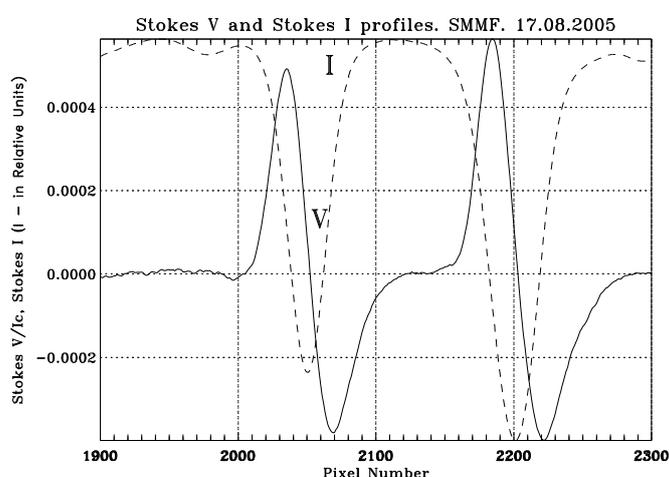


Рис. 4. Распределение I- (в относительных единицах) и V-параметров Стокса в линиях FeI $\lambda 525.02$ нм (слева) и FeI $\lambda 525.06$ нм (справа) в результате более чем 5-ти часовой записи магнитного поля от центральной зоны диска Солнца

Применительно к напряженности, спектры мощности представлены на рис. 3: на левой панели для области относительно более длинных периодов (от нескольких часов до 9 минут), а на правой панели – соответственно для более коротких (от 9 до 3 минут) периодов. Видно, что в области длинных периодов наибольшими по амплитуде являются пики с периодами около 113, 80, 60, 35 и 21 и 12 минут. В области коротких периодов, естественно, наибольший интерес представляет вопрос о наличии или отсутствии пятиминутных колебаний, широко известных из гелиосейсмологии. Видно, что в анализируемых данных имеется пик с периодом 4.87 минут, однако его амплитуда значительно меньше амплитуд соседних пиков с большими периодами, природа которых пока не ясна (скорее всего, они имеют случайную природу). Более того, максимум амплитуд 5-минутных колебаний при наблюдениях лучевых скоростей от Солнца как звезды приходится (см., например, рис. 1 из работы Фосса и др. (1981)) на частоту 3.3 мГц, где в нашем случае, наоборот, имеет место локальный минимум мощности. Так что рис. 3 (правая панель) свидетельствует, скорее всего, об отсутствии в анализируемых данных 5-минутных колебаний.

Приступим теперь к аналогичному анализу других параметров, перечисленных в первом разделе работы: S, $\delta\alpha$ и V_{zc} . Для их иллюстрации на рис. 4 показаны итоговые (усредненные за все время наблюдений) распределения I- и V-параметров Стокса для линий FeI 525.02 нм и

Fel 525.06 нм. Смещения I- и V-профилей Стокса и асимметрия V-профилей очевидны. Временные серии названных параметров приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание значительный тренд в поведении параметра S (верхняя левая панель), что, скорее всего, имеет инструментальную причину. В то же время тренды в остальных параметрах, дифференциальных по своей природе, достаточно малы.

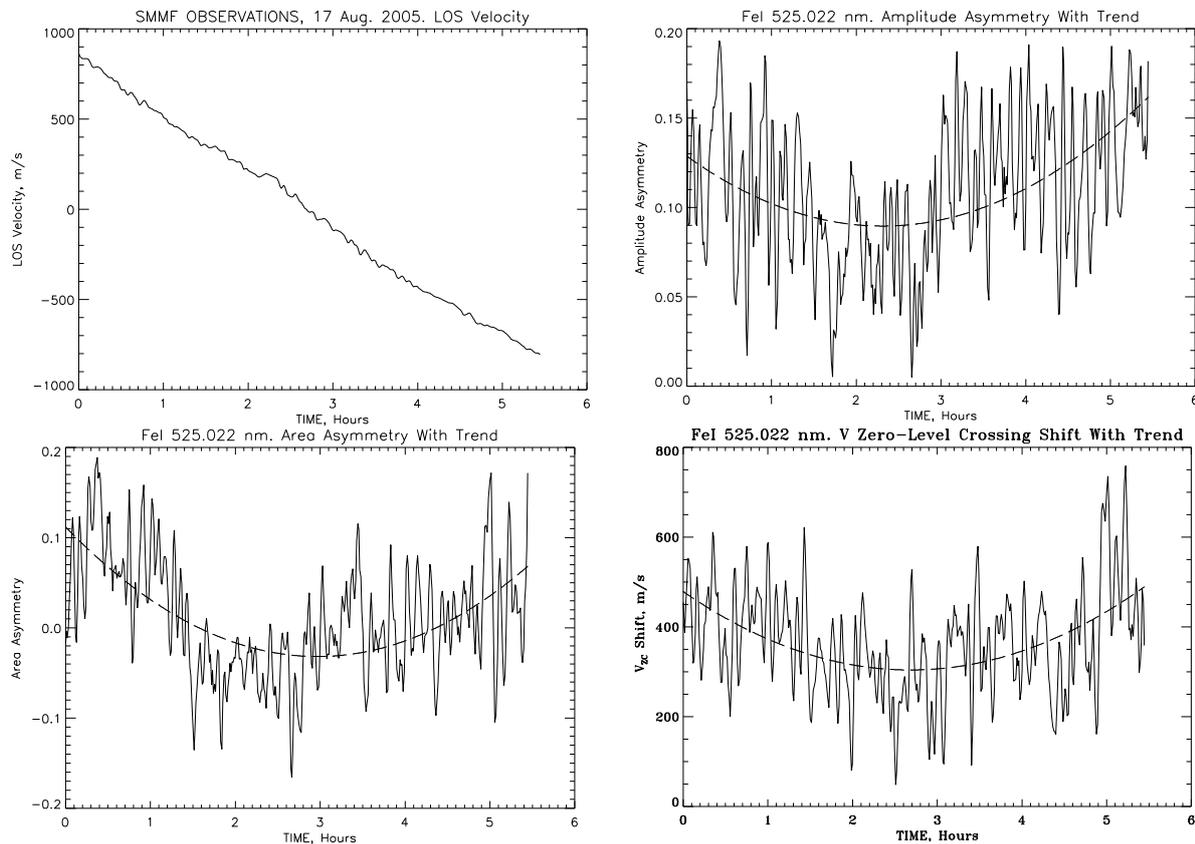


Рис. 5. То же, что на рис. 2, но для выраженного в единицах лучевой скорости смещения S спектральной линии (верхняя левая панель), амплитудной асимметрии V-профиля Стокса δA (верхняя правая панель), асимметрии площадей δA (нижняя левая панель), относительного смещения I- и V-профилей Стокса V_{zc} (нижняя правая панель)

Спектры мощности для вновь введенных параметров, вычисленные по методике, ранее примененной к напряженности, приведены на рис. 6 – рис. 9. Проанализируем некоторые вытекающие из их рассмотрения результаты. Спектр мощности вариаций параметра S для низких частот (рис. 6, левая панель) показывает наличие только одного доминирующего пика, соответствующего периоду 172 мин. Однако с учетом его амплитуды, он почти наверняка не имеет отношения к солнечным пульсациям, а вызван, скорее всего, отличием реального временного хода данного параметра от аппроксимируемого параболой. Так же нет пока оснований говорить как о солнечных, так и о других, кроме пятиминутных, пиках на короткопериодном спектре мощности (рис. 6, правая панель). Но поскольку наличие пятиминутных глобальных колебаний скорости известно а priori, наличие соответствующих пиков на рис. 6 представляет определенный интерес. По-видимому, при большой статистике,

глобальные колебания Солнца с данным периодом проявляются даже в таких, недифференциальных, наблюдениях.

Параметры асимметрии V-профилей Стокса спектральных линий, согласно наиболее распространенной в настоящее время концепции (см., например, Соланки (1993)), являются следствием неоднородности магнитного поля и лучевых скоростей как в картинной плоскости, так и по глубине. Наиболее вероятно, что такие динамические явления происходят в окрестностях магнитных силовых трубок. Вполне естественно предположить, что колебательные процессы в солнечной атмосфере, вызывая изменение ее термодинамических характеристик, способны привести (вопрос сводится к величине, амплитуде влияния) к изменению рассматриваемых параметров.

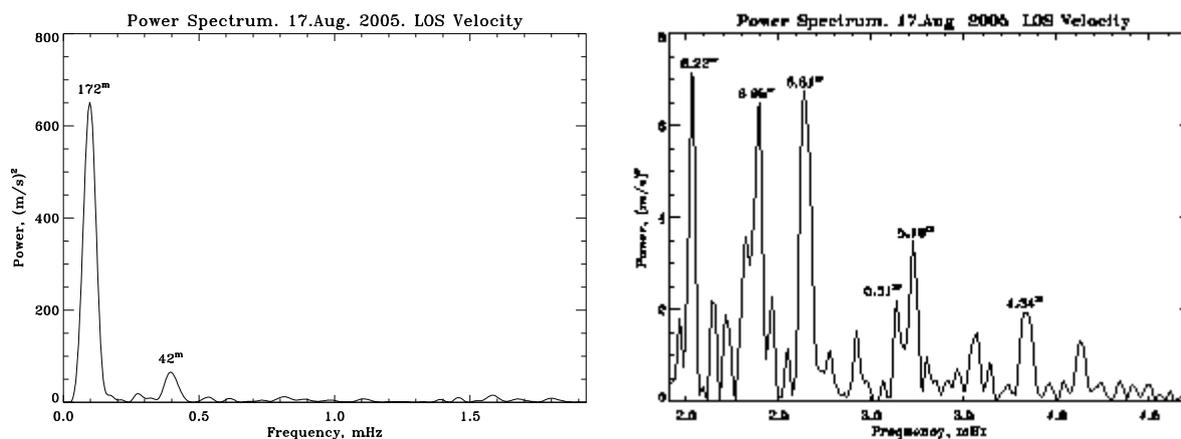


Рис. 6. Спектры мощности вариаций параметра S (относительного смещения) спектральной линии FeI $\lambda 525.02$ нм в области длинных (левая панель) и коротких (правая панель) периодов

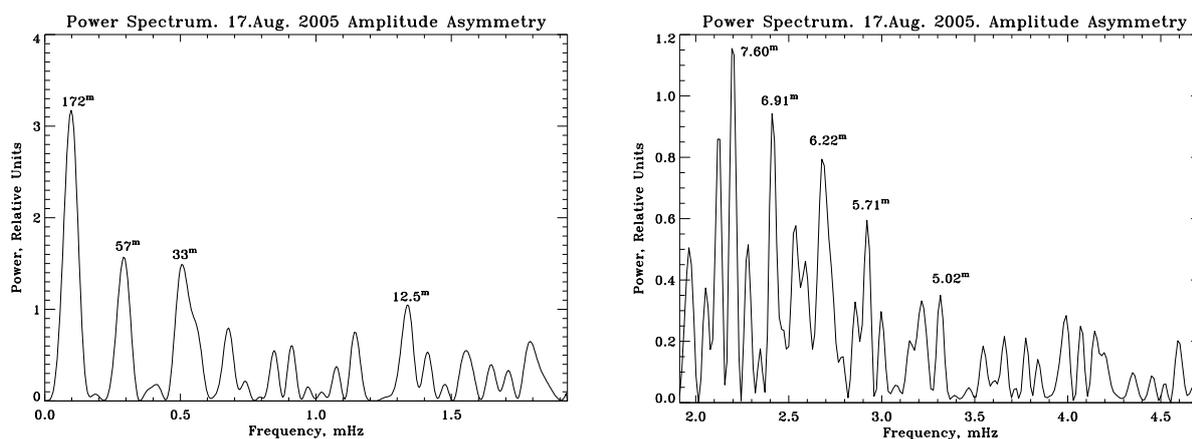


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для параметра ба

Причем для разных параметров величина изменений может быть различной, но периодичности следует ожидать, с учетом ошибок и возможного влияния шумов, одинаковыми (для более определенных оценок необходимы расчеты профилей Стокса в различных модельных предположениях). Тесная взаимосвязь термодинамических параметров с

проблемами диагностики характеристик магнитного поля убедительно продемонстрирована, в частности, в работах (Гросманн-Доерс и др., 1987; Мартинез-Гонзалес и др., 2006).

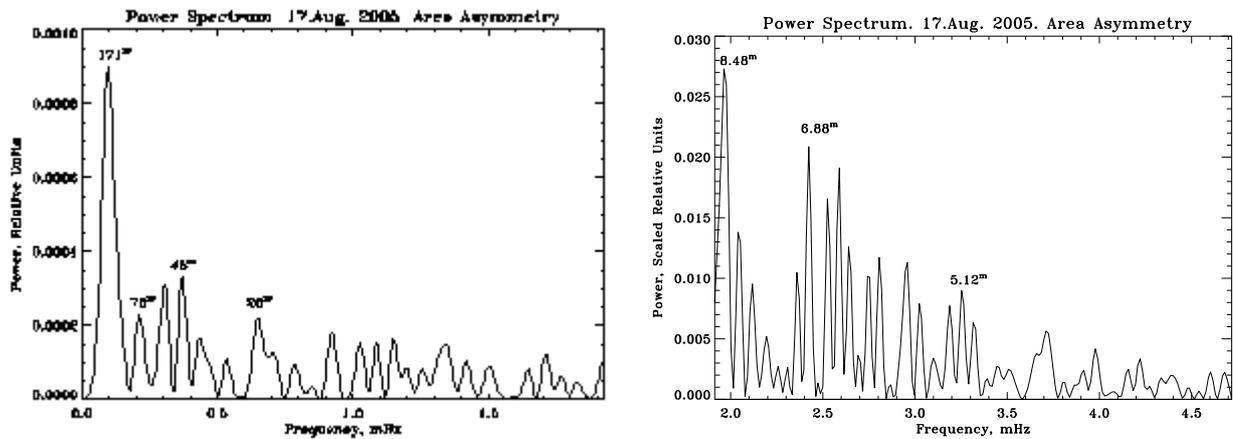


Рис. 8. То же, что на рис. 6, но для параметра δA

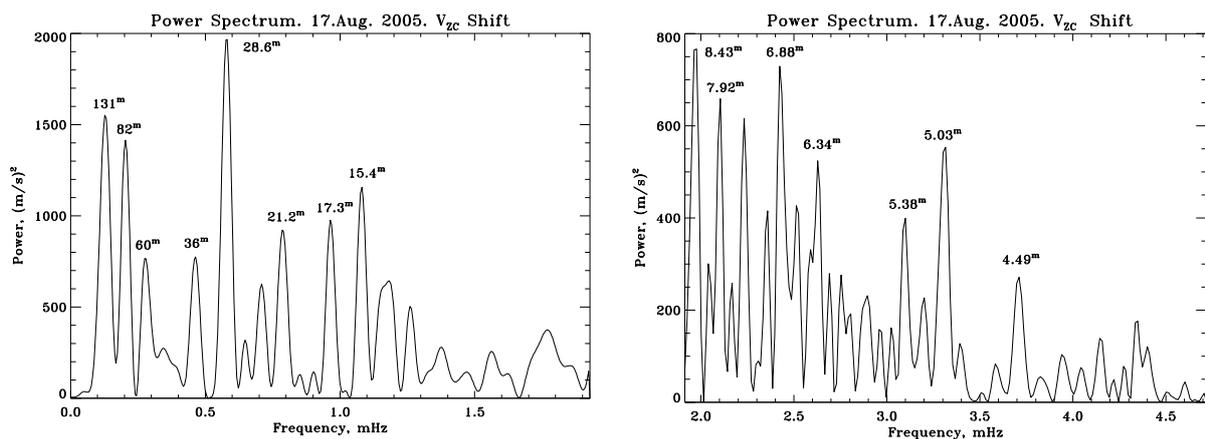


Рис. 9. То же, что на рис. 6, но для параметра V_{zc}

Обращаясь к анализу спектров мощности вариаций амплитудной асимметрии (рис. 7), видно, что среди низкочастотных колебаний (левая панель) выделяются пики с периодами 172, 57, 33, 12.5 минут, из которых только два, с периодами 57 и 33 минут, практически совпадают с пиками, обнаруженными ранее в вариациях напряженности. В высокочастотной области (правая панель) опять имеет место обилие пиков, большинство из которых, по всей видимости, случайны. Но интересно отметить некоторую концентрацию мощности в области 5-минутных периодов, отсутствующую ранее в напряженности. Поскольку, как отмечалось только что, определенную роль в образовании δA играют лучевые скорости, можно предположить, что 5-минутные вариации таких скоростей проявляются, хотя и достаточно слабо, в этом параметре. Некоторые дополнительные аргументы в пользу правомерности такого объяснения следуют и из последующего анализа.

Действительно, из рассмотрения высокочастотного спектра мощности вариаций асимметрии площадей δA (рис. 8, правая панель) видно, что 5-минутные осцилляции там также

присутствуют, но их амплитуды ощутимо меньше амплитуд пиков в области периодов 6–8 минут. Поскольку и за образование δA , причем даже в большей степени, чем δa , ответственны лучевые скорости, то для объяснения этого факта справедливо сказанное выше применительно к спектру мощности δa .

Существенно отличная ситуация имеет место в соответствующем спектре мощности параметра V_{zc} (рис. 9). Здесь 5-минутные колебания (правая панель) выражены вполне отчетливо. Поскольку, по определению, V_{zc} - есть некоторая мера различия длин волн I- и V-профилей Стокса спектральной линии, то этот параметр является дифференциальным по своей сути. Общие смещения линии, например по инструментальным причинам, не оказывают влияния на его значение. Поэтому заметное повышение мощности 5-минутных колебаний в вариациях этого параметра представляется вполне естественным интерпретировать как проявление глобальных осцилляций солнечной атмосферы относительно гораздо более стабильных (о чем свидетельствует отсутствие соответствующих колебаний напряженности) магнитных элементов. В пользу такого объяснения свидетельствуют также результаты анализа параметра S , 5-минутные пики в спектре мощности которого весьма близки к пикам V_{zc} . Вполне вероятно, что данный результат в последующем может иметь важное значение как с наблюдательной точки зрения, так и с теоретической.

Вернемся, однако, вновь к анализу не менее интересных длиннопериодных вариаций, где имеет место принципиально иная ситуация. В таких вариациях параметра δA (левая панель на рис. 8), если исключить из рассмотрения пик с периодом 171 мин. (имеющим, как и в S и δa , скорее всего, чисто методическую природу), выделяются пики с периодами 78, 55, 45 и 26 минут. В соответствующем спектре мощности параметра V_{zc} (левая панель на рис. 9) имеет место группа пиков с периодами 131, 82, 60, 36 и 28.5 минут.

Таким образом, в спектрах мощности разных параметров пики приходятся зачастую на различные периоды, оставляя вопрос об их природе открытым. Однако некоторые пики имеют одни и те же, или достаточно близкие периоды, что можно рассматривать как свидетельство их истинно солнечного происхождения. Прежде всего, это период около 80 минут, наибольший в спектре мощности V и достаточно мощный в спектрах параметров δA и V_{zc} . Другой период - около 55–60 минут, проявляющийся в спектрах мощности параметров V , δa , δA и V_{zc} . Впрочем, есть определенные указания, что реальными являются некоторые вариации напряженности V и с более короткими периодами (от 9 до 50 минут). Об этом, в частности, свидетельствуют предварительные результаты обработки наблюдений магнитного поля одновременно в нескольких спектральных линиях (предполагается, это должно явиться предметом отдельной публикации).

3. Обсуждение и заключение

Вопрос о возможной природе вариаций крупномасштабных магнитных полей Солнца с периодами в диапазоне “десятки минут – часы” является чрезвычайно сложным и выходящим за рамки целей настоящей работы, призванной продемонстрировать определенные новые экспериментальные результаты. Впрочем, некоторые предварительные соображения имеет смысл высказать уже сейчас. Согласно теории глобальных колебаний Солнца (см., например, Кокс (1983)), такие периоды присущи гравитационным модам, мощность которых сосредоточена преимущественно во внутренних зонах, далеких от солнечной поверхности. Считается, что именно поэтому вплоть до настоящего времени не обнаружено достоверных доказательств существования гравитационных волн по наблюдениям фотосферы и хромосферы Солнца. Однако если предположить, что силовые линии магнитного поля простираются до значительных глубин недр Солнца (по крайней мере, до границы конвективной зоны, где, вероятно, магнитные поля и генерируются), то, возможно, гравитационные колебания в этой

среде такими силовыми линиями (или трубками) могут быть переданы в поверхностные слои и измерены там по наблюдаемым вариациям напряженности. Интересно отметить, что аналогичную точку зрения, после ознакомления с результатами данной работы, представленными на конференции в КрАО, независимо высказал в частной беседе известный специалист в области солнечных колебаний Ю.Д. Жугжда. Понятно, конечно, что эти соображения пока имеют общий характер и необходимо их дополнительное изучение.

Заслуживающим внимания представляется также обсуждение гораздо более прикладного аспекта результата обнаружения (на принципиально новых измерениях общего магнитного поля Солнца) колебаний крупномасштабных магнитных полей, особенно с периодом около 80 минут. Действительно, возможное существование 80-минутных вариаций ОМП Солнца было отмечено впервые в работе (Демидов и др., 1990), а затем, на основании только саянских наблюдений, убедительно продемонстрировано в (Демидов, 1995). В последующем на данный период было обращено внимание (со справедливой ссылкой на только что указанную статью), причем в совершенно ином и новом аспекте, в работах (Боберг и Лундстедт, 2002; Боберг и др., 2002; Чаплин и др., 2004). А именно, согласно Боберг и Лундстедт (2002) и Боберг и др. (2002) оказалось, что период вариаций ОМП приблизительно в 80 минут может иметь важное прогностическое значение с точки зрения такой актуальной проблемы, как корональные выбросы масс (КВМ). Согласно основанным на данных измерений SOHO результатам этих работ оказалось, что колебания глобального магнитного поля с такими периодами происходят перед событиями КВМ и отсутствуют, когда КВМ нет. Впрочем, данный результат не нашел подтверждения для другого интервала времени и для других, наземных в сети BiSON, измерений ОМП (Чаплин и др., 2004). Таким образом, и в этой проблеме необходимы дальнейшие исследования.

В контексте обсуждения 80-минутных вариаций ОМП Солнца следует упомянуть также недавнюю работу (Котов и Ханейчук, 2004), в которой по данным прибора SOHO/MDI (май – июнь 1996 г.) обнаружены вариации глубины контура фотосферной линии NiI 676.8 нм от всего солнечного диска с периодом 79.94 мин. Оказалось, что вариации с этим периодом являются максимальными по величине в довольно широком диапазоне частот. Отмечается также корреляция амплитуды такой периодичности с изменениями общего магнитного поля Солнца и числом пятен.

Автор благодарен В.А. Котову за многочисленные дискуссии о природе ОМП Солнца и его переменности, а также Ю.Д. Жугжде за обсуждение некоторых аспектов данной статьи. Работа выполнена при финансовой поддержке грантами РФФИ 05-02-16472, НШ 733.2003.2, DFG 436 RUS 113/784/0-1.

Литература

- Боберг и Лундстедт (Boberg F., Lundstedt H.) // Proc.SOLSPA: The Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference. Vico Equense. Italy. 24–29 September 2001. 2002a. P. 79.
- Боберг и др. (Boberg F., Lundstedt H., Hoeksema J.T., Scherrer P.H., Liu W.) // J. Geophys. Res. 2002b. V. 107. N. A10. P. SSH 15–1.
- Гарсия и др. (Garcia R.A., Boumier P., Charra J., Foglizzo T., Gabriel A.H., Grec G., Regulo C., Robillot J.M., Turek-Chieze S., Ulrich R.K.) // Astron. Astrophys. 1999. V. 346. P. 626.
- Григорьев и Демидов (Grigoryev V.M., Demidov M.L.) // Solar Phys. 1991. V. 133. P. 103.
- Гроссманн-Доертс и др. (Grossman-Doerth U.G., Pahlke K.D., Schussler M.) // Astron. Astrophys. 1987. V. 176. N. 1. P. 139. .
- Демидов (Demidov M.L.) // Solar Phys. 1995. V. 159. P. 23.
- Демидов М.Л., Котов В.А., Григорьев В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1990. Т. 82. С. 147.

- Демидов и др. (Demidov M.L., Zhigalov V.V., Peshcherov V.S., Grigoryev V.M.) // Solar Phys. 2002a. V. 209. P. 217.
- Демидов и др. (Demidov M.L., Letunov A.S., Peshcherov V.S., Veretsky R.M.) // 1st Potsdam Thinkshop on Sunspots and Starspots Poster Proceedings./ Eds Strassmeier K.G., Washhuettl A. 2002b. P. 37.
- Демидов М.Л., Григорьев В.М., Пещеров В.С. // Астрон. журн. 2005. Т. 82. N. 7. С. 628.
- Диминг (Deeming T.L.) // Astrophys. Space Sci. 1975. V. 36. P. 137.
- Йошпа и др. (Ioshpa B.A., Obridko V.N., Shelting B.D.) // Solar Phys. 1973. V. 29. N. 2. P. 385.
- Кокс Дж. П. // Теория звездных пульсаций. М.: Мир. 1983.
- Котов и др. (Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.) // “The problems of the magnetic fields in Cosmos” (Ed. A.B. Severny). Proceed. of the Internat. Symp. Crimea. 1976. Pt. 2. P. 39.
- Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 66. С. 3.
- Котов В.А., Демидов М.Л., Григорьев В.М., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1992. Т. 84. С. 163.
- Котов В.А., Ханейчук В.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004. Т. 100. С. 30.
- Котов и др. (Kotov V.A., Scherrer P.H., Howard R.F., Haneychuk V.I.) // Astroph. J. Suppl. Series. 1998. V. 116. P. 103.
- Марси (Marcy G.W.) // Astroph. J. 1984. V. 276. Pt. 1. P. 286.
- Мартинез-Гонзалес и др. (Martinez Gonzales M.J., Collados M., Ruiz Cobo B.) // Astron. Astroph. 2006. V. 456. P. 1159.
- Северный (Severny A.) // Nature. 1969. V. 224. N. 5214. P. 53.
- Северный (Severny A.B.) // Quart. J. Roy. Astr. Soc. 1971a. V. 12. P. 363.
- Северный (Severny A.B.) // “Solar magnetic fields” (Ed. R.Howard). Proceed. of the IAU Symposium N. 43 held in Paris. France. 31 August – 4 September 1970. 1971b. P. 675.
- Соланки (Solanki S.M.) // Space Science Reviews. 1993. V. 63. P. 1.
- Стенфло (Stenflo J.O.) // Solar magnetic fields. Polarized radiation diagnostics. Kluwer Academic Publisher. 1994. 385 p.
- Фосса и др. (Fossat E., Grec G., Pomerantz M.) // Solar Phys. 1981. V. 74. P. 59.
- Чаплин и др. (Chaplin W.J., Dumbill A.M., Elsworth Y., Isaak G.R., McLeod C.P., Miller B.A., New R., Pinter B.) // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2003. V. 343. P. 813.
- Чаплин и др. (Chaplin W.J., Dumbill A.M., Elsworth Y., Isaak G.R., McLeod C.P., Miller B.A., New R., Pinter B.) // Solar Phys., 2004. V. 220. P. 307.
- Scherrer P.H) // Ph. D. Dissertation. 1973. Stanford University. SUIPR Rep. N. 554. P. 151.