

УДК 523.9

Солнце пульсирующее, цикл 23

В.А. Котов, В.И. Ханейчук, Т.Т. Цап

Крымская астрофизическая обсерватория, пос. Научный, Крым 98409

e-mail: vkotov@crao.crimea.ua, han@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 10 января 2005 г.

Аннотация.

Измерения глобальных колебаний фотосферы Солнца в КрАО выполнены с 1974 г. по 2004 г. в течение 1858 дней (≈ 11380 ч). Единственный период, статистически надёжный и когерентный на протяжении 31 года, равен $P_1 = 159.9656 \pm 0.0004$ мин. Его фаза оставалась практически неизменной в течение всего интервала наблюдений; средняя амплитуда 0.25 м/с в шкале крымских дифференциальных измерений эффекта Доплера (или 2 км для радиальных колебаний солнечного радиуса). В циклах 21 и 22 средняя кривая P_1 -пульсации была практически гармонической. В 23-м же цикле она асимметрична и близка по форме к кривым блеска типичных цефеид, причём пиковая амплитуда цикла 23 вдвое больше, чем циклов 21 и 22. Природа P_1 -пульсации неизвестна. Изменение формы кривой колебания, а также прогрессивный рост амплитуды со временем, особенно после 1996 г., связывается с общим аномальным поведением Солнца в цикле 23 — ускоренным экваториальным вращением и нарушением правила Гневышева-Оля для последней пары циклов, №№ 22–23).

THE SUN PULSATING, CYCLE 23, by V.A. Kotov, V.I. Haneychuk and T.T. Tsap. The CrAO measurements of global oscillations of the solar photosphere were made from 1974 through 2004 during 1858 days (≈ 11380 hr). The only period, statistically reliable and coherent over 31 year span, is found to be $P_1 = 159.9656 \pm 0.0004$ min. Its phase was nearly constant over entire interval of observations; the mean amplitude is equal to 0.25 m/s in the Crimean scale of the differential measurements of Doppler effect (or 2 km for radial oscillations of the solar radius). In the cycles 21 and 22, the P_1 pulsation showed almost harmonic profile of the mean velocity curve. In the cycle 23, however, the profile appears to be strongly asymmetric, being alike the luminosity curves of typical cepheids, and with the peak amplitude twice as much as that in cycles 21 and 22. The nature of the P_1 pulsation is unknown. The change of the P_1 oscillation profile and the persistent enhancement of its amplitude with time, especially after 1996, are thought to be connected with general abnormal behaviour of the Sun in the cycle 23, i.e. an accelerated equatorial rotation and the breakdown of the Gnevyshev-Ol's rule as observed for the last pair of cycles, No. 22–23.

Ключевые слова: Солнце, 11-летний цикл, пульсация

1 Введение

Программа, нацеленная на обнаружение низкочастотных – с периодами порядка часа – колебаний фотосферы Солнца была начата в Крымской астрофизической обсерватории, КраО, в 1974 г. (Северный и др., 1976; Котов и др., 1983) и продолжается в настоящее время. В результате – почти одновременно с Бруксом и др. (1976) – была обнаружена пульсация фотосферы неизвестной природы с периодом 160 мин; его значение позднее было уточнено: $P_0 = 160.0101 \pm 0.0014$ мин (Котов и др., 1997). По данным КраО и Стэнфорда (Шеррер, Уилкоккс, 1983; Котов и др., 1997), пульсация P_0 уверенно наблюдалась в 1974 – 1982 гг., после чего исчезла, уступив место пульсации с периодом $P_1 = 159.9654 \pm 0.0010$ мин. Последний почти совпал с одним из годовичных сателлитов P_0 , равным 159.9614 мин. Вскоре обнаружилось, что новое колебание P_1 имеет профиль скорости, существенно отличающийся от гармонического (Котов и др., 2004). А это может пролить свет на природу явления.

В 2004 г. в течение 51 дня нами получена новая серия доплеровских измерений фотосферы. Объединив эти данные с предыдущими, мы получили массив 1974 – 2004 гг., охватывающий почти три солнечных цикла. Он позволяет детализировать картину таинственного P_1 -колебания и продвинуть интерпретацию: – Насколько устойчивы период P_1 и особенно его начальная фаза? – Существенно ли отклонение профиля средней кривой от гармонического? – Изменяется ли профиль со временем? – Изменяется ли средняя амплитуда от цикла к циклу? – Какова физическая природа колебания?

2 Измерения Солнца 1974 – 2004 гг.

В КраО для измерений эффекта Доплера фотосферы применяется дифференциальный метод: с помощью магнитографа Бэбкока регистрируется разность лучевых скоростей между центральной зоной солнечного диска и его краевой, кольцевой зоной. Радиусы зон: $(0.00 - 0.66)R$ – центральная и $(0.66 - 1.00)R$ – краевая, где R – радиус Солнца или его иска.

Солнце наблюдается как звезда, т.е. в “параллельном” пучке света, с использованием только плоских зеркал телескопа БСТ-1 (Котов и др., 1983). Эффект Доплера регистрируется по линии поглощения Fe I $\lambda 512.37$ нм с нулевым фактором Ланде. Разность лучевых скоростей двух зон интегрируется за каждую минуту и запоминается на ЭВМ. При обработке дифференциальная скорость V усредняется за 5-минутные интервалы, а медленные дневные тренды удаляются с помощью парабол (полагаем, что тренды в основном атмосферного и инструментального происхождения).

За 31 год измерения сделаны в течение 1858 дней, в сумме примерно 11380 ч. Окончательный массив состоит из $N = 136565$ V -остатков “измерения минус тренд” с 5-минутным усреднением и стандартным отклонением 6.36 м/с. Положительные значения V отвечают состоянию «расширения» Солнца, а приводимые неопределённости – стандартной ошибке $\pm 1\sigma$. Нулевая фаза всюду соответствует 00^h00^m UT, 1 января 1974 г.; спектры мощности, СМ, вычислялись посредством прямого фурье-преобразования.

3 Спектр мощности

По данным Стэнфорда (Котов и др., 1997) в СМ колебаний фотосферы за 1977 – 1994 гг. доминировал период 159.9663 ± 0.0007 мин. Такой же, в пределах ошибки, период присутствовал и в СМ КраО примерно за те же годы: 1974 – 1995 гг., период 159.9662 ± 0.0006 мин. Согласие результатов убедительно говорит в пользу *солнечной* природы явления, – несмотря на близость к 1/9-й средне-солнечных суток (все причины земного происхождения были в своё время детально рассмотрены и отброшены).

На рис. 1 приведен СМ наших данных за 31 год, вычисленный вблизи 9-й гармоники суток. Главный пик отвечает периоду $P_1 = 159.9657 \pm 0.0004$ мин. Его достоверность, определённая по критерию Скаргля (1982), составляет 4σ с вероятностью $p \approx 6 \times 10^{-5}$. Другие пики, превышающие уровень априорной значимости 3σ , несущественны, т.к. вероятность p их случайного появления

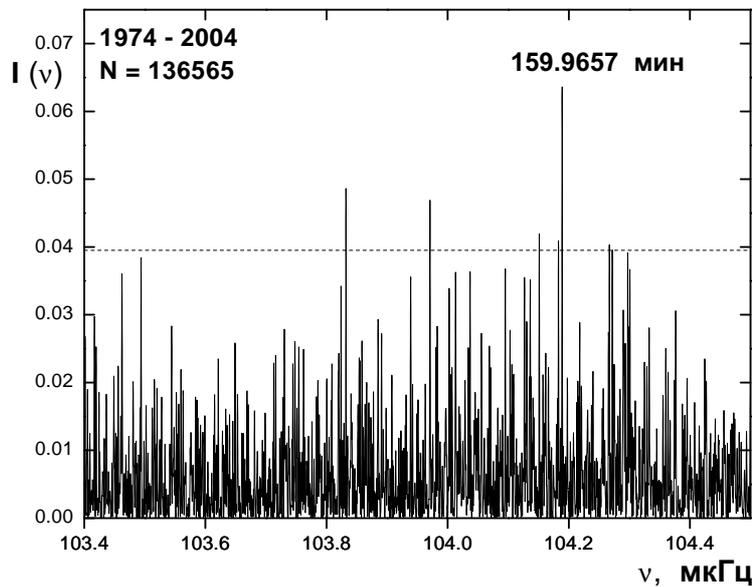


Рис. 1. Спектр мощности колебаний Солнца за 1974 – 2004 гг. ($N = 136565$). По горизонтали – частота ν в мкГц, по вертикали – мощность $I(\nu)$ как квадрат гармонической амплитуды A^2 в $(\text{м/с})^2$; пунктирная линия показывает уровень априорной значимости 3σ . Главный пик отвечает периоду 159.9657 ± 0.0004 мин.

надо умножить на число независимых частот $m = T/2\Delta t \approx 1630476$, где $T = 31$ год – общая длина временного ряда, $\Delta t = 5$ мин – интервал между точками этого ряда.

4 Диаграмма О – С

Для построения диаграммы в качестве пробного взят период 159.9600 мин, и с ним вычислены средние кривые для данных за каждый последовательный двухлетний интервал. Для этих кривых методом наименьших квадратов, МНК, определены гармонические амплитуды A и фазы максимума φ . Распределение фаз показано на рис. 2 (отсутствуют фазы 1985 – 1986 гг. и 1996 – 1997 гг., когда колебание имело пренебрежимо малую среднюю амплитуду). Фазы нанесены точками в интервале 0 – 1 и повторены для интервалов 1 – 2 и т.д. Прямая линейной регрессии, вычисленная для 28 точек с прогрессивным ростом фазы, соответствует действительному периоду 159.9655 ± 0.0004 мин; коэффициент корреляции 0.99.

В качестве наилучшего значения периода – по данным КраО за 1974 – 2004 гг. – берем среднее из двух вышеприведенных оценок:

$$P_1 = 159.9656 \pm 0.0004 \text{ мин.}$$

5 Средние кривые пульсации P_1 : 1974 – 2004 гг.

На рис. 3 показана средняя кривая пульсации за 31 год, построенная с периодом P_1 и усреднением скорости V в фазовых интервалах шириной $P_1/16$. Параметры синусоиды, проведенной через точки МНК, следующие: $A = 0.25 \pm 0.03$ м/с, $\varphi = 0.73 \pm 0.02$.

Заметно, однако, что ход фактических средних (точки на рис. 3) отличается от гармонического, и особенно в максимуме, на фазе ≈ 0.72 , где отклонение от синусоиды достигает 2.4σ . Применяя

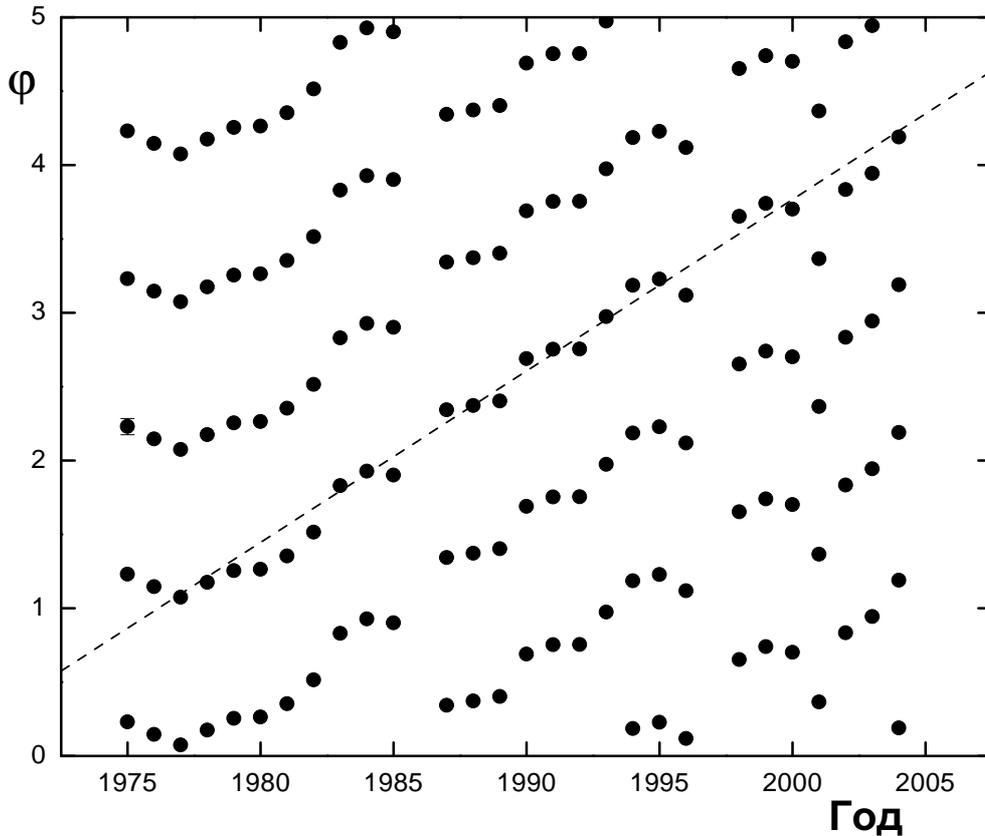


Рис. 2. Диаграмма $O - C$ для пробного периода 159.9600 мин. Вертикальной чертой указана типичная ошибка фазы φ . Пунктирная линия, соответствующая линейной регрессии, даёт фактический период 159.9655 ± 0.0004 мин.

дополнительно критерий χ^2 , значимость отклонения всей кривой от гармонической оцениваем на уровне примерно 2σ , т.е. 95%.

На основе кривой скорости интересно получить кривую колебаний размера Солнца – радиуса условной сферической поверхности фотосферы, отвечающей регистрируемому излучению в крыльях линии 512.4 нм. Для определённости и простоты расчётов будем также предполагать, что P_1 -колебание – радиального типа. Тогда между измеряемой *дифференциальной* скоростью V и фактической скоростью *радиального* смещения, V_r , имеет место простое соотношение, определяемое геометрией двух зон солнечного диска и потемнением диска к краю (Котов и др., 1983): $V_r = V/0.35$.

Кривая относительных вариаций радиуса $\delta R/R$, полученная путём численного интегрирования кривой скорости, показана на рис. 4. Амплитуда изменений радиуса – примерно 2 км, причём кривая радиуса, как и скорости, тоже заметно отличается от гармонической, – с уровнем значимости отклонения примерно 95%.

6 Кривые трех циклов

Значение периода мы определили также отдельно для трех циклов: 21, 22 и 23. Данные 1974 – 1975 гг. относятся к циклу 20; но их сравнительно мало, примерно 5% от данных цикла 21. Поэтому, для полноты общего массива, мы объединили данные 1974 – 1975 гг. с наблюдениями цикла 21. Оказалось, что все три значения периода в соответствующих СМ совпали в пределах ошибок между собой и с нашим «каноническим» значением P_1 (см. п. 4).

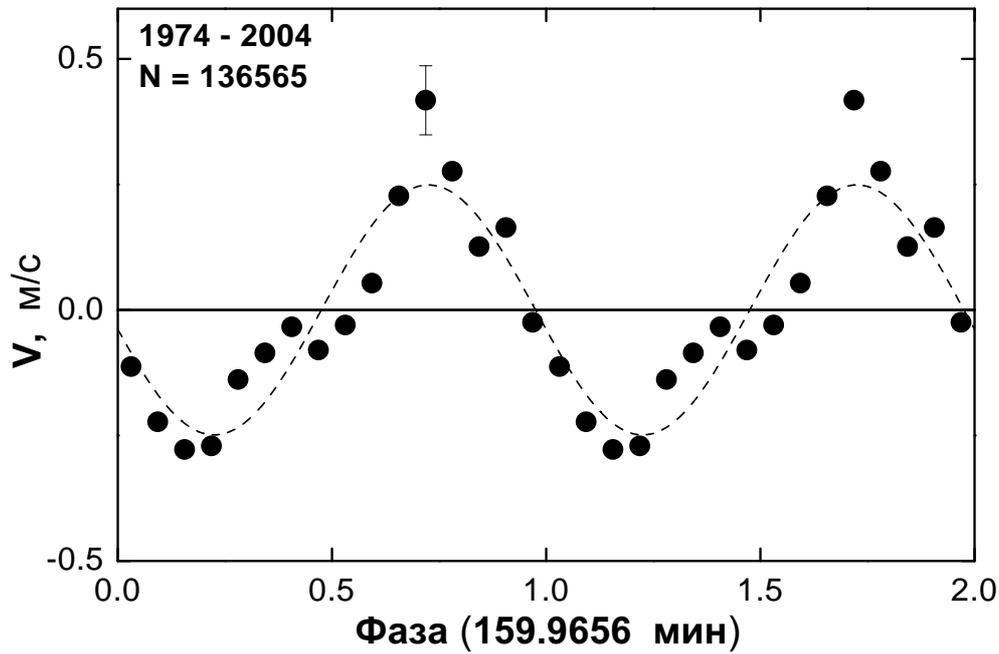


Рис. 3. Средняя кривая пульсации P_1 по измерениям КраО в 1974 – 2004 гг. Пунктиром показана синусоида, проведённая через точки МНК; вертикальная черта соответствует типичной ошибке среднего значения скорости

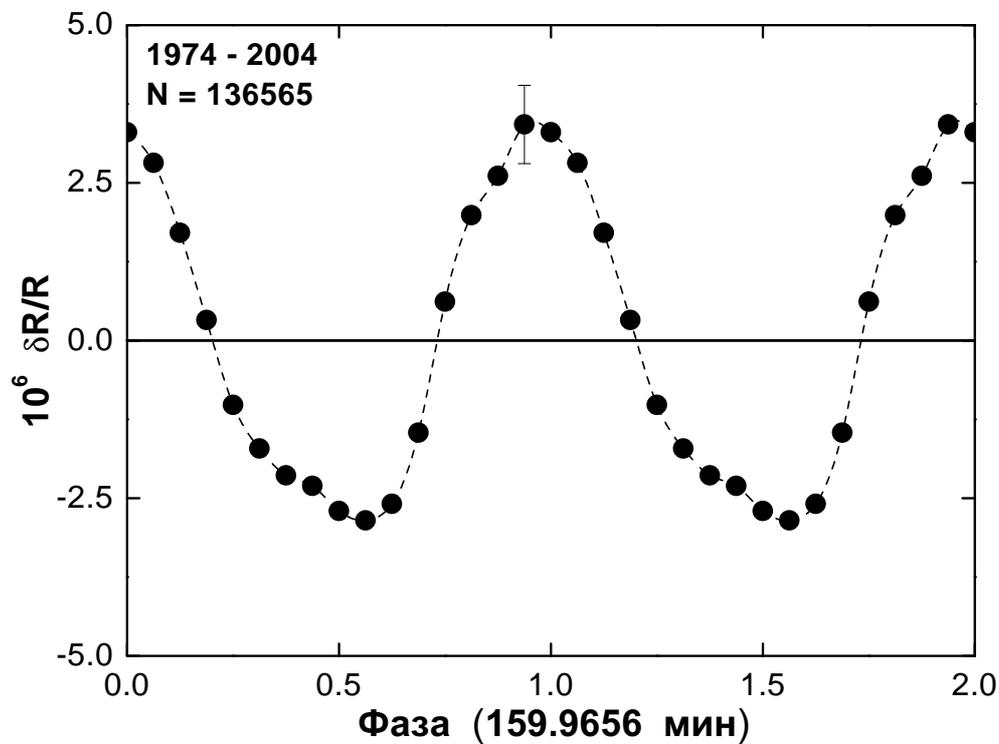


Рис. 4. Средняя кривая колебаний радиуса Солнца с периодом P_1 . По вертикали – относительная вариация радиуса $\delta R/R$; пунктиром показана сглаживающая сплайн-кривая

Затем для трёх циклов были построены средние кривые с периодом P_1 . Параметры трёх кривых приведены в табл. 1, где N — число измерений скорости V в данном массиве. Из таблицы видно, что кривые совпадают в пределах ошибок — по амплитуде и фазе. Для полноты здесь же приведены и параметры кривых за 1974 – 1996 гг. (циклы 21 – 22 объединены вместе, как единый временной ряд) и для всего 31-летнего массива.

Таблица 1. Параметры средних P_1 -кривых скорости V по циклам

Цикл	Годы	N	A , м/с	φ
21	1974–1986	60257	0.23 ± 0.03	0.68 ± 0.03
22	1987–1996	48314	0.27 ± 0.05	0.78 ± 0.04
23	1997–2004	27994	0.31 ± 0.07	0.72 ± 0.04
21–22	1974–1996	108571	0.23 ± 0.03	0.73 ± 0.02
21–22–23	1974–2004	136565	0.25 ± 0.03	0.73 ± 0.02

Важно отметить также, что кривые для циклов 21 и 22, не показанные здесь, получились практически синусоидальные, тогда как кривая цикла 23 резко отличается от синусоиды. Для подтверждения приводим рис. 5, где изображены средняя кривая циклов 21 – 22 (измерения рассматривались как единая временная последовательность 1974 – 1996 гг.) и кривая цикла 23, 1997 – 2004 гг.

Если для кривой циклов 21 – 22 отклонение от синусоиды статистически незначимо, то для кривой цикла 23 оно достоверно на уровне примерно 95%.

Ввиду peculiarного вида кривой скорости 23-го цикла (см. ниже, а также рис. 5б) интересно знать, изменялась ли средняя амплитуда колебания с номером цикла? Из табл. 1 видно, что есть некоторый прогрессивный рост гармонической амплитуды A со временем: от 0.23 м/с в цикле 21 до 0.31 м/с в цикле 23. Но статистически этот рост несущественный (между циклами 21 и 23, например, разность составляет всего лишь 0.08 ± 0.08 м/с).

Учитывая же негармоничность профиля пульсации, — особенно в цикле 23, — посмотрим на изменение “пиковых” амплитуд A_p в максимуме скорости, — см. рис. 5. И здесь возникает интригующая ситуация. А именно: если в среднем для циклов 21 и 22 “пиковая” амплитуда $A_p = 0.32 \pm 0.06$ м/с, то для цикла 23 амплитуда $A_p = 0.65 \pm 0.12$ м/с, т.е. практически вдвое больше (!); разность двух амплитуд $\Delta A_p = 0.33 \pm 0.13$ м/с. Увеличение пиковой амплитуды оказывается, таким образом, значимым на уровне примерно 2.5σ , т.е. 99%. Важно также подчеркнуть, что рост A_p в цикле 23 не может быть вызван, например, инструментом: все погрешности измерений, а также возможные ошибки, обусловленные обработкой данных, нормально распределены и входят чисто статистически в указанные выше погрешности. Потенциальные же эффекты изменения чувствительности инструмента, а также эффект деградации (например, поляризационных элементов), тоже исключаются: все измерения — фактически измерения поляризации света в спектрографе — дифференциальные и относительные, причём как измерения, так и калибровка делаются с одними и теми же оптическими и электронными элементами.

Примечательны кривые колебаний радиуса, приведенные на рис. 6. Кривая цикла 23 заметно отличается от синусоиды, будучи подобной кривым пульсаций цефеид. И асимметрия примерно такая же: отношение интервала сжатия к интервалу расширения примерно 1.6. Очевидно, что асимметрия кривых цикла 23 — скорости и радиуса — вносит основной вклад в асимметрию суммарных кривых за три цикла на рис. 3 и 4.

7 Аномалия цикла 23

Нами уже указывалось, что асимметричный и негармонический вид кривых P_1 -пульсации делает Солнце подобным пульсирующим звездам типа δ Щита и цефеидам (Котов и др., 2004). А это

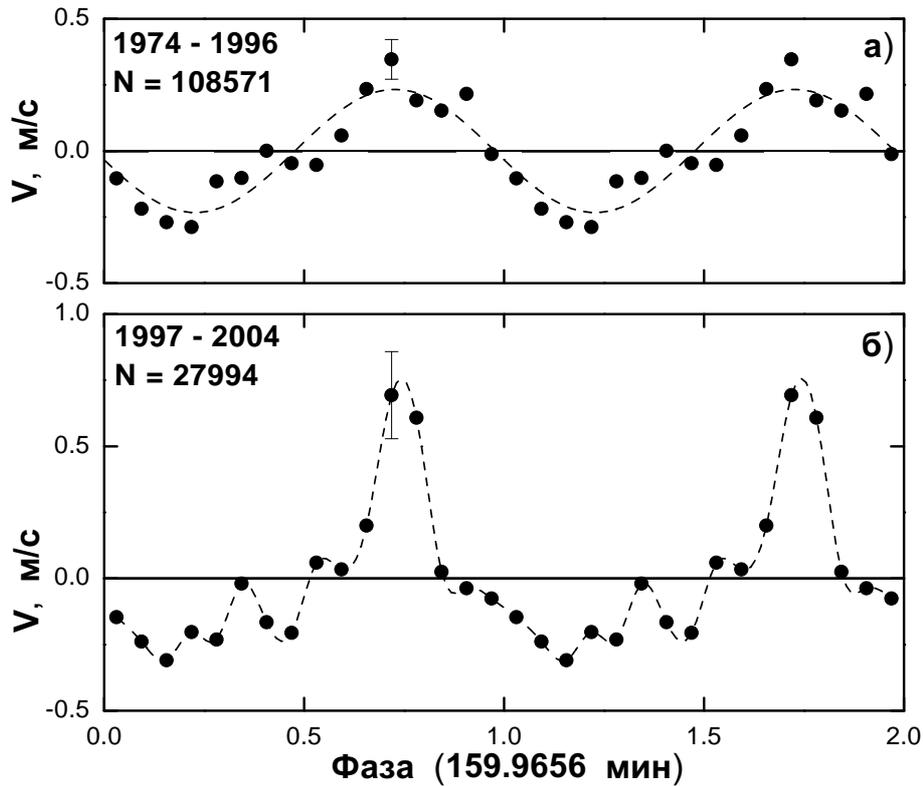


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для циклов 21–22 (а) и 23 (б). Пунктирные кривые: (а) синусоида, проведённая через точки МНК и (б) сплайн-функция

приводит к новой проблеме: ведь для звезды солнечной массы и при такой малой относительной амплитуде колебаний, $\sim 3 \times 10^{-6}$, все нелинейные эффекты пренебрежимо малы, и пульсация должна иметь гармонический профиль. Теория же не может указать на какой-либо нелинейный механизм возбуждения солнечных колебаний с нелинейным профилем, – будь то пульсации “цефеидного” типа или гравитационные g -моды в терминах современной гелиосейсмологии.

В этом аспекте особый интерес вызывают кривые 23-го цикла. И особенно интересна негармоническая, асимметричная кривая скорости с резким максимумом – почти до 0.70 м/с – на фазе 0.72 (см. рис. 5б). В этом смысле пульсации Солнца в текущем 23-м цикле заметно отличаются от пульсаций в предыдущих циклах, 21 и 22. Конечно, по измерениям в течение всего трёх циклов судить об изменении характера пульсаций со временем нужно весьма осторожно. Тем не менее наблюдаемые кривые – точнее, их различия на рис. 5 и 6, – наводят на некоторые размышления.

Дело в том, что и по другим «глобальным» индексам цикл 23 представляется аномальным по сравнению с предыдущими циклами. После 1996 г., в частности, существенно ускорилось экваториальное вращение Солнца, систематически определяемое в КраО по вариациям общего магнитного поля, ОМП, Солнца как звезды (Котов, 2005). Главный синодический период изменения ОМП в 23-м цикле составляет 26.61 ± 0.06 сут, что на 1.2% меньше, чем средний период ОМП в циклах 20, 21 и 22: 26.92 ± 0.02 сут. Причина ускорения неизвестна, но возможно, что оно обусловлено “глобальной перестройкой” Солнца, тесно связанной, возможно, с изменением динамики его центрального ядра.

Цикл 23 нарушает и знаменитое правило Гневешева и Оля (1948), согласно которому пятенная активность Солнца – числа Вольфа W – чётного цикла в максимуме меньше, чем активность нечётного цикла. В последней паре циклов, 22 – 23, наблюдается *обратное* соотношение чисел W . Последний раз столь резкое нарушение закономерности Гневешева-Оля имело место для циклов 4–

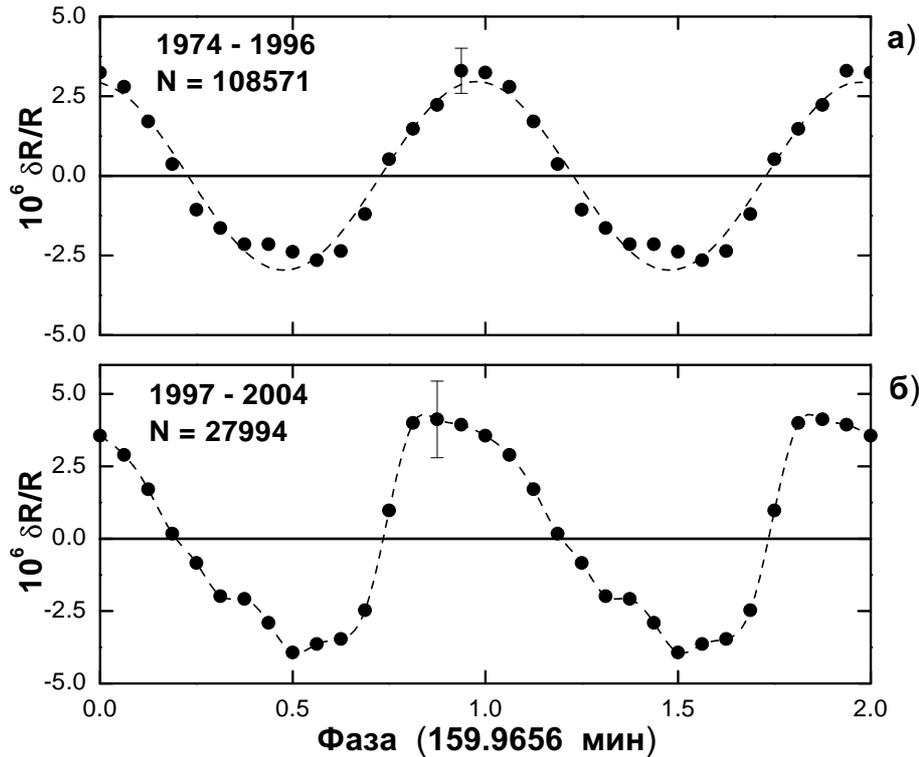


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для колебаний радиуса в циклах 21 – 22 (а) и 23 (б)

5, т.е. примерно 200 лет назад (если не считать еще одного, но весьма слабого, нарушения в циклах 8–9, т.е. в интервале 1834–1856 гг.). В настоящее время, по-видимому, мы встретились с очередной перестройкой векового хода солнечной активности (Рубашев, 1964; Витинский и др., 1986).

8 Заключение

Уже много лет колебания Солнца с периодом примерно 160 мин – предмет дискуссии (см., например, Савэн, 1946; Брукс и др., 1976; Северный и др., 1976; Шеррер, Уилкоккс, 1983; Котов и др., 2004).

Действительно, природа периодичности $P_1 \approx 159.966$ мин в доплеровских измерениях КрАО и Стэнфордского университета – до сих пор большая загадка. Вряд ли колебание принадлежит гравитационным g -модам: их спектр, согласно теории, должен быть очень богатым. К тому же никакие g -моды, предписываемые Солнцу гелиосейсмологией, пока не обнаружены (Ашпурчо и др., 2000). Гипотеза же о сверхбыстром вращении центрального ядра (Роксбург, 1974; Котов, 1996), – например, с периодом, близким к P_1 , – противоречит стандартной модели Солнца.

О возможной связи P_1 -пульсации с состоянием активности Солнца, включая магнитную, весомо говорит совпадение эпох пониженной амплитуды пульсации – примерно 1977 г., 1986 г. и 1997 г., – с минимумами 11-летнего цикла (Котов и др., 2000). Кривые пульсации – по измерениям скорости и вычислениям вариаций радиуса – подобны кривым звезд типа δ Щита, цефеид и звезд типа RR Лиг (Фролов, 1970а). Уместен поэтому вопрос: не отражает ли данное обстоятельство единство изначальных механизмов, или источников, пульсаций всех указанных типов звезд, включая Солнце? Заметим, что на это уже указывали многие исследователи переменных звезд. Тем более что для Солнца всякие нелинейные и неадиабатические эффекты – при столь малой амплитуде пульсаций, порядка 10^{-6} , – должны отсутствовать (Котов и др., 2004). С механизмом связан и вид – сугубо негармонический – профиля P_1 -колебания, особенно сильно выраженный в цикле 23.

Пульсация P_1 может сопровождаться вариациями светимости Солнца L . Если при этом считать, что изменения эффективной температуры фотосферы не столь существенны, как изменения радиуса, то для амплитуды относительных вариаций L получаем по порядку величины: $\delta L/L \approx 2 \times \delta R/R \sim 5 \times 10^{-6}$. Форма же кривой изменения L тогда аналогична форме кривых радиуса, приведенных на рис. 4 и 6. А это делает еще большим сходство между Солнцем и звездами типа δ Щита, RR Лут и цефеидами. Особенно хорошее сходство мы видим — по величине периода P и абсолютной светимости M_V — между Солнцем и карликовыми цефеидами (Фролов, 1970б). А именно: диапазон периодов цефеид 0.05 – 0.21 сут, для Солнца же $P \approx 0.11$ сут; абсолютные звездные величины карликовых цефеид сосредоточены в пределах от +4.9 до +2.3, а для Солнца $M_V = +4.83$.

Что касается аномалий 23-го цикла Солнца, проявившимися в ускоренном экваториальном вращении и нарушении правила Гневьшева-Оля, то они могут быть связаны с изменением динамики магнитного цикла Солнца в областях около дна конвективной зоны. Они и вызвали, наверное, существенный рост (“пиковый”) амплитуды P_1 -колебания в цикле 23, а также предполагаемую радикальную перестройку солнечной активности, наблюдаемую в настоящую эпоху. Такие перестройки — на временной шкале примерно 200 или более лет, как предполагали многие исследователи, — действительно, по-видимому, происходят время от времени в деятельности нашей звезды.

Периодическое колебание фотосферы с периодом $P_1 \approx 160$ мин, согласно нашему 31-летнему ряду доплеровских измерений, вполне реально и статистически обосновано. Но полное понимание природы явления не достигнуто. Остаётся открытым и ответ на вопрос, распадётся ли колебание P_1 с накоплением новых наблюдений. Дальнейшее исследование P_1 -пульсации и её связи с солнечной активностью может пролить новый свет на внутреннее строение Солнца и стать ключевым в познании его магнитного цикла.

Авторы считают своим долгом поблагодарить Н.П. Русака за техническое обеспечение работы телескопа БСТ-1 и солнечного магнитографа и участие в наблюдениях, а также Н.Г. Суницу за помощь в обработке наблюдательного материала.

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.
 Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. // *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца.* М.: Наука. 1986.
 Гневьшев М.Н., Оля А.И. // *Астрон. журн.* 1948. Т. 25. С. 18.
 Котов В.А. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 1996. Т. 39. С. 1210.
 Котов В.А. // *Письма в Астрон. журн.* 2005 (представлено для опубликования).
 Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1983. Т. 66. С. 3.
 Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Кинематика и физика небес. тел.* 2000. Т. 16. С. 49.
 Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Кинематика и физика небес. тел.* 2004 (в печати).
 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.
 Рубашев Б.М. // *Проблемы солнечной активности.* М.-Л.: Наука, 1964.
 Савэн (Sevin E.) // *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.
 Скаргл (Scargle J.D.) // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 835.
 Фролов М.С. // В кн. «Пульсирующие звезды» (под. ред. Б. В. Кукаркина). М.: Наука, 1970а. С. 240.
 Фролов М.С. // В кн. «Пульсирующие звезды» (под. ред. Б. В. Кукаркина). М.: Наука, 1970б. С. 263.
 Шеррер, Уилкоккс (Scherrer P.H., Wilcox J.M.) // *Solar Phys.* 1983. V. 82. P. 37.