

УДК 523.9

Низкочастотные колебания фотосферы Солнца: наземные данные и некоторые измерения спутника SOHO

В.А. Котов, В.И. Ханейчук

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 13 августа 2002 г.

Аннотация. Наблюдения Солнца, выполненные в Крымской астрофизической обсерватории в 1974 – 1999 гг., показали, что фотосфера пульсирует с периодом $P_1 = 159.966$ мин. (Колебание с периодом $P_0 = 160.010$ мин наблюдалось только в 1974 – 1982 гг.) Для проверки обработаны данные о флуктуациях глубины (I_D) линии поглощения фотосферы Ni I 676.8 нм в свете от всего солнечного диска, полученные в 1996 г. прибором MDI на борту спутника SOHO. Найдено, что в них присутствует существенная вариация с периодом $P_{MDI} = 79.94 \pm 0.04$ мин. Инструментальное происхождение вариации требует дополнительных допущений и не может удовлетворительно объяснить её особенности.

Специфика измерений MDI предполагает, что солнечное колебание с периодом P должно проявлять себя в I_D -данных как вариация с периодами P и/или $P/2$. В соответствии с этим отмечено, что двойной период $2 \times P_{MDI} = 159.88 \pm 0.16$ мин согласуется с периодичностями P_0 и P_1 , известными из наземных наблюдений как периоды глобальных колебаний Солнца. Примечательна также 27-суточная вариация амплитуды периодичности 79.94 мин и её корреляция с изменениями общего магнитного поля Солнца и числом пятен.

LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS OF THE SOLAR PHOTOSPHERE: GROUND-BASED DATA AND SOME MEASUREMENTS BY THE SOHO SATELLITE, *by V.A. Kotov, V.I. Haneychuk.* The observations of the Sun performed in the Crimean Astrophysical Observatory from 1974 through 1999, showed that the Sun's photosphere pulsates with a period of $P_1 = 159.966$ min. (The firstly reported oscillation, $P_0 = 160.010$ min, has been observed in 1974 – 1982 only.) To check these results, we reduced the data obtained in 1996 by the MDI/SOHO instrument which measured line-depth intensity I_D of the solar absorption line Ni I 676.8 nm (for the entire solar disk). This dataset revealed the presence of a remarkable I_D variation with period $P_{MDI} = 79.94 \pm 0.04$ min. The instrumental explanation proved to be rather hypothetical since it requires several supplementary causes to get satisfactory treatment of the I_D power spectrum.

The specificity of the MDI measurements suggests that solar oscillation with period P would manifest in line-depth data as variation with periods P or/and $P/2$. Accordingly, it is noted that double period $2 \times P_{MDI} = 159.88 \pm 0.16$ min fairly well agrees with both periodicities, P_0 and P_1 , known from ground-based observations as those of global pulsations of the Sun. But the most striking seems to be a 27-day variation of the amplitude of the 79.94-min feature, and its apparent correlation with changes of the solar mean magnetic field and sunspot number.

Ключевые слова: Солнце, глобальные колебания, вращение

1 Введение

Колебания Солнца как звезды изучаются в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) с 1974 г. Для регистрации лучевой скорости фотосферы применяется магнитограф Бэбкока и дифференциальный (“центр – край”) метод Котова и др. (1982). Эффект Доплера регистрируется по фотосферной линии поглощения Fe I 512.4 нм, не расщепляющейся в магнитном поле.

В 70 – 80-х годах несколькими группами исследователей было сообщено о колебаниях Солнца с периодом P около 160 мин (Брукс и др., 1976; Северный и др., 1976; Шеррер и Уилкоккс, 1983). Явление было подтверждено независимыми измерениями на южном полюсе Земли (Грек и др., 1980) и Канарских островах (Палле, Рока Кортес, 1988). Значение главного периода в 1974 – 1982 гг. по данным КрАО было равным $P_0 = 160.0101 \pm 0.0016$ мин (Котов и др., 1997).

Позднее, однако, P_0 -колебание практически исчезло, и в спектре мощности (СМ) низкочастотных колебаний – за более длительный интервал наблюдений, с 1974 г. по 1995 г., – стало доминировать колебание $P_1 = 159.9662 \pm 0.0006$ мин (Котов и др., 1997). Появились сообщения и об отсутствии 160-минутных колебаний вообще (см., например, Элсуорс и др., 1989).

Отметим другие обстоятельства: (а) модель внутреннего строения и теория нормальных мод колебаний звёзд не смогли удовлетворительно объяснить 160-минутное колебание Солнца (Котов, 1985), (б) периоды P_0 и P_1 оказались близкими к 9-ой суточной гармонике, что дало оппонентам аргумент (не вполне обоснованный) оспаривать их солнечное происхождение, (в) колебания с периодом 160 мин – под термином “инфразвук” Солнца – были постулированы Сэвэнном (1946) более полувека тому назад, (г) в отличие от P_0 , колебание P_1 присутствовало в СМ колебаний Солнца все время наблюдений в Крыму, с 1974 г. по 1995 г. (Котов и др., 1997), (д) колебание P_1 сохраняло начальную фазу на протяжении 26 лет наблюдений (см. п. 3), (е) частота нового колебания P_1 почти совпадает с частотой годичного спутника первоначального колебания P_0 (период спутника равен 159.961 мин; период биений P_1 и P_0 равен 1.10 ± 0.05 г.).

Удивительными оказались и недавние результаты КрАО, показавшие усиление колебания P_1 в 1999 г., причём с той же начальной фазой, что и ранее (Котов и др., 2000). Здесь приводим краткую сводку результатов за 26 лет, свидетельствующих о реальности колебания P_1 . Также анализируем некоторые данные спутника SOHO на предмет присутствия или отсутствия в них 160-минутной периодичности.

2 Наблюдения КрАО за 1974 – 1999 гг.

За 26 лет измерения скорости фотосферы v выполнены в течение 1580 дней, в сумме около 10004 ч. Скорость усреднялась в 5-минутных интервалах, медленные тренды удалялись с помощью парабол. Полное число остатков (измерения минус тренд) $N = 120053$ со среднеквадратичным значением $\Delta = 6.2$ м/с. Положительная скорость соответствует “расширению” Солнца, а нулевая фаза всюду – моменту UT 00^h 00^m 1 января 1974 г.

Для временного ряда длительностью L разрешение по частоте обычно принимается равным $(\Delta\nu)_0 = L^{-1}$. Поскольку будем сопоставлять частоты разнородных данных, к тому же полученных неодновременно и с разной скважностью, в качестве формальной ошибки частоты будем принимать $\Delta\nu = (\Delta\nu)_0/2 = (2L)^{-1}$; ошибка периода $\Delta P = P^2/(2L)$. (Это больше ошибки наиболее вероятного значения периода, которая часто принимается равной $P^2/(4L)$.)

Спектр мощности (по сути – периодограмма), вычисленный в районе 9-ой гармонике суток, показан на рис. 1. Здесь доминирует, как и прежде (Котов и др., 1997), пик $P_1 = 159.9660 \pm 0.0005$ мин; его гармоническая амплитуда $A_h = 0.26$ м/с. При длительности 26 лет разрешение по частоте $(\Delta\nu)_0 \approx 1$ нГц. Следовательно, спектр сосчитан примерно для 1000 независимых частот. Важно отметить, что период P_1 данных КрАО в пределах ошибки *совпадает* с периодом пика, *доминирующего* в СМ измерений Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкоккса (СОУ) Станфордского университета за 1977 – 1994 гг.: $P_S = 159.9663 \pm 0.0007$ мин (Котов и др., 1997). Подчеркнём, что измерения СОУ – также дифференциальные, делались они по той же фотосферной линии 512.4 нм,

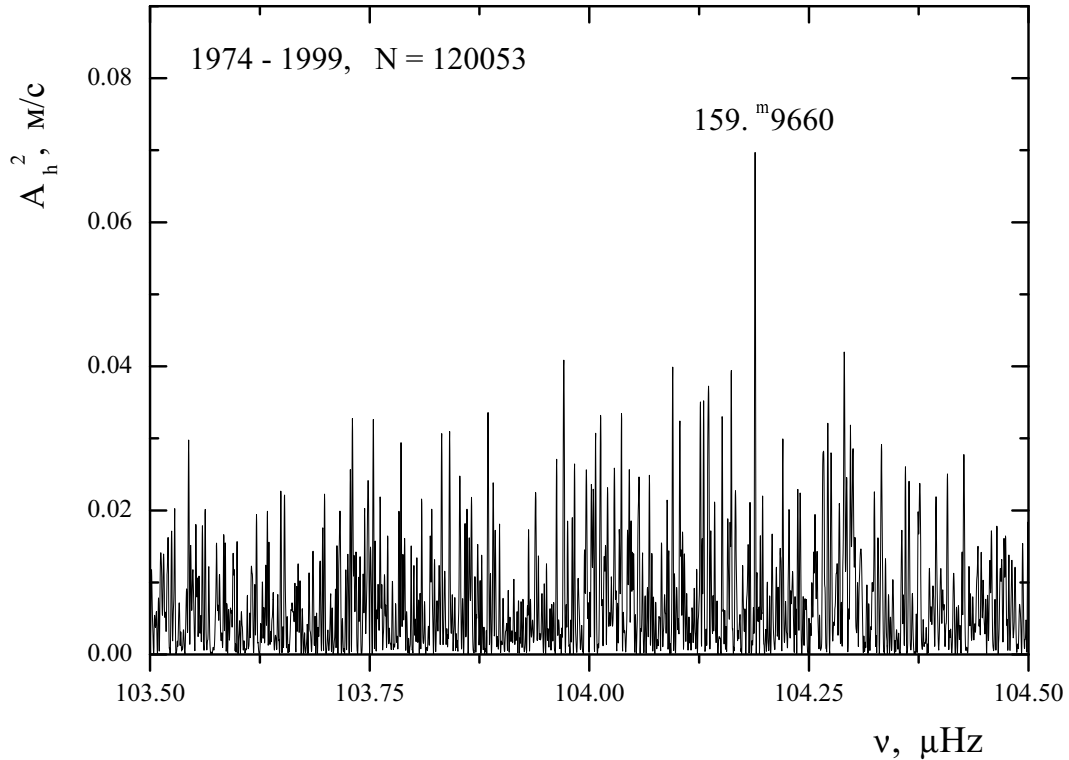


Рис. 1. Спектр мощности колебаний Солнца по данным наблюдений КраО за 1974 – 1999 гг. Число измерений скорости $N = 120053$; по вертикали – квадрат гармонической амплитуды A_h^2 в $(\text{м/с})^2$. Главный пик отвечает периоду $P_1 = 159.9660 \pm 0.0005$ мин

что и в КраО, и потому они наилучшим образом – по сравнению с другими инструментами – сопоставимы с измерениями КраО. Это выгодно отличает станфордские измерения от измерений, выполненных другими группами методом атомной резонансной спектроскопии. Последние производятся в свете от всего диска Солнца (Элсуорс и др., 1989; Грек и др., 1980; Палле и Рока Кортес, 1988) причем не по фотосферным, а по хромосферным линиям: D1 и D2 натрия или К калия.

Подтверждение периода P_1 измерениями СОУ – сильное свидетельство его *солнечного* происхождения. Трудно объяснить такое совпадение эффектами инструментальной/атмосферной природы или артефактами обработки данных.

3 Диаграмма «О–С»

Чтобы проследить за поведением фазы P_1 в крымских измерениях, построена фазовая диаграмма «О–С», которую принято строить для переменных звезд.

Для каждого двухлетнего интервала с центральным моментом t вычислены амплитуды $A_h(t)$ и фазы $\varphi_h(t)$ гармонического максимума скорости с пробным периодом $P'_1 = 159.9600$ мин. Поведение фаз $\varphi_h(t)$ показано на рис. 2 точками (отсутствуют фазы 1985 – 1986 гг. и 1996 – 1997 гг., когда средние P_1 -кривые оказались незначимыми). Через точки проведены прямые линейной регрессии, наклон которых соответствует фактической периодичности ≈ 159.966 мин. Коэффициент корреляции, как мера линейной зависимости между t и $\varphi_h(t)$, равен 0.99. Видно, что P_1 -колебание сохраняло начальную фазу практически на протяжении всех 26 лет. (Это отличает колебание P_1 от «процесса» P_0 , который по данным КраО и СОУ уверенно наблюдался лишь в 1974 – 1982 гг., см. Котов и др., 1997.)

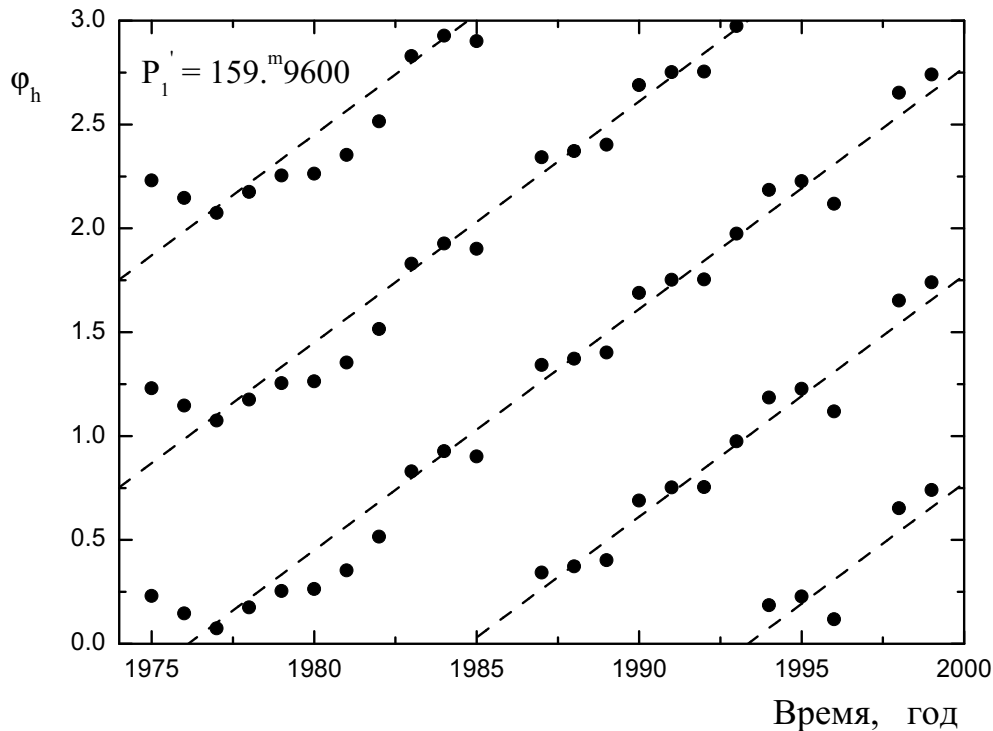


Рис. 2. Диаграмма «О-С» для пробного периода $P_1' = 159.9600$ мин. По вертикали – фаза φ_h максимума скорости (от 0 до 1, с повторением для интервалов 1 – 2 и 2 – 3). Точками обозначены фазы двухлетних данных КраО за 1974 – 1999 гг., вертикальной чёрточкой указана типичная ошибка фазы. Наклон прямых линейной регрессии (штриховые линии) отвечает периоду 159.966 мин

4 О некоторых наблюдениях спутника SOHO

Часть приборов спутника SOHO, запущенного в точку Лагранжа L1 в конце 1995 г., предназначена для регистрации глобальных колебаний Солнца и, в частности, g -мод (Шеррер и др., 1995). Остановимся на истолковании некоторых результатов.

(а) Прибор PМО6-V эксперимента VIRGO/SOHO измерял вариации солнечной иррадиации, и в CM (Финстерли и Фройлих, 1997) этих данных самый высокий пик соответствует частоте 104 мкГц (период 160 мин). Финстерли и Фройлих (1997), однако, считали, что это – инструментальный артефакт, обусловленный “биениями” на борту спутника с частотой $\nu_B = 52.125$ мкГц (период 320 мин) и её гармониками.

(б) В CM иррадиации, построенном по тем же данным, но для $P < 33.4$ мин, и приведенном в отчете WRC/PMOD (Финстерли и Фройлих, 1999), самый высокий пик отвечает периоду 32 мин. Это отмечается самими авторами отчета, но они считают опять, что пик является артефактом, вызванным интерференцией между «операциями спутника и интервалом съёма информации» VIRGO. Заметим, однако, что период главного пика – пятая гармоника 160 мин и что “инструментальное” происхождение пика снова не подкреплено никакими доказательствами.

(в) Значимые периоды, кратные 320 мин, – в частности, 160 мин и 80 мин, – присутствуют и в измерениях прибора SOI/MDI (см. ниже).

(г) Данные SOI/MDI о колебаниях фотосферы, обработанные Фройлихом и др. (1998) для степени $l = 1$, $m = 1$, не показали значимых длиннопериодных колебаний. Но ранее было показано (Котов и др., 1983), что 160-минутное колебание – не дипольного типа, т.е. $l \neq 1$.

(д) В так называемом “коллапсированном” CM данных SOI/MDI (Фройлих и др., 1998) значимые пики отвечают периодам 80 мин и 53 мин, – кратным 160 минутам. Для периодов $P > 83$ мин спектр

у Фройлиха и др. (1998) не показан и не обсуждается.

(е) В СМ наблюдений гелиосейсмологической сети BiSON (Фройлих и др., 1998) один из главных пиков отвечает $P = 160$ мин. Амплитуда соответствует примерно 3 см/с, что, в принципе, не противоречит дифференциальной амплитуде КраО–СОУ (см. ниже), если учесть неточности калибровок. Надо принять во внимание и тот факт, что измерения BiSON сделаны по линии калия и относятся к более верхним слоям солнечной атмосферы, чем измерения КраО–СОУ. В верхних слоях амплитуда длиннопериодных колебаний может уменьшаться.

То же касается данных GOLF/SOHO (Палле и др., 1998), полученных по синим крыльям линий натрия D1 и D2 и имеющих, по-видимому, существенную неопределенность калибровки. Не безупречна и обработка этих измерений, в частности, при фильтрации низкочастотных шумов и инструментальных артефактов. (Вследствие неисправности GOLF вместо скорости измерялись монохроматические интенсивности в синих крыльях линий натрия. При нормальных же измерениях скорости регистрируется разность интенсивностей светового потока в синем и красном крыльях.)

5 Амплитуда P_1 в данных КраО и СОУ

Рассмотрим 160-минутную периодичность, зарегистрированную в наземном эксперименте КраО–СОУ (Котов и др., 1997, 2000). Амплитуда A_h колебания P_1 по измерениям КраО (п. 2) составляет 0.26 ± 0.04 м/с, а по измерениям СОУ она равна 0.10 ± 0.02 м/с (Котов и др., 1997). Но учтём, что дифференциальный метод основан на регистрации слабой круговой поляризации в крыльях линии. А при таких измерениях между Крымом и Стэнфордом существует систематическое расхождение на фактор $C \approx 1.60$ (значения КраО по модулю больше значений СОУ), что проверено многолетними измерениями среднего магнитного поля Солнца (Котов и др., 1999). Расхождение имеет, по-видимому, инструментальную природу, и его объяснение требует специального рассмотрения.

Следует учесть также разную чувствительность инструментов к модам колебаний разной степени l . Точная мода P_1 неизвестна, но можно сделать грубую оценку соответствующего фактора, предположив, что колебание – радиальное, т.е. $l = 0$. Расчеты Котова и др., (1983) показали, что в этом случае амплитуда сигнала в КраО больше амплитуды СОУ примерно в $R = 1.68$ раз. Приняв во внимание также поправочный множитель $Q = 0.93$ (Котов и др., 1982), окончательно для приведения крымских измерений скорости к данным СОУ получаем коэффициент

$$J = \frac{Q}{CR} \approx 0.35. \quad (1)$$

И тогда редуцированная крымская амплитуда, $A'_h = 0.09 \pm 0.02$ м/с, хорошо согласуется с амплитудой СОУ 0.10 ± 0.02 м/с.

6 Измерения глубины линии

Главной целью прибора MDI (Шеррер и др., 1995) являлась регистрация фотосферных проявлений колебаний Солнца для изучения его внутреннего строения. Основу прибора составляли (а) система оптических фильтров, (б) подстраиваемый интерферометр Майкельсона, определяющие спектральное окно шириной 9.4 пм, и (в) ПЗС-матрица. Положение центральной длины волны системы могло меняться, и окно сканировало линию поглощения Ni I 676.8 нм; изображение Солнца фокусировалось на матрице. В нормальном режиме прибор позволял получать фильтрограммы с полосой 9.4 пм в пяти положениях – с шагом 7.5 пм – внутри спектральной области шириной 37.7 пм (рис. 3).

Данные, анализируемые нами, представляют собой измерения световых потоков, или “интенсивностей глубины линии”, усреднённые для всего диска Солнца и любезно предоставленные нам Косовичевым (1996). Предварительно Шеррером (1997) они были сглажены гауссовским фильтром шириной 23 мин, с интервалом между отсчётами 12 мин. Полученный сигнал I_D представляет собой интенсивность профиля линии никеля 676.8 нм, вычисленную с помощью алгоритма:

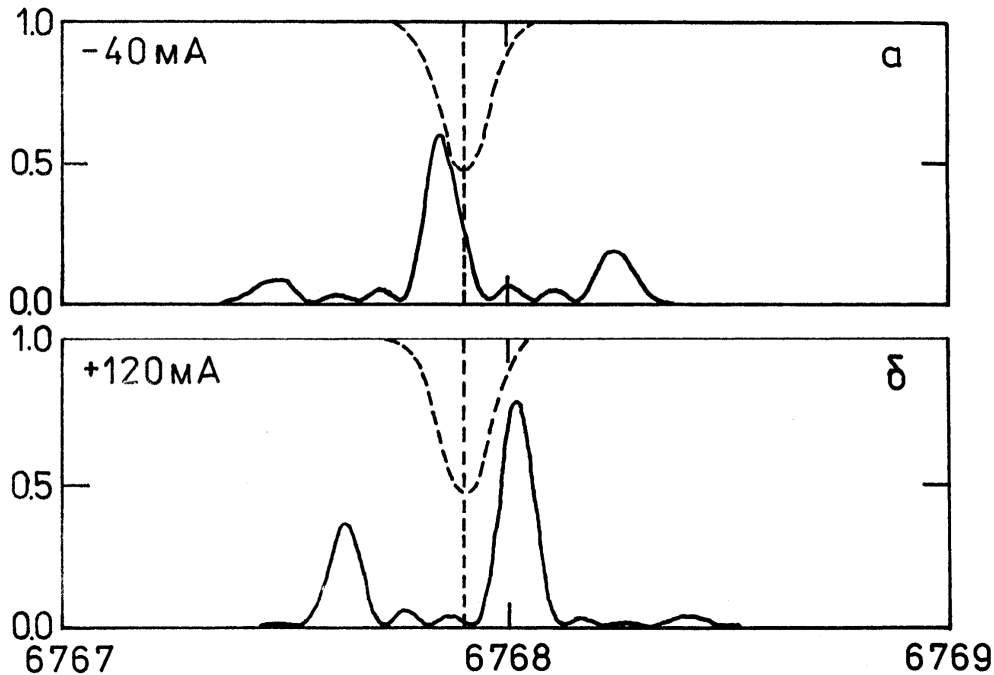


Рис. 3. Принцип работы прибора MDI согласно Шерреру и др. (1995). Показана ситуация для двух (а и б) из четырёх номинальных состояний доплеровской настройки интерферометра. Сплошной линией показана полоса пропускания инструмента для положений спектрального окна -4.0 пм и $+12.0$ пм относительно “штрихового” профиля линии никеля 676.8 нм

$$I_D = \sqrt{2 \times [(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2]}. \quad (2)$$

Она регистрировалась одновременно с “интенсивностью континуума”

$$I_C = 2 \times I_0 + I_D/2 + (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)/2, \quad (3)$$

где $I_0 - I_4$ – средние интенсивности фильтрограмм, полученных в пяти фиксированных спектральных окнах линии никеля, разделённых полосой 7.5 пм. (Получение этих рядов данных предусматривалось для контроля возможных артефактов в измерениях прибора GOLF на низких частотах.)

7 Фильтрация трендов I_D

В соответствии с UT-датой вся серия I_D была нами разделена на 57 кусков – каждый длительностью 24 ч – с 1 мая по 26 июня 1996 г. Затем сильно выделяющиеся измерения (ошибочные значения, явно инструментальной природы) были исключены, и для каждого куска независимо, методом наименьших квадратов, был вычислен медленный параболический тренд. После исключения трендов получен общий массив с числом остатков $N = 6238$ и стандартным отклонением $\Delta = 0.863$ (всюду – в относительных I_D -единицах); интервал между отдельными измерениями составлял 12 мин, покрытие измерениями 57-суточного интервала около 91%.

8 Что ожидаем увидеть?

Допустим, что фотосфера осциллирует с неким периодом P , и что осцилляции сопровождаются вариациями контура линии. Последние проявляются в виде (а) доплеровского сдвига линии $\Delta\lambda$ – из-за колебаний лучевой скорости $v(t)$, и/или (б) периодических изменений центральной глубины линии D . Оба эффекта имеют неизвестную амплитуду и разную, в принципе, начальную фазу (здесь пренебрегаем возможным влиянием магнитного поля, дифференциальным вращением Солнца и эффектами, обусловленными потемнением диска к краю).

Если бы оптическая система была настроена *идеально* на центр линии (рис. 3), а глубина D была неизменной, то временные вариации I_D были бы пропорциональны $|v(t)|$, см. (2). СМ обнаружил бы концентрацию мощности на периоде $P/2$. Если же за изменения I_D в основном ответственны колебания D , то главными периодами должны быть $P/2$ и/или P .

Но можно ожидать наличие существенного сдвига спектрального окна инструмента по отношению к центру линии. Сдвиг может быть обусловлен, например, относительным движением Земли и Солнца (из-за эллиптичности земной орбиты), вращением Солнца, гравитационным красным смещением или неточностями юстировки оптики, интерферометров или фильтров, а также просачиванием светового потока от континуума (благодаря интерференционным полосам, см. рис. 3). В любом случае следует ожидать вариаций I_D с периодами $P/2$ и/или P , а также их обертонами.

9 Спектр мощности I_D

Полный СМ остатков I_D для интервала 1 мая – 26 июня 1996 г., вычисленный с помощью фурье-преобразования, показан на рис. 4. Самый высокий пик соответствует периоду $P_{MDI} = 79.94 \pm 0.04$ мин. Принимая во внимание его амплитуду $A_h \approx 0.109$ (в единицах I_D), для оценки значимости пика на априорной частоте получаем $\mathcal{P}' \approx 6.7\sigma$ (Скарглль, 1982). При числе независимых частотных интервалов $n \approx 3500$ это соответствует фактической значимости $\mathcal{P} \approx 5.4\sigma$ (вероятность случайного появления $p \approx 7 \times 10^{-8}$).

Другие пики, отмеченные на рис. 4 числами (период в минутах), менее существенные. Кроме того, три максимальных пика справа, $P = 53.299 \pm 0.017$ мин, 47.989 ± 0.014 мин и 32.001 ± 0.006 мин, оказываются (почти в пределах формальных ошибок) обертонами главного пика, с отношениями частот $3/2$, $5/3$ и $5/2$. Они могут интерпретироваться как «спутники» основного пика P_{MDI} , обусловленные, например, пробелами или отклонениями средней P_{MDI} -кривой от синусоиды (см. п. 8). То же относится, по-видимому, и к заметному пику $P = 160.32 \pm 0.16$ мин.

10 О природе пика P_{MDI}

Возможны два предположения, касающиеся происхождения главной периодичности $P_{MDI} = 79.94$ мин и, соответственно, пика 160.3 мин на рис. 4: (1) – инструментальное, (2) – солнечное.

10.1 Инструментальная частота биений?

Некоторые авторы, обрабатывавшие данные SOHO на предмет детектирования низкочастотных колебаний Солнца, утверждают, что в экспериментах наблюдалось биение между главным интервалом телеметрии, $\tau_0 = 14.988281$ с, и внутренним «импульсом» конкретного прибора τ (Финстерли и Фройлих, 1997; Фройлих, 1998). В случае MDI $\tau = 15$ с, и частота «инструментальных» биений

$$\nu_B = \tau_0^{-1} - \tau^{-1} \approx 52.125 \text{ (мкГц)} \quad (4)$$

(период $P_B \approx 319.743$ мин). Но при этом всё равно приходится предполагать, что нестабильность электроники и/или устройств, связанных с программным обеспечением, вызывала флуктуации в переключении затвора.

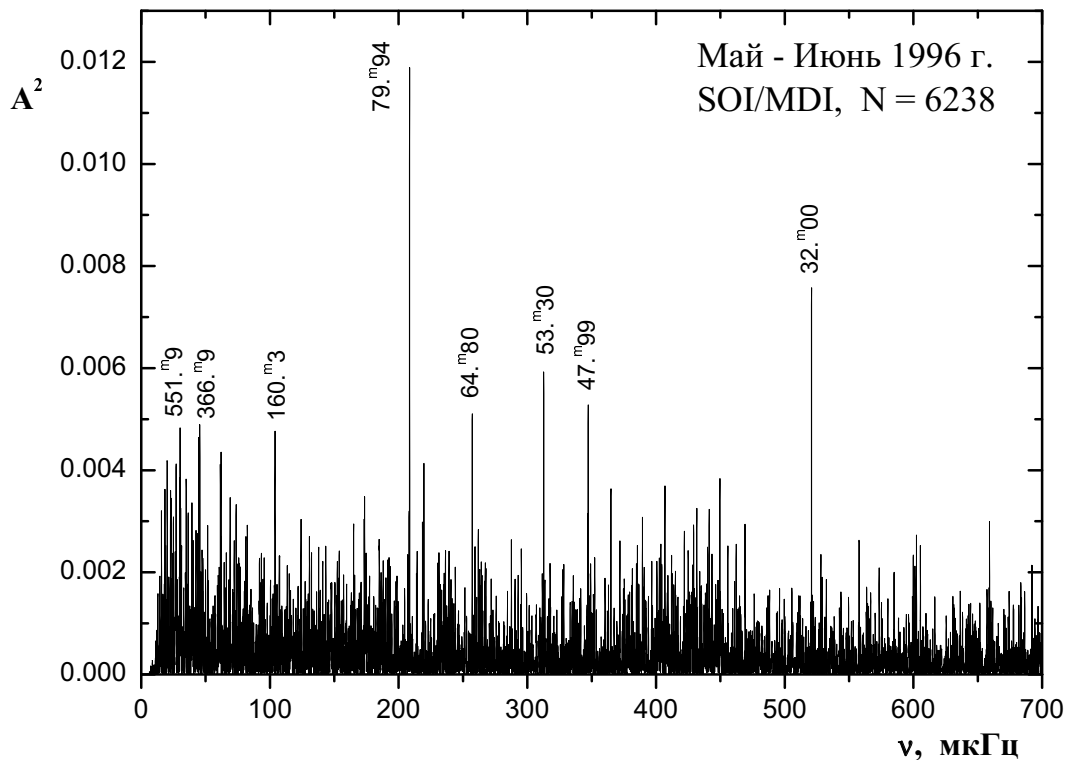


Рис. 4. Спектр мощности вариаций остатков I_D согласно измерениям MDI/SOHO в интервале 1 мая – 26 июня 1996 г. ($N = 6238$). Главный пик, с уровнем значимости $P \approx 5.4\sigma$, отвечает периоду $P_{MDI} = 79.94 \pm 0.04$ мин

10.2 Вопросы остаются

(а) СМ сигнала I_D (рис. 4) не обнаруживает ожидаемой основной периодичности “инструментальных биений” 319.74 мин.

(б) Не совсем понятно, каким образом разность ≈ 0.012 с между ходом двух “часов” могла привести к длиннопериодному сигналу, сохраняющему фазу в течение по крайней мере двух месяцев. При постоянной разности хода двух часов должна наблюдаться потеря или искажение части данных, вызванное оцифровкой сигналов, передачей их от одного устройства к другому.

(в) Отсутствие периодичности 79.94 мин в вариациях интенсивности континуума (Косовичев, 1996) говорит против роли биения 0.012 с и других инструментальных причин в появлении указанной периодичности I_D .

(г) Профиль средней кривой с периодом 79.94 мин имеет вид волны $|\sin(t)|$, который как раз и ожидается для измерений $|v(t)|$ вместо $v(t)$ (п. 8 и рис. 5а).

(д) Если флуктуации времени закрытого состояния затвора и были ощутимы, то они заведомо изменялись хаотически, а потому не могли вызвать появление фазово-когерентного сигнала I_D . (Заметим, что эти флуктуации находились в пределах технической спецификации спутника (Шеррер, 1997).)

(е) Для интерпретации доминирующих частот приходится привлекать сразу *несколько* инструментальных источников помех, причем весьма *разной* природы. В частности: биения пары часов, флуктуации времени закрытого состояния затвора, нестабильность бортовой электроники, программного обеспечения и телеметрии, температурные вариации и т.д.

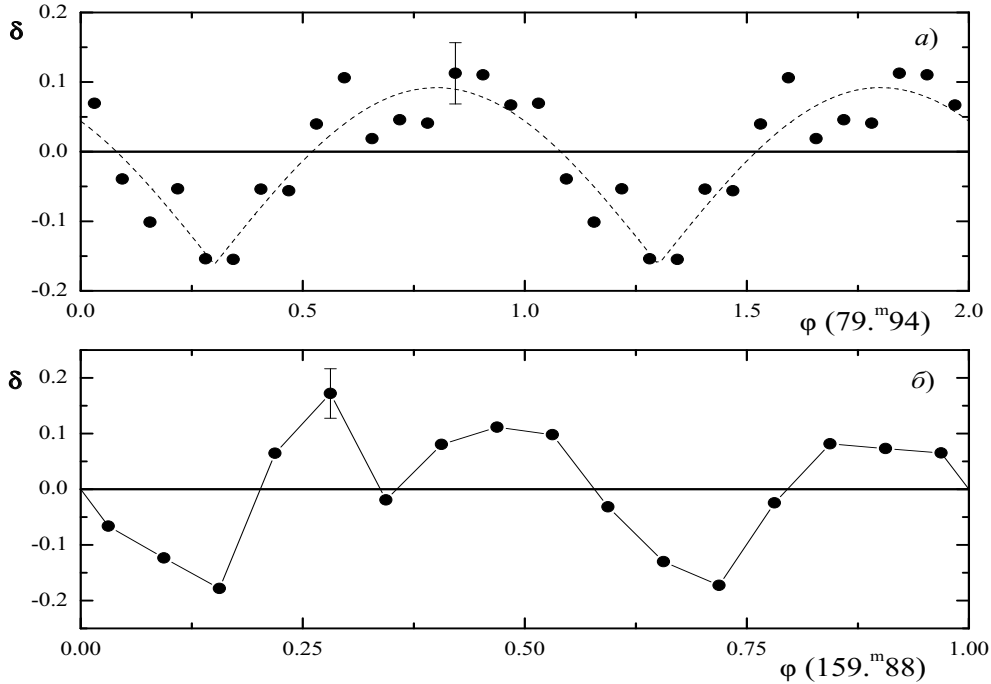


Рис. 5. (а) – Средний профиль вариаций $\delta(\varphi)$ остатков I_D , свёрнутых с периодом 79.94 мин. Остатки I_D ($N = 6238$; всюду – в относительных единицах I_D) усреднены в фазовых интервалах шириной $\Delta\varphi = 1/16$ (точки, с типичной ошибкой $\pm 1\sigma$, показаны вертикальной чёрточкой; по горизонтали – фаза φ , меняющаяся от 0 до 1; то же – на других аналогичных рисунках). Штриховая линия – кривая $|\sin(t)|$, вычисленная методом наименьших квадратов. (б) – Средняя кривая остатков I_D для периода 159.88 мин (интервал усреднения $\Delta\varphi = 1/16$)

(ё) При обработке данных SOHO Анпуршо и др. (2000), Фройлих (1998), Финстерли и Фройлих (1997) предположили *a priori*, что обертоны частоты 52.125 мкГц – инструментального характера и обусловлены биениями между бортовыми “часами” и тактом конкретного прибора. Непонятно, каким образом могла возникнуть одна и та же периодичность биений ($P_B \approx 319.74$ мин, см. п. 10.1), двух приборов – MDI и PMO6-V? Ведь они имели некоррелированные шумы и *разные* интервалы съёма информации – 15 с и 10 с соответственно (Фройлих, 1998), – хотя управляющие временные импульсы они принимали от одних и тех же бортовых часов. Периоды биений для них должны быть разными (соответственно для MDI и PMO6-V):

$$P_B(\text{MDI}) = \frac{15 \times \tau_0}{15 - \tau_0} \approx 319.743 \text{ мин}, \quad (5)$$

$$P_B(\text{PMO6-V}) = \frac{\tau_0 \times 10}{\tau_0 - 10} \approx 0.501 \text{ мин}. \quad (6)$$

Всё это заставляет сомневаться в инструментальном происхождении периодичности P_{MDI} или, по крайней мере, считать такое объяснение частичным и неудовлетворительным.

10.3 Солнечная природа?

Временной ряд I_D не показывает периодичности 319.74 мин и её обертона 159.87 мин. В противоположность инструментальной гипотезе, наш CM показывает наличие доминирующего пика

$P = 79.94 \pm 0.04$ мин, а также существенный пик $P = 160.32 \pm 0.16$ мин. Разность между наблюдаемым – 160.32 мин – и ожидаемым – 159.87 мин – периодами превышает возможную ошибку. Более того, главный пик 79.94 мин имеет гораздо большую амплитуду, чем пик 160.32 мин (противоположная ситуация должна иметь место в случае “биений”), и он сильнее, чем все другие пики на рис. 4.

На рис. 5а приводим среднюю I_D -кривую, построенную с MDI-периодом 79.94 мин. Кривая имеет ожидаемый (п. 8) профиль типа $|\sin(t)|$. Надо, конечно, отметить, что совпадение, может быть и случайным. Этот, сугубо негармонический, профиль может легко объяснить присутствие высокочастотных обертонов (т.е. квазисоизмеримых частот типа $P_{MDI}^{-1} \times Z_1/Z_2$, где Z_1 и Z_2 – положительные малые целые числа).

Следуя п. 8 предположим, что *реальный* солнечный период равен P , а *наблюдаемый* период – $P/2$. Тогда можно ожидать наличие асимметрии между первой и второй частями P -кривой вследствие наложения обертона $P/2$ на основное колебание P . Примем $P/2 = 79.94$ мин, и тогда $P = 159.88$ мин. Средняя кривая для удвоенного периода показана на рис. 5б, где видим заметную асимметрию между двумя частями P -кривой.

Для оценки асимметрии на рис. 6а,б приводим две средние кривые, вычисленные с одинаковым периодом 79.94 мин, но для двух неперекрывающихся выборок остатков I_D : а – для остатков, принадлежащих первой половине основного цикла $P = 159.88$ мин, с числом $N = 3102$, и б – для остатков, соответствующих второй половине того же цикла, с числом $N = 3136$ (т.е. в интервалах фаз периода 159.88 мин: 0.0 – 0.5 и 0.5 – 1.0 соответственно). Параметры двух кривых следующие:

$$(a): A_h = 0.12 \pm 0.05, \quad \varphi_h = 0.71 \pm 0.07, \quad F' \approx 4.7\sigma,$$

$$(б): A_h = 0.13 \pm 0.03, \quad \varphi_h = 0.88 \pm 0.03, \quad F' \approx 5.8\sigma.$$

Если амплитуды двух кривых в пределах ошибок согласуются, то между фазами имеет место рассогласование со значимостью примерно 2.5σ . На рис. 6в приведена разность между указанными двумя кривыми. Вместо шума, ожидаемого при вычитании двух практически идентичных (в пределах ошибок) кривых, видим существенный периодический сигнал с параметрами:

$$(в): A_h = 0.13 \pm 0.06, \quad \varphi_h = 0.53 \pm 0.08, \quad F' \approx 3.0\sigma.$$

Следовательно, можно утверждать, что первая и вторая части “основного” цикла 159.88 мин существенно, со значимостью примерно 3σ , различаются. Это означает, в свою очередь, что в остатках I_D присутствует периодичность

$$P = 2 \times P_{MDI} = 159.88 \pm 0.16 \text{ (мин)}. \quad (7)$$

11 Другие свидетельства “в пользу Солнца”

Удвоенный период MDI (7) в пределах ошибки согласуется с ожидаемым значением

$$P_1 \approx 159.9660 \pm 0.0005 \text{ (мин)} \quad (8)$$

солнечных колебаний, определённым по наземным наблюдениям 1974–1999 гг. (Шеррер и др., 1993; Котов и др., 1997, 2000). Вероятность его случайного появления в спектре (рис. 4) на *априорной* частоте составляет $p \approx 5 \cdot 10^{-5}$.

И наоборот, можно констатировать, что полупериод $P_1/2$ найденного ранее у Солнца колебания хорошо согласуется с периодом P_{MDI} , доминирующим в СМ флуктуаций глубины линии (периоды – в минутах):

$$P_1/2 \approx 79.9830 (\pm 0.0003) \approx 79.94 (\pm 0.04) = P_{MDI}. \quad (9)$$

Можно также отметить, что двойной период MDI (7) в пределах формальной ошибки согласуется и с “первоначальным” периодом колебаний Солнца

$$P_0 = 160.0101 \pm 0.0016 \text{ (мин)}, \quad (10)$$

обнаруженным более четверти века назад (Котов и др., 1997).

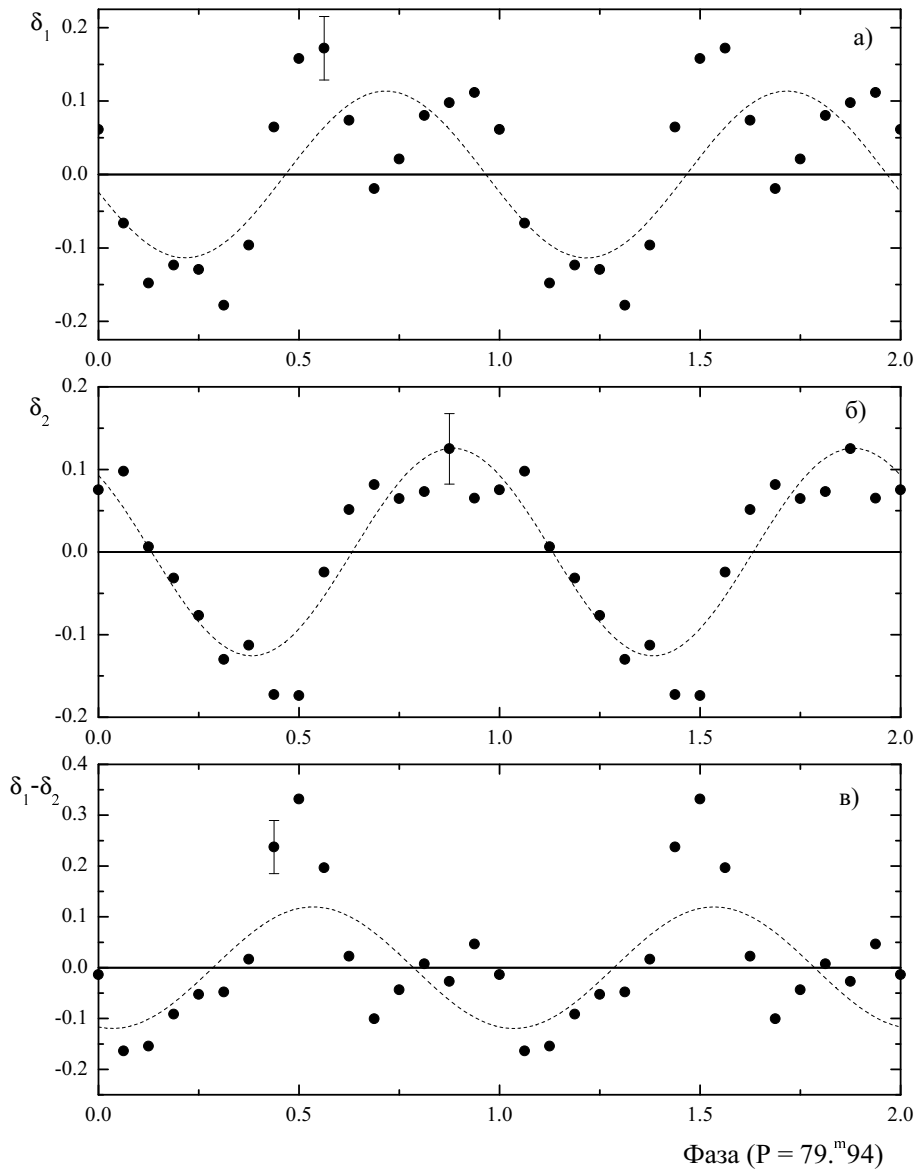


Рис. 6. Средние кривые, построенные с периодом 79.94 мин для остатков I_D , соответствующих первой (а) и второй (б) половинам пробного “основного” цикла 159.88 мин, и разность между этими двумя кривыми (в). Интервал $\Delta\varphi$ всюду равен 1/16; штриховые линии – синусоиды, вычисленные методом наименьших квадратов. По вертикали – средние значения остатков δ_1 , δ_2 и $\delta_1 - \delta_2$

12 27-суточная вариация

Интересное впечатление производит 27-суточное изменение амплитуды периода P_{MDI} .

Чтобы получить этот результат, для всего I_D -ряда мы вычислили скользящие средние значения A_h за 7-суточные интервалы. Результат показан на рис. 7, где видна сильная, примерно до 50%, модуляция амплитуды с периодом *солнечного* вращения

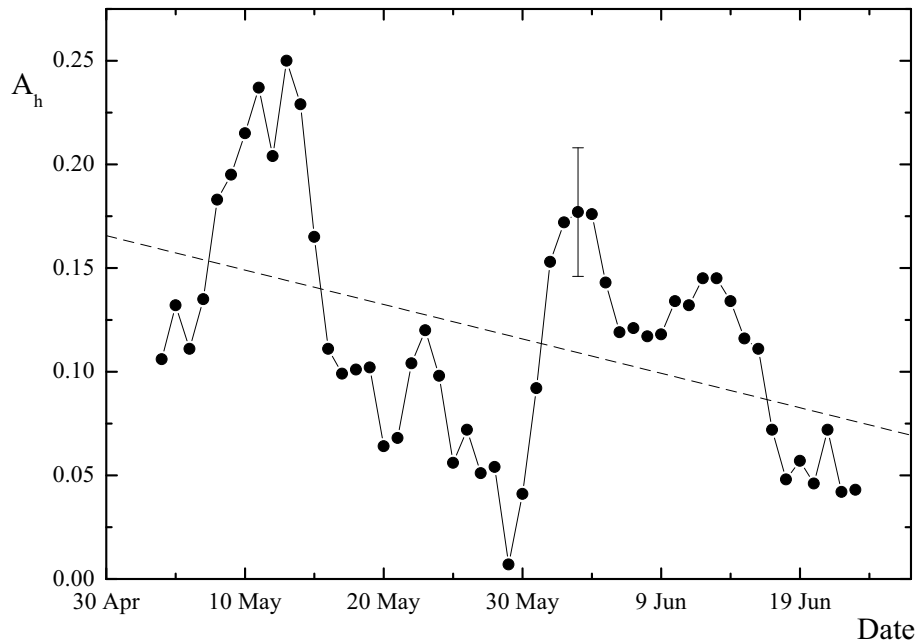


Рис. 7. Изменение амплитуды колебаний сигнала I_D с периодом 79.94 мин за 57 суток. Каждая точка – скользящее среднее за 7 суток; наклонная штриховая линия – прямая линейной регрессии

$$P_{\odot} = 27 \pm 5 \text{ (сут)}. \quad (11)$$

Естественно сопоставить эту вариацию с секторной структурой среднего магнитного поля (СМП) Солнца как звезды. Последние данные – измерения СОУ (публикуемые в “*Solar-Geophysical Data*”) – дополнены измерениями, выполненными в КраО нами (совместно с Т.Т. Цапом). Результаты показаны на рис. 8, где верхняя кривая демонстрирует поведение отклонений ΔA_h амплитуды колебания от наклонной прямой линии (согласно рис. 7), а нижняя – изменение СМП (скользящие средние за 7 суток). Видим удовлетворительное согласие двух величин – в том смысле, что A_h усиливается при *южной* полярности магнитного поля. (Это согласуется с выводами 50 – 70-х годов о том, что солнечная активность, характеризующаяся разными индексами, ассоциируется преимущественно с *S*-полярностью.)

На рис. 8б показано изменение чисел Вольфа W , хорошо коррелирующее как с вариацией ΔA_h , так и с изменением СМП. Коэффициент корреляции между ΔA_h и СМП равен примерно -0.57 (заметим, что на рис. 8в ход СМП показан с обратным знаком), а между ΔA_h и W он близок к $+0.46$.

13 Заключение

Измерения глубины линии в 1996 г. по данным SOHO/MDI обнаруживают существенную вариацию с периодом $P_{MDI} = 79.94 \pm 0.04$ мин. Инструментальный источник этой периодичности, в основном обусловленный телеметрией, требует дополнительных допущений, причем в определённой степени произвольного характера и без достаточного обоснования.

Сложная структура сигнала I_D , задаваемая алгоритмом (2), позволяет думать, что реальное солнечное колебание с периодом P в сигнале I_D будет проявлять себя в виде периодических флук-

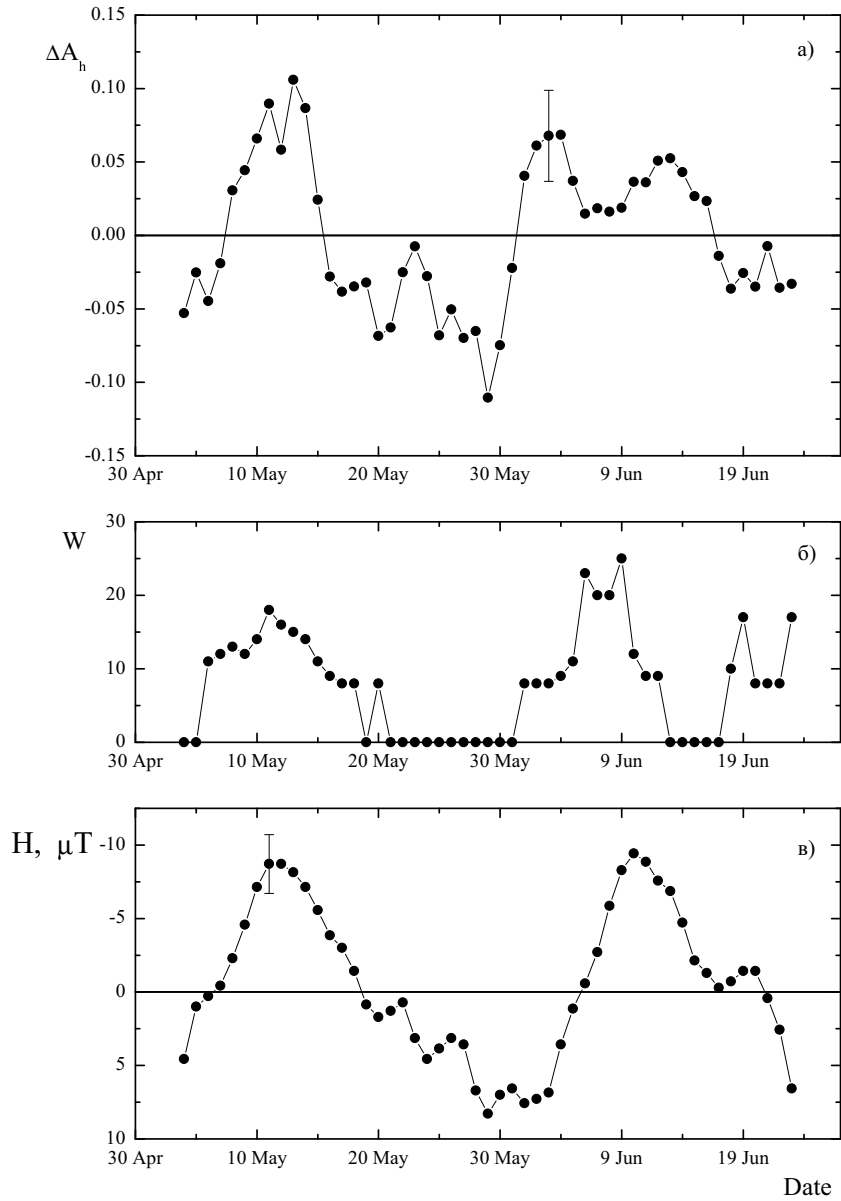


Рис. 8. 27-суточная вариация амплитуды $A_h(P_{MDI})$ (а) в сравнении с одновременным изменением числа пятен W (б) и СМП Солнца (в). Точки – скользящие средние за 7 суток; знак “-” магнитного поля H (в мкТ) соответствует S -полярности

туаций с периодами $P/2$ и/или P . Спектр мощности детрендрованного сигнала I_D (1 мая – 26 июня 1996 г.) обнаруживает значительную мощность на периоде

$$P_{MDI} = 79.94 \pm 0.04 \text{ мин,}$$

с уровнем значимости почти 5.4σ . Соответствующий двойной период

$$P = 2 \times P_{MDI} = 159.88 \pm 0.16 \text{ мин}$$

совпадает в пределах ошибки с обоими периодами пульсаций Солнца, известными ранее из наземных наблюдений (Шеррер и др., 1993; Котов и др., 1997):

$$P_0 = 160.0101 \pm 0.0016 \text{ мин} \quad \text{и}$$

$$P_1 = 159.9660 \pm 0.0006 \text{ мин.}$$

Справедливо полагать поэтому, что гипотеза об *инструментальном* происхождении 160-минутной периодичности и её обертонов в данных SOHO недостаточно обоснована.

Выразительна 27-суточная вариация амплитуды периодичности $P_{MDI} = 79.94$ мин и её хорошая корреляция с 27-суточным изменением СМП Солнца и числом W (рис. 8). Это говорит в пользу солнечной природы периодичности 79.94 мин в измерениях I_D прибором SOI/MDI и её связи с проблемными P_0 - и P_1 -колебаниями Солнца. (Можно также предположить, что глубина самой линии изменяется с 27-суточным периодом вращения Солнца, что, в свою очередь, может приводить к модуляции I_D на *инструментальной* частоте P_{MDI}^{-1} . Такая гипотеза, однако, требует специального рассмотрения и доказательства; в данный момент она представляется искусственной.)

Природа периодичности $P_1 = 159.966$ мин в измерениях КраО и Стэнфордского университета остается загадкой. Можно было бы думать, например, о сверхбыстром – с периодом $\approx P_1$ – вращении центрального ядра, но это противоречит стандартной модели Солнца. (Заметим, что более четверти века тому назад гипотеза о быстром, с периодом ~ 1 ч, вращении ядра выдвигалась Роксбургом (1974) для объяснения дефицита солнечных нейтрино.) Тем не менее, с ростом числа данных о колебаниях Солнца, – и особенно ввиду поразительной фазовой устойчивости колебания P_1 , – у нас растет убеждение, что раскрытие загадки может оказаться важным ключом к пониманию внутреннего строения нашей звезды и других звезд, подобных Солнцу.

Благодарности. Авторы благодарны А.Г. Косовичеву и Ф. Шерреру за предоставление данных эксперимента SOI/MDI (измерения вариаций глубины линии) для анализа, а также им, А.В. Брунсу и К. Фрелиху за полезное обсуждение ряда инструментальных проблем и некоторых наблюдений Солнца на борту SOHO. Авторы признательны Т.Т. Цапу за активное участие в наблюдениях колебаний Солнца на телескопе БСТ-1 КраО, Н.П. Русаку за техническое обеспечение работы солнечного магнитографа, С.В. Котову за некоторые статистические расчеты и Н.Г. Сунице за помощь в обработке наблюдательных данных. Работа частично поддержана INTAS (грант No. 2000-840).

Литература

- Аппуршо и др. (Appourchaux T., Fröhlich C., Andersen B., et al.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 538. P. 401.
 Брукс и др. (Brookes J.R., Isaak G.R., van der Raay H.B.) // *Nature.* 1976. V. 259. P. 92.
 Грек и др. (Grec G., Fossat E., Pomerantz M.) // *Nature.* 1980. V. 288. P. 541.
 Косовичев А.Г. // 1996. Частное сообщение.
 Котов В.А. (Kotov V. A.) // *Solar Phys.* 1985. V. 100. P. 101.
 Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // *Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв.* 1982. Т. 65. С. 3.
 Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // *Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв.* 1983. Т. 66. С. 3.
 Котов и др. (Kotov V.A., Haneychuk V.I., Tsap T.T., Hoeksema J.T.) // *Solar Phys.* 1997. V. 176. P. 45.
 Котов В. А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 76. С. 218.
 Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв.* 2000. V. 96. P. 188.
 Палле и Рока Кортез (Pallé P.L., Roca Cortés T.) // in “Advances in Helio- and Asteroseismology” / Eds. J. Christensen-Dalsgaard, S. Frandsen. Dordrecht, Reidel. 1988. P. 75.
 Палле и др. (Pallé P.L., Roca Cortés T., Gelly B., et al.) // SOHO 6/GONG 98 Workshop: Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars / Eds S. Korzennik, A. Wilson. Noordwijk: ESA SP 418. 1998. V. 1. P. 291.
 Роксбург И. (Roxburgh I.W.) // *Nature.* 1974. V. 248. P. 209.
 Северный и др. (Severny A.B., Kotov V.A., Tsap T.T.) // *Nature.* 1976. V. 259, P. 87.
 Скаргля Дж. (Scargle J. D.) // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 835.
 Сэвэн Э. (Sevin É.) // *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris.* 1946. V. 222. P. 220.
 Финстерли и Фройлих (Fensterle W., Fröhlich C.) // *World Radiation Center. Annual Rep.* 1997. Davos: PMOD/WRC. P. 9.

- Финстерли и Фройлих (Finsterle W., Fröhlich C.) // World Radiation Center. Annual Rep. 1999. Davos: PMOD/WRC. P. 15.
- Фройлих С. (Fröhlich C.) / Private communication. 1998.
- Фройлих и др. (Fröhlich C., Finsterle W., Andersen B., et al.) // SOHO 6/GONG 98 Workshop: Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars / Eds S. Korzennik, A. Wilson. Noordwijk: ESA SP 418. 1998. V. 1. P. 67.
- Харкевич А.А. // Спектры и анализ. 1953. М.: Гос. изд. техн.-теор. лит.
- Шеррер Ф. (Scherrer P.H.) // 1997. Private communication.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H., Hoeksema J.T., Kotov V.A.) // Publ. Astron. Soc. Pacific Conf. Ser. 1993. V. 42. P. 281.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., et al.) // Solar Phys. 1995. V. 162. P. 129.
- Шеррер и Уилкоккс (Scherrer P.H., Wilcox J.M.) // Solar Phys. 1983. V. 82. P. 37.
- Элсуорс и др. (Elsworth Y.P., Jefferies S.M., McLeod C.P., et al.) // Astrophys. J. 1989. V. 338. P. 557.