

УДК 523.9

Колебания Солнца: результаты наблюдений 1974 – 2007 гг.

В.А. Котов, В.И. Ханейчук

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
e-mail: vkotov@crao.crimea.ua, han@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 7 февраля 2008 г.

Аннотация. Измерения эффекта Доплера фотосферы Солнца как целого, выполненные в КрАО в 1974–2007 гг. дифференциальным способом, показали присутствие загадочной периодичности $P_1 = 159.9657(4)$ мин. Она сохраняла фазу на протяжении всего 34-летнего интервала. Истинная природа феномена неизвестна. Пульсация с прежним периодом $P_0 = 160.0101(15)$ мин уверенно регистрировалась только первые девять лет с 1974 г. по 1982 г. Указывается, что (а) средняя амплитуда P_1 -колебания во второй половине данных была почти на 34 % больше, чем в первой половине, и (б)-период биений двух пульсаций, 400(14) сут, совпадает в пределах ошибки с синодическим периодом Юпитера (399 сут). Обсуждается гипотеза, что пульсация P_1 может быть обусловлена сверхбыстрым вращением центрального солнечного ядра.

OSCILLATIONS OF THE SUN: RESULTS OF OBSERVATIONS IN 1974–2007, by V.A. Kotov and V.I. Haneychuk. The Doppler measurements of the photosphere of the entire Sun carried out in 1974–2007 at the CrAO by the differential technique showed the presence of the mysterious periodicity $P_1 = 159.9657(4)$ min. It occurred to be phase coherent over the total 34-year interval. The true nature of the phenomenon is unknown. Pulsation with the former period $P_0 = 160.0101(15)$ min has been registered steadily during the first nine years only, from 1974 through 1982. It is noted that (a) the average amplitude of the P_1 oscillation of the first half of the data was nearly 34 % higher than that of the second half, and (b) the beat period of the two pulsations, 400(14) d, coincides within the error limits with a synodic period of Jupiter (399 d). The hypothesis that the P_1 oscillation might be caused by a superfast rotation of the inner solar core is discussed.

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, пульсации, период Юпитера

1 Введение

По мнению некоторых астрофизиков, на рубеже XXI-го столетия наступила новая эпоха исследований Солнца. И особенно в связи с удачными наблюдениями из космоса (спутники *SOHO*, *TRACE* и др.) и успехами гелиосейсмологии. Но, как показывает практика, у нашей звезды еще много головоломок: дефицит нейтрино и внутреннее строение, загадки вращения и сверхтонкая магнитная структура, 11-летний цикл и т. д. Ведь, по существу, настоящее астрофизическое изучение Солнца, включая его переменность, магнитную и циклическую активность и строение глубоких недр, началось только с созданием Бэбкоком (1953) солнечного магнитографа. Поэтому наши познания о Солнце, особенно теоретические, построены на наблюдениях всего лишь последних пяти циклов.

Недавние измерения звездных осцилляций показали, однако, что наблюдения не всегда подтверждают теорию. Согласно последней, у такой звезды, как Процион, должны наблюдаться акустические колебания яркости, p -моды, с относительной амплитудой $\sim 6 \times 10^{-5}$. Внеатмосферный же эксперимент *MOST* дал верхний предел на порядок ниже этой величины (см. Шига, 2005; новые измерения спутника *WIRE* обнаружили у Проциона p -моды с амплитудой 8.5×10^{-6} , но без “гребневой” структуры пиков спектра мощности, характеризующей колебания солнечного типа (Брунт и др., 2005). Не все объясняется теорией и у Солнца; трудности встречаются, в частности, при интерпретации наблюдаемого спектра низкочастотных колебаний фотосферы. Интересно, что колебания гравитационного типа (волны тяжести, или g -моды), предсказываемые теорией, у Солнца до сих пор не обнаружены. Но обратим внимание на три поразительных факта, или “совпадения”, из истории солнечной физики второй половины XX в.

(1) Более 30 лет назад Роксбург (1974), с целью объяснить дефицит солнечных нейтрино, предположил, что центральное ядро Солнца вращается с периодом порядка часа.

(2) Французский астроном Савэ (1946) – за 28 лет до идеи Роксбурга – утверждал, что “... собственный период вибраций Солнца, т. н. период его инфразвука (1/9 сут), играет существенную роль в распределении внешних планет”. Период Савэ 1/9 сут был, по-видимому, плодом его рассуждений о расстояниях и резонансах планет Солнечной системы.

(3) В 1974–1980 гг. пульсации Солнца-как-звезды – и именно с периодом $P \approx 1/9$ сут, или 160 мин, – были зарегистрированы (Брукс и др., 1976, Северный и др., 1976, Шеррер и Уилкоккс, 1983). Природа этих “таинственных” колебаний солнечной фотосферы до сих пор не установлена.

Одним из следствий сверхбыстрого, по Роксбургу, вращения ядра могут быть периодические колебания фотосферы. Последние же могут регистрироваться по доплеровскому сдвигу фраунгоферовых спектральных линий. Аналогичный сдвиг следует ожидать и от гравитационных g -мод собственных колебаний Солнца, проникающих, согласно теории, наиболее глубоко внутрь звезды, к ее энерговыделяющему ядру (Кокс, 1983). Ожидаемый сдвиг, естественно, слишком мал, поэтому надо было иметь или создать: (а) специализированный солнечный телескоп с точным слежением за Солнцем, (б) метод измерения крошечного доплеровского сдвига, (в) высокоточную и чувствительную аппаратуру для его регистрации. Средняя за много лет амплитуда доплеровского сдвига фотосферы оказалась, действительно, чрезвычайно малой, ≈ 0.3 м/с, или в относительных единицах: $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-9}$ (λ – длина волны). Поэтому потребовался еще один важный фактор – достаточно большая продолжительность однородных и стабильных, в отношении чувствительности и калибровки, измерений.

Подходящий для указанной цели инструмент – модернизированные телескоп БСТ-1 и солнечный магнитограф – к 1974 г. в КраО был создан (Котов и др., 1982).

2 34-летний опыт КраО

Крымский эксперимент, ведущийся регулярно с 1974 г. (в определенном смысле “непрерывный”, когда позволяют, конечно, наблюдательный сезон, погода и инструмент), как раз и нацелен был с самого начала на обнаружение долгопериодных, с периодами несколько часов, глобальных колебаний фотосферы. Солнечный магнитограф КраО (типа созданного Бэбкоком) весь световой день измеряет разность лучевых скоростей между центральной круговой диаметром $0.66D$ и внешней кольцевой зонами солнечного диска; здесь D – диаметр диска. Солнце наблюдается в “параллельном” пучке с использованием только трех плоских питающих зеркал телескопа БСТ-1, когда входная щель спектрографа освещается светом от всего диска. Конструкция телескопа и фотогидирующее устройство обеспечивают устойчивое слежение за Солнцем с точностью до 1 угл. сек в течение всего дня. Эффект Доплера измеряется по линии поглощения Fe I $\lambda 512.37$ нм, нечувствительной к магнитному полю.

Первые 9 лет наблюдений показали, что главное наиболее значимое колебание фотосферы имеет период примерно 160 мин. Уточненное значение по крымским измерениям 1974–1982 гг. (см. ниже). $P_0 = 160.0101(15)$ мин, где в скобках указана стандартная ошибка для последних значимых цифр

(Котов и др., 2000). Результат подтвержден независимыми измерениями бирмингемской группы и в Стэнфордском университете, а также измерениями на южном полюсе Земли (Брукс и др., 1976; Грек и др., 1980; Шеррер и Уилкоккс, 1983).

Последующие измерения КраО и Стэнфорда показали, что после 1982 г. колебание P_0 практически исчезло, и у Солнца стало доминировать колебание $P_1 = 159.9660(6)$ мин – почти годичный “спутник” периода P_0 (точное значение спутника $159.9614(15)$ мин (Котов и др., 1997)). Полный ряд крымских измерений, теперь охватывающий 34 года, представляет особую ценность для проверки фактической значимости указанных выше колебаний фотосферы Солнца и выяснения их природы. (Обсуждение факта отсутствия или присутствия колебаний P_0 и P_1 в некоторых данных спутника *SOHO* см. у Котова и др., (2000).)

3 Данные измерений

В 1974–2007 гг. дифференциальные измерения колебаний фотосферы Солнца в КраО выполнены в течение 2006 дней, в сумме 12235 ч. Сигнал лучевой скорости интегрировался за каждую минуту, затем при обработке усреднялся в последовательных 5-минутных интервалах. Метод измерений – “Солнце относительно Солнца” – автоматически устраняет все главные инструментальные и атмосферные искажения лучевой скорости. Остаточные медленные тренды в течение дня, имеющие в основном тоже земное происхождение и трактуемые как шумы, исключались с помощью парабол.

Положительная скорость V соответствует “расширению” Солнца, т. е. сдвигу линии центральной части диска в синюю сторону. Общее число 5-минутных остатков “сигнал минус тренд” $N = 146819$ со стандартным отклонением 6.4 м/с в крымской шкале дифференциальной скорости. Спектры мощности вычислялись посредством прямого Фурье-преобразования, статистическая значимость пиков оценивалась по общепринятому критерию (Скаргль, 1982).

Основные результаты наблюдений 1974–1995 гг. опубликованы Котовым и др. (1997). Теперь главные вопросы таковы: – Сохранилось ли с тех пор колебание P_1 ? – Каково поведение его фазы и амплитуды? – Каков физический механизм возбуждения? – Есть ли связь с 11-летним циклом солнечной активности (СА)?

4 Спектры мощности

Спектр мощности (СМ) первых 9 лет измерений КраО, вычисленный в достаточно широком частотном диапазоне около 9-й гармоники суток, показан на рис. 1. Главный пик $P_0 = 160.0101(15)$ мин окружен парой заметных, т. е. превышающих уровень *априорной* значимости 3σ , пиков 159.9629 и 160.0579 мин. Последние представляют собой типичные годичные спутники P_0 , обусловленные в основном сезонной скажностью измерений, а точнее – практическим отсутствием измерений зимой. Термин “априорный” значит, что вероятность пика не умножена на число независимых пробных частот, m . Фактическая значимость P_0 -пика на рис. 1 по разным критериям и с учетом m превышает 4σ , т. е. его случайная вероятность меньше 6×10^{-5} (Котов и др., 1997, 2000).

СМ, вычисленный для несколько большего диапазона частот и для всех измерений 1974–2007 гг., приведен на рис. 2. Период главного пика $P_1 = 159.9657(4)$ мин в пределах ошибки совпадает с доминантным периодом 1974–1995 гг. ($159.9660(6)$ мин (Котов и др., 1997) и очень близок к периоду короткопериодного годичного спутника P_0 , равному $P_0' = 159.9614(15)$ мин. (Примечательно, что фактический период $159.9629(15)$ мин правого “годичного спутника” P_0 на рис. 1 лучше согласуется со средним P_0' и P_1 , равным $159.9636(8)$ мин, чем с предвычисленным P_0' . В то же время период левого спутника P_0 на рис. 1, $160.0579(15)$ мин, в пределах ошибки *совпадает* со своим предвычисленным значением $160.0588(15)$ мин.)

Сравнение спектров на рис. 1 и 2 отчетливо показывает, что после 1982 г. вместо P_0 стала доминировать пульсация P_1 .

На рис. 3 приводим два спектра, вычисленных *отдельно* для первой половины данных, с 1974 г. по 1990 г., $N = 84362$, и для второй половины, с 1991 г. по 2007 г., $N = 62457$. Самые сильные пики

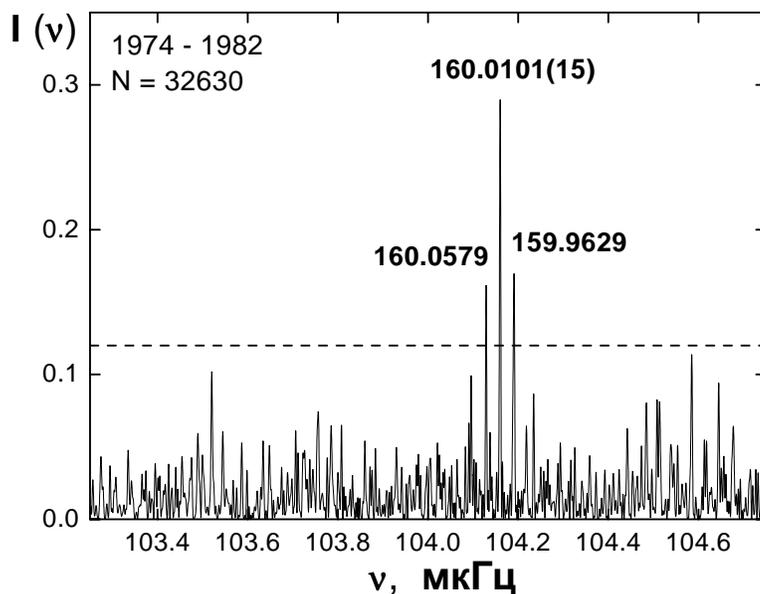


Рис. 1. Фрагмент СМ колебаний Солнца в 1974–1982 гг. Число измерений скорости с 5-минутным усреднением $N = 32630$, пунктирная линия соответствует уровню априорной значимости 3σ . По горизонтали – частота ν в мкГц, по вертикали – мощность $I(\nu)$ в произвольных единицах; шаг по частоте 0.2 нГц, главный пик отвечает периоду 160.0101(15) мин

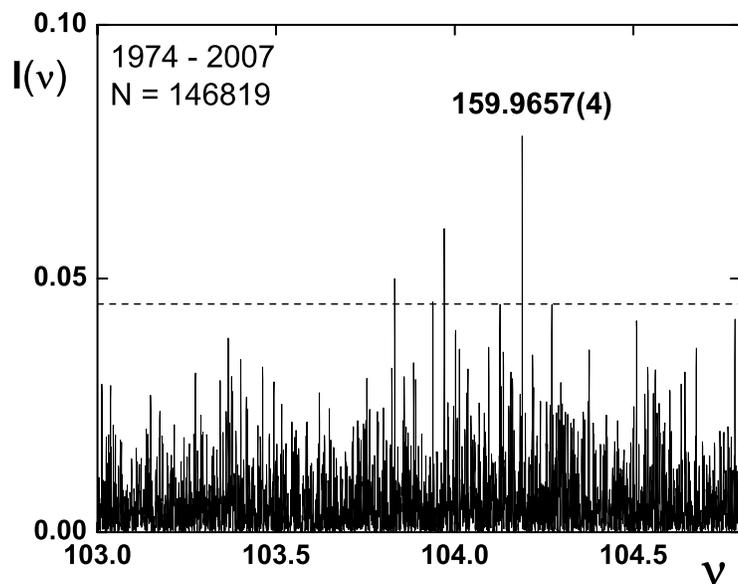


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для всех крымских измерений 1974–2007 гг., $N = 146819$. Самый сильный пик соответствует периоду $P_1 = 159.9657(4)$ мин

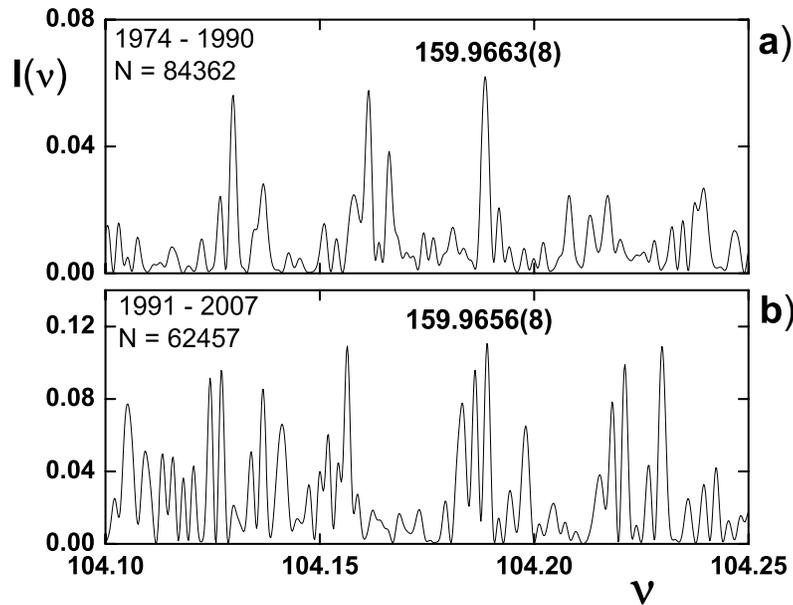


Рис. 3. Фрагменты спектров мощности для (а) 1974–1990 гг., $N = 84362$, и (б) 1991–2007 гг., $N = 62457$. По вертикали – мощность $I(\nu)$ в произвольных, но одинаковых для а и б, единицах; по горизонтали – частота в мкГц

обоих спектров соответствуют одному и тому же, в пределах ошибки, периоду: 159.9663(8) мин и 159.9656(8) мин. Согласие значений, вместе с совпадением фаз для обоих интервалов (п. 5), обеспечило резкое доминирование пика P_1 в спектре полного 34-летнего ряда на рис. 2. Заметим, что мощность нижнего пика рис. 3 примерно в 1.8 раза больше мощности верхнего, что соответствует 34 %-му возрастанию амплитуды со временем; пока неизвестно, что это означает и чем вызвано.

5 О фазе пульсации P_1

Для каждого последовательного двухлетнего интервала методом наложенных эпох вычислена средняя кривая с пробным периодом 159.9600 мин. Затем для каждой такой кривой методом наименьших квадратов определена аппроксимирующая синусоида, для которой найдены гармонические амплитуда и фаза максимума скорости. (Амплитуда оказалась статистически незначимой для 1985–1986 гг. и 1996–1997 гг., совпавшими с минимумами СА)

Поведение 31 фазы показано точками на рис. 4 с повторением для фазовых интервалов 1–2, 2–3 и т. д. Наклон прямой линейной регрессии отвечает фактическому периоду 159.9657(4) мин с коэффициентом корреляции 0.99. Период согласуется с главным периодом рис. 2, эфемерида же гармонического максимума скорости имеет вид:

$$Max(V) = JD\ 2442048.584(5) + 0.1110873(3) \times E, \tag{1}$$

в обычной форме, как для переменных звезд (эпоха E отвечает целому числу периодов P_1 в сутках).

Колебание P_1 имело существенную амплитуду на протяжении всех 34 лет (за исключением указанных выше двух интервалов минимума СА), причем с сохранением начальной фазы.

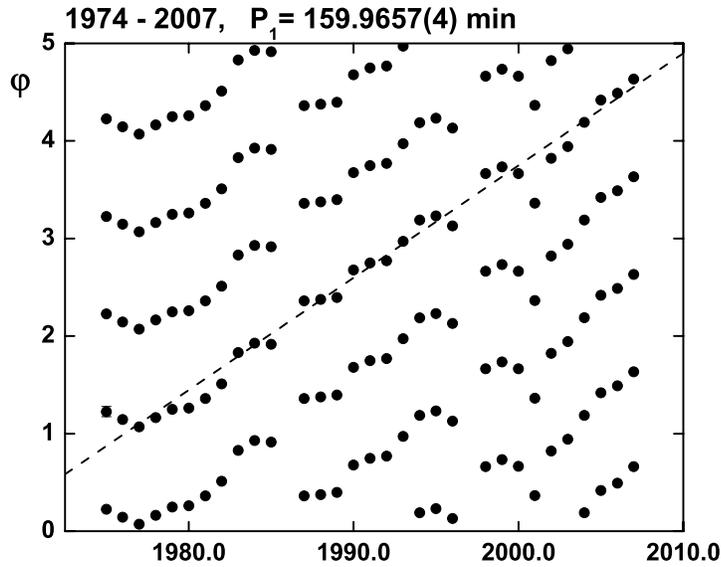


Рис. 4. Диаграмма О–С для пробного периода 159.9600 мин. По горизонтали – время в годах, по вертикали – гармоническая фаза φ (точки). Вертикальной черточкой указана типичная ошибка фазы, пунктирная линия – прямая линейной регрессии, наклон которой отвечает истинному периоду 159.9657(4) мин

Средняя кривая P_1 -пульсации показана на рис. 5, гармоническая амплитуда $A = 0.28$ м/с, или 2 км для колебаний радиуса (в модели чисто радиальных пульсаций). Вид кривой заметно отличается от гармонического: по критерию χ^2 надежность вывода о негармоничности составляет 0.95. А это представляет особый интерес, поскольку для таких малых относительных амплитуд, $\sim 3 \times 10^{-6}$, должна быть справедливой линейная теория колебаний с *гармоническим* профилем.

6 Колебания радиуса

Путем интегрирования кривой скорости получена P_1 -кривая изменения солнечного радиуса R для случая радиальных пульсаций, показанная на рис. 6. Здесь амплитуда примерно 2.6×10^{-6} в относительных единицах, что соответствует колебаниям R на ± 2 км. Кривая весьма асимметрична и похожа на кривую типичных пульсирующих звезд типа δ Sct и цефеид. Солнце, однако, не гигант или сверхгигант, и теория пульсаций цефеид, следовательно, к нему не приложима из-за отсутствия у нашей звезды специфической зоны “вторичной ионизации гелия” или “ионизации водорода” – зон, которые обычно привлекаются для моделирования пульсаций цефеид и звезд типа δ Sct.

Принимая, что светимость Солнца $\sim R^2$, получаем соотношение между амплитудами A изменения радиальной скорости V_R (средней лучевой скорости диска Солнца, в км/с) и болометрической величины M : $A(V_R) = k \times A(M)$, где $k \approx 40$. Это хорошо согласуется с k звезд типа δ Sct, цефеид и переменных типа RR Lyr (k в пределах от 36 до 63) (Фролов, 1970), подкрепляя точку зрения многих исследователей переменных звезд, что в основе пульсаций всех этих звезд лежит один и тот же механизм возбуждения.

Однако влияние нелинейных и неадиабатических эффектов у Солнца пренебрежимо мало (при радиальных пульсациях, например, неадиабатические поправки $\sim P/T_K$, где кельвиновское время $T_K \approx 6 \times 10^{14}$ с, а период Солнца $P \approx 10^4$ с (Кокс, 1983)). Поэтому существенно негармонический вид профиля $\Delta R/R$ сильно озадачивает, включая на этот раз и Солнце. Мы выдвигаем гипотезу,

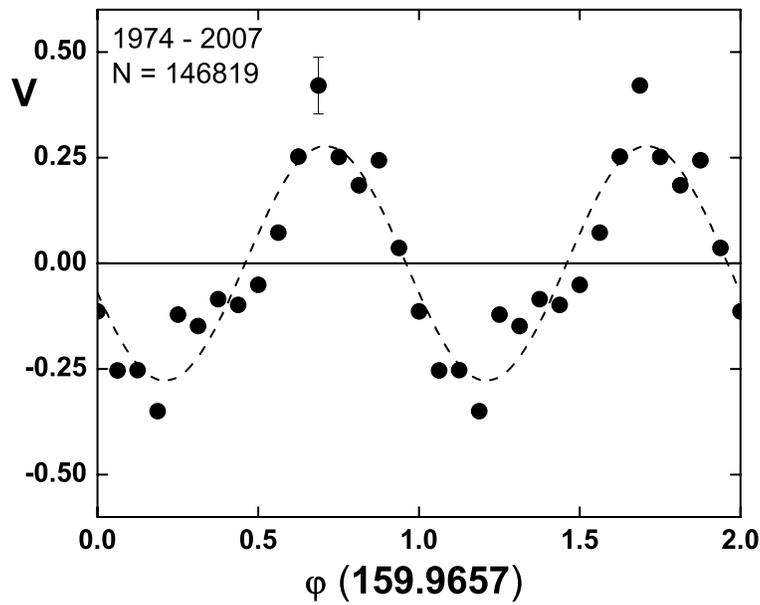


Рис. 5. Средняя кривая изменения дифференциальной скорости фотосферы с периодом $P_1 = 159.9657$ мин (1974–2007 гг., $N = 146819$). Пунктир – аппроксимирующая синусоида, вертикальной черточкой показана стандартная ошибка для интервала усреднения по фазе $P_1/16$. По вертикали – скорость V (м/с), по горизонтали – фаза периода P_1 ; нулевая фаза соответствует моменту 0 UT, 1 января 1974 г.

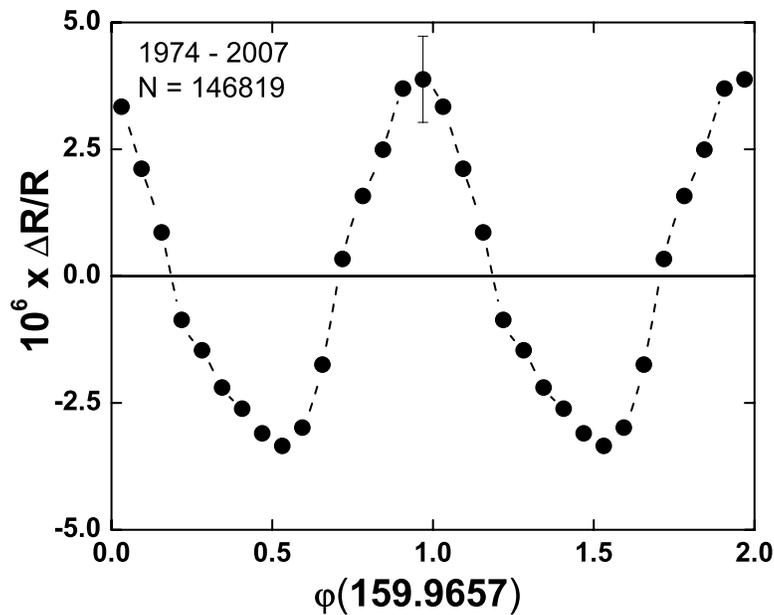


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для относительных колебаний радиуса Солнца $10^6 \times \Delta R/R$ (точки, соединенные пунктирной сплайн-кривой)

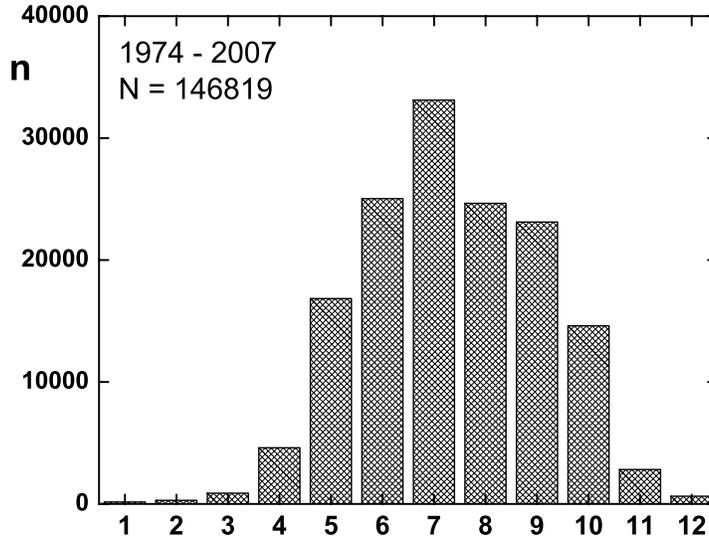


Рис. 7. Гистограмма доплеровских измерений КрАО за 1974–2007 гг. ($N = 146819$). По горизонтали – номер месяца, по вертикали – число n -измерений скорости с 5-минутным интегрированием

что P_1 -пульсация не относится к нормальным модам: за ее возбуждение должен быть ответственным некий нелинейный механизм неизвестной природы. Не исключено, что он обусловлен, как и в гипотезе Роксбурга (1974), быстрым вращением ядра.

7 Трудности интерпретации

Доказательства солнечного происхождения пульсаций P_0 и P_1 приводились неоднократно (Котов и др., 1997, 2000). Но остаются неизвестными источники и механизмы возбуждения. Вряд ли пульсации являются g -модами, т. к. теория, предсказывая богатый спектр таких колебаний, не в состоянии объяснить, почему возбуждаются только P_0 и/или P_1 . К этому добавим, что g -моды солнечной фотосферы до сих пор не зарегистрированы (Апшурчо и др., 2000).

Уже предполагалось (Котов, 1996), что пульсация P_1 вызвана сверхбыстрым, по Роксбургу (1974), вращением центрального, с сильным магнитным полем, ядра Солнца, хотя это и противоречит стандартным, общепринятым воззрениям на внутреннее устройство звезд. Если гипотеза справедлива, то сидерический период вращения ядра близок, наверное, к $P_1 = 159.9657(4)$ мин.

Период биений двух пульсаций (в сутках)

$$P_B = (1/P_1 - 1/P_0)^{-1} = 400(14), \quad (2)$$

в пределах ошибки совпадает с синодическим периодом обращения Юпитера вокруг Солнца $P_J = 399$ сут. Совпадение, конечно, может быть случайным. Но если для P_0 принять более точное значение $160.0101(2)$ мин (Котов, 1996), то период биений становится равным $400(4)$ сут, что еще сильнее поражает совпадением, с точностью до 1 %, с периодом P_J .

8 Заключение

Мы не утверждаем, что Юпитер, самая гигантская планета Солнечной системы, влияет на пульсации Солнца или что между двумя главными объектами системы имеется “мистическое” взаимодействие неизвестной природы. Период биений совпал с *синодическим* периодом Юпитера, поэтому появление $P_B = 400$ сут может быть связано с годичной скважностью наших *земных* наблюдений: 94 % данных получено в мае-октябре и только 6 % – в остальные месяцы (рис. 7). Но в любом случае, даже при такой скважности требуются, по-видимому, весьма специфические моды обеих солнечных пульсаций, чтобы период их биений совпал с периодом Юпитера.

Недавно Скрыбин и др. (2005) обнаружили период $P_{SW} = 399$ сут в параметрах солнечного ветра, а именно: в изменениях среднесуточных значений плотности, температуры и скорости. Акцентируя внимание на совпадении P_{SW} с синодическим периодом Юпитера, авторы приписали этот странный эффект инъекции высокоэнергичных частиц из магнитосферы планеты в гелиосферу. Такое объяснение нам кажется не совсем реалистичным, поскольку маловероятно, чтобы инъекция частиц из далекой магнитосферы Юпитера преобладала бы над всеми другими факторами в районе земной орбиты. В связи с биением P_B , наблюдаемым в колебаниях фотосферы, закономерен вопрос об истинной природе его возникновения как у Солнца, так и в вариациях солнечного ветра.

Уже высказывалось мнение, что пульсация P_0 носит, по-видимому, чисто радиальный характер (Котов и др., 1997). Вопрос же о моде P_1 остается открытым (степень $l = 0, 1$ или 2?). Если эта пульсация обусловлена сверхбыстрым вращением ядра, то, скорее всего, она – дипольного типа; возможно, что она имеет также свойства бегущей волны. Дальнейшее изучение двух пульсаций, P_0 и P_1 , Солнца-как-звезды может дать новую, ключевую информацию о его внутреннем строении, динамике и физике ядра и природе 22-летнего цикла.

Авторы признательны Н.П. Русаку за техническое обеспечение работы телескопа БСТ-1 и магнитографа, а также ему и Т.Т. Цапу за активное участие в наблюдениях и О.С. Гопасюк за ряд ценных замечаний к статье.

Литература

- Апшурчо 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.
 Брунт и др. (Bruntt H., Kjeldsen H., Buzasi D.L., Bedding T.R.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 633. P. 440.
 Бэбкок (Babcock H.W.) // *Astrophys. J.* 1953. V. 118. P. 387.
 Грек и др. (Grec G., Fossat E., Pomerantz M.) // *Nature.* 1980. V. 288. P. 541.
 Кокс Дж.П. // *Теория звездных пульсаций.* М.: Мир. 1983.
 Котов В.А. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 1996. Т. 39. С. 1210.
 Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1982. Т. 65. С. 3.
 Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Кинем. и физ. небес. тел.* 2000. Т. 16. С. 49.
 Котов и др. (Kotov V.A., Haneychuk V.I., Tsap T.T., Hoeksema J.T.) // *Solar Phys.* 1997. V. 176. P. 45.
 Роксбург (Roxburgh I.W.) // *Nature.* 1974. V. 248. P. 209.
 Савэ (Sevin É) // *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris.* 1946. V. 222. P. 220.
 Северный и др. (Severny A.B., Kotov V.A., Tsap T.T.) // *Nature.* 1976. V. 259. P. 87.
 Скаргль (Scargle J.D.) // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 835.
 Скрыбин Н.Г., Тимофеев В.Е., Мирошниченко Л.И., Самсонов С.Н. // *Письма в Астрон. журн.* 2005. Т. 31. С. 931.
 Фролов М.С. // *Пульсирующие звезды.* / Ред. Б.В. Кукаркин. М.: Наука. 1970.
 Шеррер и Уилкокс (Scherrer P.H., Wilcox J.M.) // *Solar Phys.* 1983. V. 82. P. 37.
 Шига (Shiga D.) // *Sky Telesc.* 2005. V. 109. №. 1. P. 22.