

УДК 523.9

**Колебание Солнца с периодом 159.966 минут
в крымских наблюдениях за 25 лет****В. А. Котов, В. И. Ханейчук, Т. Т. Цап**Крымская астрофизическая обсерватория
98409, Крым, п. Научный

Измерения колебаний Солнца низкой степени проводятся в Крымской астрофизической обсерватории уже 25 лет (1974—1998 гг.; всего 1530 дней, около 9733 часов). Данные показали, что в области частот около 9-й гармоники суток наиболее значимое колебание соответствует периоду $P_1 = 159.9660 \pm 0.0010$ мин. Он согласуется с главной периодичностью $P_{St} = 159.9663 \pm 0.0014$ мин доплеровской скорости фотосферы Солнца, измеренной в 1977—1994 гг. в Стэнфордском университете. Начальная фаза колебания P_1 стабильна на протяжении всего 25-летнего интервала. Это явление не может быть приписано какой-либо земной причине или артефакту обработки наблюдательных данных. Оно представляет серьезную проблему для физики Солнца и моделей его внутреннего строения.

КОЛИВАННЯ СОНЦЯ З ПЕРІОДОМ 159.966 ХВИЛИН В КРИМСЬКИХ СПОСТЕРЕЖЕННЯХ ЗА 25 РОКІВ, Котов В. А., Ханейчук В. І., Цап Т. Т. — Вимірювання коливань Сонця низького степеня здійснюються в Кримській астрофізичній обсерваторії вже 25 років (1974—1998 рр.; всього 1530 днів, близько 9733 годин). Дані виявили, що в області частот біля 9-ї гармоніки доби найзначніше коливання відповідає періоду $P_1 = 159.9660 \pm 0.0010$ хв. Він узгоджується з головною періодичністю $P_{St} = 159.9663 \pm 0.0014$ хв доплерівської швидкості фотосфери Сонця, що вимірювались в 1977—1994 рр. в Стенфордському університеті. Початкова фаза коливань P_1 постійна протягом усього 25-річного інтервалу. Це явище не може бути приписано якій-небудь земній причині чи артефакту обробки спостережних даних. Воно є серйозною проблемою для фізики Сонця і моделей його внутрішньої будови.

OSCILLATIONS OF THE SUN WITH A PERIOD OF 159.966 MINUTES IN THE CRIMEAN 25-YEAR OBSERVATIONS, by Kotov V. A., Khaneychuk V. I., Tsap T. T. — Measurements of low-degree oscillations of the Sun were carried out at the Crimean Astrophysical Observatory during 25 years (1974—1998; in all 1530 days, about 9733 hours). These data showed that within the frequency range near the 9th daily harmonic the most significant oscillation corresponds to the period $P_1 = 159.9660 \pm 0.0010$ min. It agrees well with the main periodicity $P_{St} = 159.9663 \pm 0.0014$ min found earlier in the similar Doppler measurements of the solar photosphere performed at the Stanford

University in 1977—1994. The initial phase of the P_1 oscillation is found to be remarkably stable over the entire 25-year interval. This phenomenon cannot be ascribed to some terrestrial cause or to an artifact of the data reduction procedure. It presents a challenging problem for the physics of the Sun and models of its interior structure.

1. ВВЕДЕНИЕ

Поток оптического излучения Солнца изменяется на доли процента с периодом вращения около 27 сут и 11-летним циклом. Уверенно обнаруживаются 5-минутные колебания яркости и лучевой скорости фотосферы, обусловленные акустическими колебаниями конвективной зоны, но не получено убедительных свидетельств в пользу длиннопериодных колебаний — волн тяжести (гравитационных мод, или g -мод), предсказываемых теорией.

Более полувека тому назад Савэн [19] постулировал, что Солнце пульсирует с периодом $1/9$ сут. Десятилетия спустя эта пульсация, по-видимому, была зарегистрирована доплеровскими измерениями фотосферы, выполненными Бруксом и др. [3], Северным и др. [2, 18], Греком и др. [8], Шеррером и Уилкоксом [17].

Глобальные колебания фотосферы Солнца систематически измерялись в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) и Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (СОУ) Стэнфордского университета в течение последних 25 лет (см., например, [2, 10, 17, 18]). Для измерений временных флюктуаций лучевой скорости фотосферы в обеих обсерваториях применен дифференциальный метод, подробно описанный в [1, 17]. Наиболее точное значение периода, установленное по данным 1974—1982 гг. [10], равно

$$P_0 = 160.010 \pm 0.003 \text{ мин}, \quad (1)$$

что существенно отличается от 9-й гармоники суток.

Природа P_0 -периодичности неизвестна. Несколько возможностей обсуждалось в литературе, в частности (см. обзор [9]):

- а) период P_0 принадлежит одной из нормальных g -мод;
- б) периодические возмущения солнечной поверхности, индуцированные быстровращающимся центральным ядром (идея о ядре Солнца, вращающемся с периодом порядка часа, была выдвинута впервые Роксбургом [13] для объяснения дефицита потока нейтрино от Солнца);
- в) артефакт, вызванный влиянием земной атмосферы, инструментом и/или пропусками во временных рядах.

В настоящее время наличие P_0 -колебаний Солнца — предмет дискуссии (см., например, [4, 12]). Некоторые данные спутника SOHO показали наличие 160-минутной периодичности в вариациях солнечной иррадиации и лучевой скорости фотосферы, но эффект был приписан инструментальной причине [5—7] (см., однако, пп. 6 и 7).

Авторы [10, 16] сообщали, что после 1982 г. P_0 -колебание на Солнце исчезло или изменило период на новое значение $P_1 = 159.966$ мин — почти годичный сателлит периода P_0 . Здесь мы анализируем все 25-летние данные КрАО с целью пролить дополнительный свет на проблему возможных колебаний Солнца с периодом P_1 .

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ 1974—1998 гг.

Измерения колебаний фотосферы в КрАО выполняются дифференциальным методом [2, 9, 10, 18], при котором с помощью солнечного магнитографа Бэбкока регистрируется разность лучевой скорости между центральной

Таблица 1. Данные крымских наблюдений колебаний Солнца (N_D — число дней, L — суммарная длительность наблюдений, N — число измерений с 5-минутным усреднением, Δ — стандартное отклонение)

Год	N_D	L , ч	N	Δ , м/с	Год	N_D	L , ч	N	Δ , м/с
1974	14	76	912	5.11	1988	85	585	7018	6.04
1975	32	171	2048	4.31	1989	40	233	2800	5.83
1976	32	163	1955	4.28	1990	83	600	7203	7.61
1977	59	280	3362	5.62	1991	46	242	2903	8.69
1978	78	471	5651	4.28	1992	39	251	3016	7.85
1979	60	381	4566	5.50	1993	41	325	3905	8.48
1980	50	304	3653	5.94	1994	67	459	5508	8.12
1981	82	522	6264	5.77	1995	43	290	3485	7.17
1982	66	352	4219	5.93	1996	62	449	5392	6.53
1983	89	570	6841	6.87	1997	62	337	4043	6.35
1984	55	338	4059	3.96	1998	60	348	4178	4.41
1985	84	555	6661	4.77					
1986	117	839	10066	5.39	1974—	1530	9733	116792	6.16
1987	84	590	7084	5.39	1998				

круговой зоной диска Солнца диаметром $D = 0.66D_\odot$ и внешней кольцевой зоной; D_\odot — диаметр Солнца. Измерения делаются по фотосферной линии поглощения Fe I λ 512.4 нм, с фактором Ланде $g = 0$.

(В 1997—1998 гг. размер центральной зоны составлял $0.58D_\odot$. Чтобы свести все измерения в одну временную последовательность, значения скорости этих двух лет умножались на коэффициент 0.88, вычисленный для принятой процедуры калибровки. Другие поправки, зависящие от степени l , для данных этих двух лет не вводились. Для радиального колебания, например, дополнительный поправочный коэффициент равен примерно 1.06, т. е. близок к единице.)

Наблюдения почти не проводятся в зимнее время: подавляющее большинство измерений сделано в мае—октябре. Всего в 1974—1998 гг. наблюдения выполнены в течение 1530 дней, в сумме около 9733 ч. Значения скорости усреднялись за каждый 5-минутный интервал, а медленные дневные тренды удалялись с помощью парабол. Всего за 25 лет получено $N = 116792$ остатков «измерения минус тренд» со стандартным отклонением $\Delta = 6.16$ м/с (см. табл. 1). Знак «+» соответствует смещению спектральной линии центральной зоны видимой полусферы Солнца в синюю сторону. Приводимые неопределенности соответствуют примерно стандартной ошибке $\pm 1\sigma$. Нулевая фаза в статье соответствует моменту UT 00^h00^m 1 января 1974 г.

3. СПЕКТР МОЩНОСТИ

Спектры мощности (СМ) в априорно заданной области частот — вблизи 9-й суточной гармоники — вычислены посредством дискретного Фурье-преобразования (в действительности оно дает периодограмму, но, следуя Скарглю [14], мы называем ее спектром мощности). СМ в узком частотном диапазоне для 25-летнего временного ряда остатков показан на рис. 1, где доминирует, как и прежде [10, 16], период

$$P_1 = 159.9660 \pm 0.0010 \text{ мин.} \quad (2)$$

Приведем аргументы в пользу его реальности.

1. Гармоническая амплитуда пика $A_p \approx 0.25$ м/с. Отсюда находим, что его формальная статистическая значимость, определенная с учетом экспоненциального распределения пиков в СМ [14], составляет $p > 8\sigma$.

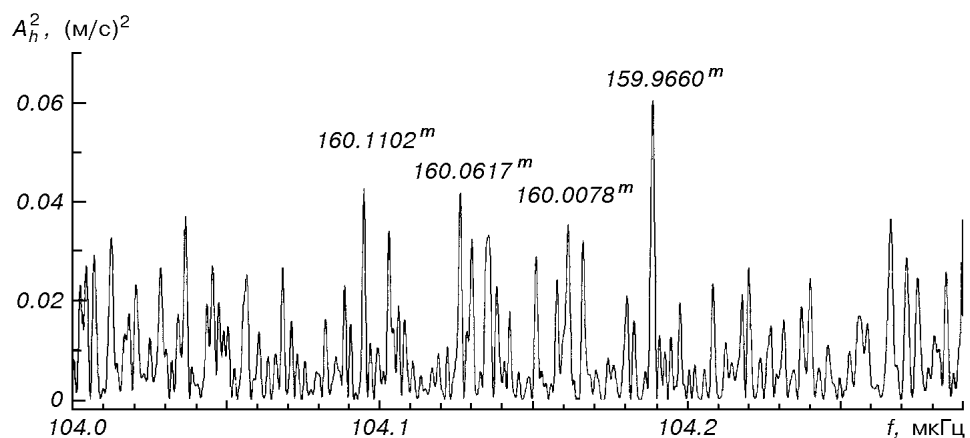
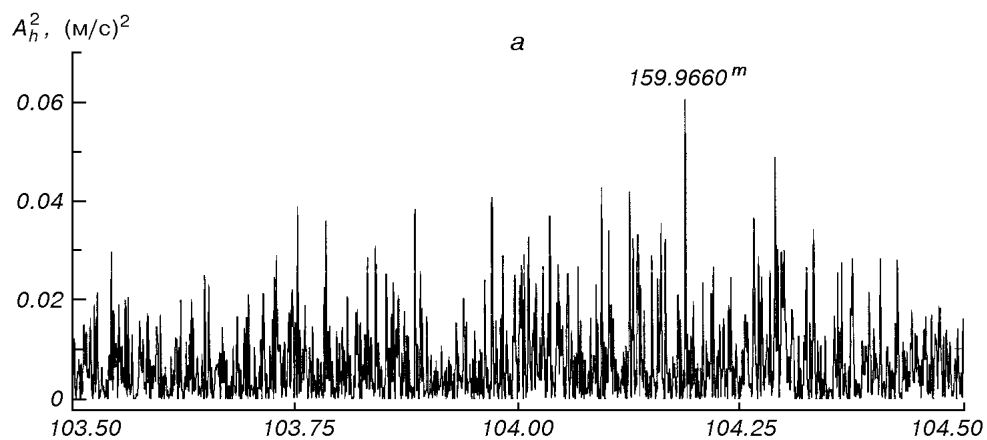
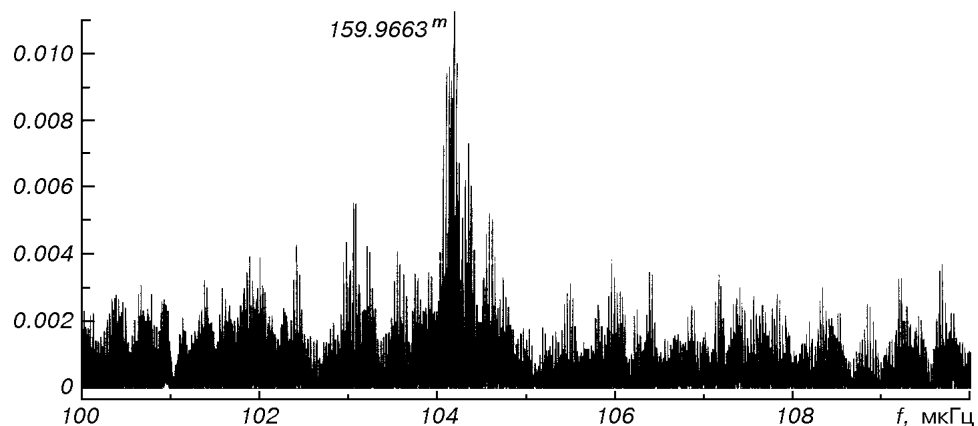


Рис. 1. Спектр мощности колебаний Солнца около 9-й гармоники суток, вычисленный по данным КраО за 1974—1998 гг. Число измерений лучевой скорости $N = 116792$



а



б

Рис. 2. а — То же, что на рис. 1, для более широкого диапазона частот (данные КраО 1974—1998 гг.). Главный пик: $P_1 = 159.9660 \pm 0.0010$ мин; б — то же для данных СОУ за 1977—1994 гг. [10]. Главный пик: 159.9663 ± 0.0014 мин

2. Колебание P_1 регистрировалось в течение первых 9 лет наблюдений КраО и СОУ, см. [10, 17]. Его следует поэтому считать априорным, что повышает достоверность (по данным КраО и СОУ за 1974—1982 гг. период тогда был равен $P = 159.964 \pm 0.003$ мин, и в пределах ошибки совпадал с годичным спутником колебания $P_0 = 160.010 \pm 0.003$ мин; последнее доми-

нировало в СМ колебаний Солнца с 1974 г. по 1982 г.).

3. Расстояния между главным пиком P_1 на рис. 1 и двумя наиболее высокими пиками слева, $P = 160.062$ мин и 160.110 мин, соответствуют в пределах ошибок периодам (модуляции или скважности) $1/2$ г. и $1/3$ г. Это также говорит в пользу реальности главного пика P_1 .

4. Период P_1 данных КрАО согласуется с периодом $P_{St} = 159.9663 \pm \pm 0.0014$ мин, доминирующим в спектре аналогичных измерений СОУ [10, 16] — см. рис. 2, где приведены спектры обеих обсерваторий, вычисленные для более широких, чем на рис. 1, частотных диапазонов. Число независимых частот в СМ на рис. 2, a составляет примерно 10^3 , поэтому вероятность случайного совпадения P_1 и P_{St} достаточно мала ($\approx 10^{-3}$).

Прежний период P_0 , доминировавший в данных КрАО и СОУ за 1974—1982 гг. [10, 17], в СМ полного 25-летнего ряда отсутствует.

4. ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ

Поведение фазы легко проследить с помощью диаграммы «О—С», которые принято строить для переменных звезд.

Для каждого года вычислены амплитуды A_n и фазы φ гармонического максимума пробного периода свертки $1/9$ сут, т. е. 160.0000 мин. По фазам φ определялись моменты УТ максимума, отстоящие друг от друга на 160 мин в течение суток; они показаны на рис. 3, a в виде точек (отсутствует фаза 1984 г., когда средняя P_0 -кривая оказалась незначимой). Видно, что первые 9 лет, с 1974 г. по 1982 г., фазы φ изменялись практически по прямой линии, наклон которой соответствовал фактическому периоду $P_0 \approx 160.010 \pm 0.003$ мин. Затем такое поведение нарушилось, и фазы изменялись хаотически, или, скорее, их ход был более или менее горизонтальным. А это соответствует периодичности около 160.000 мин —

Рис. 3. a — Фазовая диаграмма, построенная для пробного периода 160.0000 мин по крымским данным 1974—1998 гг. Вертикальной чертой указана типичная ошибка фазы φ . Штриховые линии — прямые линейной регрессии для первых 9 лет наблюдений; их наклон соответствует периоду колебаний Солнца $P_0 = 160.010$ мин в течение 1974—1982 гг. b — То же для пробного периода $P'_1 = 159.9600$ мин. По вертикали — фаза φ максимума скорости (от 0 до 1, с повторением от 1 до 2 и далее от 2 до 3). Наклон штриховых прямых линейной регрессии отвечает периоду 159.966 мин

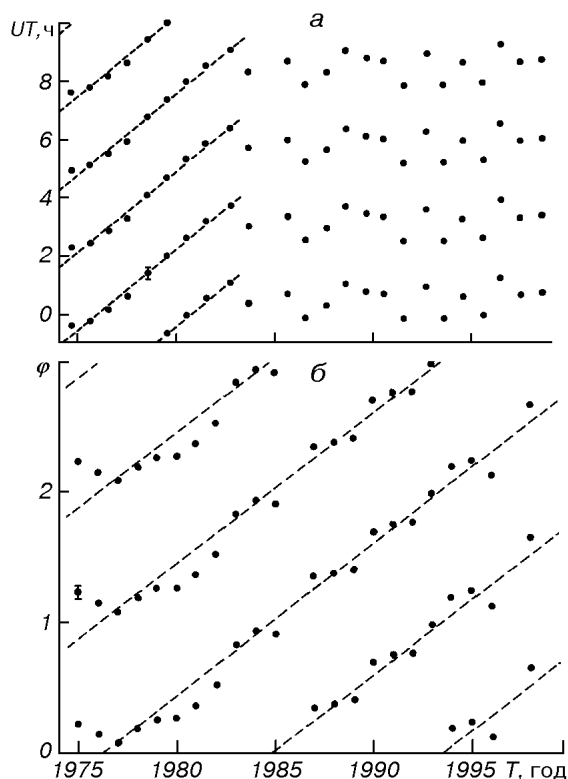


Таблица 2. Амплитуды A_n и фазы φ колебания периода 159.9600 мин

Интервал, гг.	N	Δ , м/с	A_n , м/с	φ
1974—1975	2960	4.57	0.82 ± 0.21	0.23 ± 0.04
1975—1976	4003	4.30	0.54 ± 0.12	0.15 ± 0.04
1976—1977	5317	5.17	0.36 ± 0.11	0.07 ± 0.05
1977—1978	9013	4.82	0.31 ± 0.09	0.18 ± 0.05
1978—1979	10217	4.86	0.37 ± 0.12	0.25 ± 0.05
1979—1980	8219	5.70	0.48 ± 0.13	0.26 ± 0.05
1980—1981	9917	5.83	0.41 ± 0.08	0.35 ± 0.03
1981—1982	10483	5.83	0.40 ± 0.06	0.51 ± 0.03
1982—1983	11060	6.53	0.35 ± 0.06	0.83 ± 0.03
1983—1984	10900	5.96	0.41 ± 0.08	0.93 ± 0.03
1984—1985	10720	4.48	0.10 ± 0.07	0.90 ± 0.10
1985—1986	16727	5.15	0.01 ± 0.05	—
1986—1987	17150	5.39	0.17 ± 0.08	0.34 ± 0.07
1987—1988	14102	5.72	0.22 ± 0.09	0.37 ± 0.07
1988—1989	9818	5.98	0.21 ± 0.08	0.40 ± 0.06
1989—1990	10003	7.16	0.27 ± 0.13	0.69 ± 0.08
1990—1991	10106	7.94	0.37 ± 0.17	0.75 ± 0.08
1991—1992	5919	8.28	0.23 ± 0.12	0.75 ± 0.08
1992—1993	6921	8.21	0.25 ± 0.15	0.97 ± 0.10
1993—1994	9413	8.28	0.56 ± 0.09	0.18 ± 0.03
1994—1995	8993	7.77	0.69 ± 0.13	0.23 ± 0.03
1995—1996	8877	6.79	0.35 ± 0.13	0.12 ± 0.06
1996—1997	9435	6.45	0.09 ± 0.11	—
1997—1998	8221	5.45	0.20 ± 0.09	0.65 ± 0.07

суточному артефакту измерений, обусловленному атмосферой и/или инструментом. На рис. 1 ему отвечает заметный пик на частоте 104.167 мкГц ($P = 160.000$ мин). Поскольку большинство измерений сделано после 1982 г., колебание P_0 практически отсутствует в СМ всего 25-летнего ряда.

Аналогичную фазовую диаграмму интересно получить для периода P_1 . С этой целью для каждого двухлетнего интервала определены амплитуды A_n и фазы φ пробного периода 159.9600 мин, приведенные в табл. 2. Только для двух интервалов, 1985—1986 гг. и 1996—1997 гг., средние кривые оказались незначимыми (т. е. со средней амплитудой, не превышающей ошибку). Остальные фазы показаны точками на рис. 3, б. Через них проведены прямые линейной регрессии, наклон которых указывает на фактическую периодичность 159.966 мин — самую значимую на рис. 1 и 2. Отсюда делаем вывод, что начальная фаза P_1 -колебания оставалась практически стабильной на протяжении всех 25 лет наблюдений (в отличие от колебания P_0 , см. рис. 3, а).

Можно было бы думать, что P_1 -периодичность — результат влияния земной атмосферы. Но ранее было доказано [1], что ни амплитуда, ни устойчивое поведение фазы 160-минутного колебания в дифференциальных измерениях не могут быть приписаны влиянию атмосферы или методу обработки наблюдательных данных.

Еще более важная проверка сделана в [16]. Авторы предположили, что в силу близости P_0 к 9-й суточной гармонике наблюдаемый периодический сигнал возникает из-за атмосферных и/или инструментальных помех, которые более или менее сохраняют фазу изо дня в день. Тогда следует ожидать существенную амплитуду сигнала на суточных гармониках, когерентных по фазе в течение года или нескольких лет. Регистрируемый когерентный сигнал не должен зависеть от порядка следования дней, в которые производились измерения. Перемешав дни наблюдений 1974—

1991 гг. случайным образом, авторы [16] убедились, что периодичность $P_1'' = 159.967$ мин исчезла (в пределах ошибки $P_1'' = P_1$). Отсюда сделан вывод, что колебание P_1'' сохраняло фазу в течение всего интервала наблюдений, и его нельзя приписать «суточному эффекту», обусловленному атмосферой, инструментом или методом обработки наблюдательных данных.

5. СРЕДНЯЯ КРИВАЯ P_1 -КОЛЕБАНИЯ

На рис. 4 показаны две средние кривые колебания с периодом P_1 , построенные для измерений КрАО (1974—1998 гг.) и СОУ (1977—1994 гг.). Параметры соответствующих гармонических кривых, полученных методом наименьших квадратов, приведены в табл. 3.

Видим, что крымская амплитуда примерно в 2.5 раза больше, чем амплитуда в калифорнийских данных. Это можно приписать различию геометрии пучков, т. е. зон на диске Солнца в дифференциальном методе измерений скорости, а также в определенной степени — неточностям калибровки. А если учесть, что между измерениями КрАО и СОУ существует постоянное (по-видимому, инструментального происхождения) расхождение на фактор около 1.5 [11], то действительное отношение амплитуд будет составлять всего лишь около 1.7.

Рис. 4. Средние кривые колебания фотосферы Солнца, полученные с периодом $P_1 = 159.9660$ мин: (а) — данные КрАО 1974—1998 гг., $N = 116792$; (б) — данные СОУ, 1977—1994 гг., $N = 60003$. Значения скорости усреднены в каждом интервале шириной $P_1/16$ (точки); штриховые линии — синусоиды, проведенные через точки методом наименьших квадратов; вертикальными чертами показаны типичные ошибки средних значений скорости

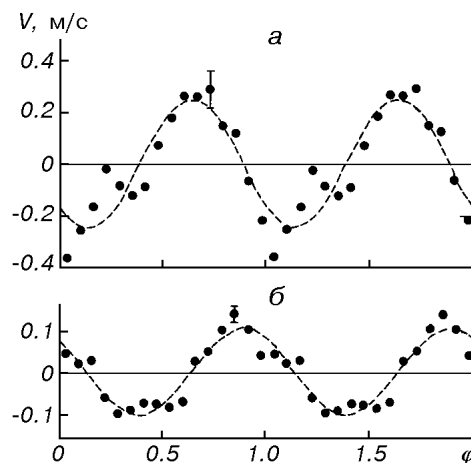


Таблица 3. Параметры двух P_1 -кривых колебаний Солнца

Обсерватория	Интервал	L, ч	N	Δ , м/с	A_H , м/с	φ
КрАО	1974—1998 гг.	9733	116792	6.2	0.25 ± 0.04	0.63 ± 0.02
СОУ	1977—1994 гг.	5000	60003	1.3	0.10 ± 0.02	0.88 ± 0.02

Имеется расхождение в фазе колебания между КрАО и СОУ на 0.25 (табл. 3 и рис. 4). Его также можно отнести на счет различия геометрии зон, применяемых для двух инструментов. Различие геометрий должно приводить к разной чувствительности инструментов к модам разной степени l , и следовательно, — к фазовому сдвигу между инструментами. (Заметим, что эффективные глубины образования излучения в солнечной атмосфере также могут быть существенно разными для «гелиосейсмографов» КрАО и

СОУ, что может вызвать дополнительный сдвиг фаз между P_1 -кривыми. Определенную роль может играть и систематическое различие дневных трендов сигнала скорости, регистрируемого двумя инструментами: фильтрация трендов также может привести к существенному, повторяющемуся ото дня ко дню, расхождению по фазе средних кривых. В будущем мы планируем рассмотреть влияние разных эффектов на фазу и определить возможный фазовый сдвиг количественно).

6. О НЕКОТОРЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СПУТНИКА SOHO

Одной из главных целей некоторых приборов спутника SOHO (см., например, [15]), запущенного в точку Лагранжа в конце 1995 г., была регистрация глобальных колебаний Солнца, в частности долгопериодных g -мод. Приведем некоторые результаты.

1. Прибор РМО6-V измерял флюктуации солнечной иррадиации [5]. В СМ этих данных самый сильный пик соответствует периоду 160 мин (частота 104 мкГц). Авторы [5], однако, посчитали, что это — инструментальный артефакт, вызванный «биениями» на борту спутника с частотой $\nu_s = 52$ мкГц и ее гармониками.

2. Наличие значимых частот, кратных 104 мкГц, в частности периодов 160 и 80 мин, показали и некоторые измерения, выполненные прибором SOI/MDI [15] (см. ниже).

3. Анализ данных прибора SOI/MDI (скорость фотосферы), выполненный Фрелихом и др. [7] для $l = 1$, $m = 1$, не показал сколько-нибудь значимых длиннопериодных колебаний. Но ранее уже утверждалось [1], что 160-минутное колебание — не дипольного типа (т. е. $l \neq 1$).

4. В т. н. «коллапсированном» СМ данных SOI/MDI [7] значимые пики отвечают периодам 80 и 53 мин, — кратным периоду 160 мин (а для периодов $P > 83$ мин, т. е. для $P \approx 160$ мин, спектр в [7] вообще не приведен).

5. В СМ данных наблюдений гелиосейсмологической сети BiSON [7] один из самых мощных пиков отвечает периоду 160 мин. Амплитуда колебания примерно 3 см/с, что неплохо согласуется с дифференциальной амплитудой $K_{\text{pAO}}-\text{COU}$, если учесть неопределенности калибровки и следующие обстоятельства:

- данные BiSON получены по линиям натрия и относятся к более верхним слоям фотосферы (чем дифференциальные измерения $K_{\text{pAO}}-\text{COU}$), где амплитуда длиннопериодных колебаний может уменьшаться;
- измерения BiSON не дифференциальные и проводятся в свете от всего солнечного диска, что также уменьшает измеряемую амплитуду (см. также [1, 12]).

То же касается анализа данных SOHO/GOLF (Палле и др. [12]), относящихся к синим крыльям линий натрия $D1$ и $D2$ и имеющих, по-видимому, существенную неопределенность калибровки. Не все ясно и с обработкой этих измерений, в частности с процедурой фильтрации низкочастотных шумов и инструментальных артефактов. (Неисправность прибора GOLF привела к тому, что вместо лучевой скорости измерялись монохроматические интенсивности в синих крыльях линий натрия. При нормальных же измерениях лучевой скорости регистрируется разность интенсивностей светового потока в красном и синем крыле спектральной линии).

Периодичность 160 мин и кратных гармоник в некоторых оригинальных данных SOHO приписывается инструментальным биениям (см. ссылки выше). Но из опубликованных работ и личных дискуссий с авторами указанных работ не ясно — биений чего с чем?

В случае MDI считается, что на борту SOHO возникали биения между

главным импульсом телеметрии, с периодом (бортовых часов) $P_S = 14.988281$ с, и 15-секундным тактом MDI. Соответствующий период биений

$$P_B = \frac{15P_S}{15 - P_S} = 319.743 \text{ мин.} \quad (3)$$

Но дополнительно авторам «инструментальной гипотезы» пришлось постулировать, что: а) заметные периодические сигналы могут возникать на обертонах частоты биений $\nu_B = P_B^{-1} = 52.125$ мкГц, и б) нестабильности электроники и/или телеметрии приводили к флуктуациям длительности открытого состояния затвора.

Наконец, совсем непонятно, почему прибор РМО6-V показал 160-минутную периодичность (иррадиации), тогда как при времени интегрирования 10 с ожидаемый период биений $(10P_S)/(P_S - 10) = 0.5$ мин, что далеко от периода 320 мин прибора MDI. Более того, флуктуации длительности состояний затвора — случайные, что не может привести к появлению *периодического* компонента с постоянной фазой и частотой.

Все эти обстоятельства позволяют заключить, что инструментальное истолкование 160-минутного сигнала (и гармоник) спутника SOHO не является убедительным.

7. ДАННЫЕ ПРИБОРА SOHO/MDI: ФЛЮКТУАЦИИ ГЛУБИНЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ

Нами рассмотрен временной ряд $I_D(t)$ измерений глубины спектральной линии поглощения, полученный прибором SOHO/MDI [15].

Главная часть прибора — система оптических фильтров и два интерферометра Майкельсона с полосой пропускания 9.4 пм. Измеряются световые потоки в пяти фиксированных положениях полосы пропускания, соответствующих линии поглощения Ni I λ 676.8 нм. Сигнал глубины линии определяется алгоритмом

$$I_D = k[(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2]^{1/2}, \quad (4)$$

где k — инструментальная константа, I_1, I_2, I_3, I_4 — световые потоки в четырех окнах внутри спектральной линии. Перед обработкой значения I_D были сглажены гауссовским фильтром шириной 23 мин. Ряд сглаженных значений представляет собой $I_D(t)$ -последовательность с 12-мин временным шагом (А. Г. Косовичев и Ф. Шеррер: частное сообщение, 1996 г.). Заметим, что алгоритм (4) предполагает, что колебание Солнца с периодом P может проявляться в этих данных как вариации с периодом P и/или $P/2$, а также с более высокими гармониками. (Подробное изложение анализа и результатов готовится к печати отдельно).

Рассмотренные наблюдения выполнены в свете от всего диска Солнца в течение 57 сут 1996 г., с 1 мая по 26 июня. После фильтрации медленных трендов временной ряд содержит 6238 остатков со стандартным отклонением $\Delta = 0.863$ (в относительных I_D -единицах). Соответствующий СМ показан на рис. 5, где максимальный пик отвечает периоду $P_{MDI} = 79.94 \pm 0.04$ мин. Двойной период, $2P_{MDI} = 159.88 \pm 0.16$ мин, в пределах ошибки согласуется с *обоими* периодами, $P_0 = 160.010$ мин и $P_1 = 159.966$ мин, известными из наземных измерений как периоды глобальных колебаний Солнца.

Важным является и 27-суточная вариация амплитуды колебания P_{MDI} , зарегистрированного прибором SOHO/MDI (сигнал I_D), и ее значимая корреляция с изменением среднего магнитного поля H Солнца, см. рис. 6. Коэффициент корреляции между двумя кривыми $r \approx 0.6$; период вариации амплитуды колебаний ΔA_h на рис. 6, a равен 27 ± 5 сут. Это свидетельствует

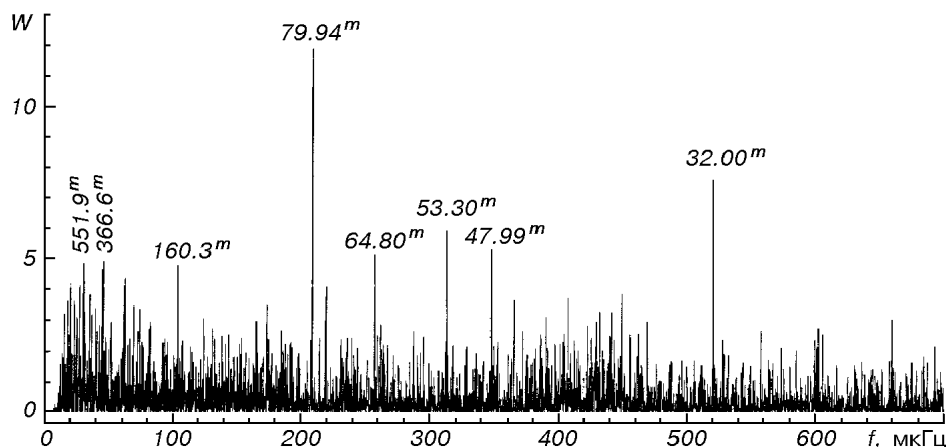


Рис. 5. Спектр мощности W (в произвольных единицах) флюктуаций глубины спектральной линии поглощения фотосферы ($\text{Ni I } \lambda 676.8 \text{ нм}$) по данным SOHO/MDI (1 мая — 26 июня 1996 г., число измерений $N = 6238$)

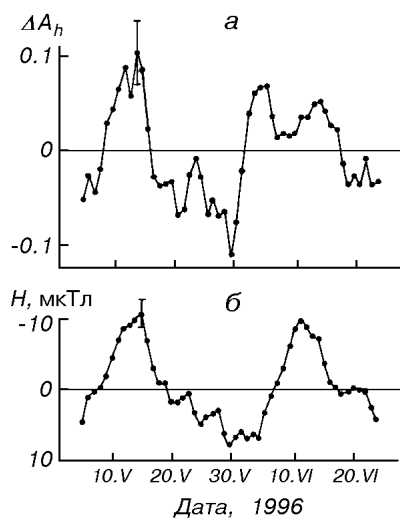


Рис. 6. *а* — 27-суточная вариация ΔA_h гармонической амплитуды колебания глубины линии (с периодом P_{MDI}), зарегистрированного прибором SOHO/MDI; *б* — изменения среднего магнитного поля H Солнца как звезды (знак «—» соответствует S-полярности магнитного поля). Точки — скользящие средние за 7 сут; амплитуда A_h и ее вариация ΔA_h выражены в относительных единицах сигнала I_D . Вертикальными чертами указаны типичные ошибки 7-сут значений

в пользу солнечного происхождения как наблюдаемой периодичности P_{MDI} , так и предполагаемой основной периодичности $2P_{\text{MDI}} \approx 159.88 \pm 0.16 \text{ мин.}$

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природа колебания $P_1 = 159.966 \text{ мин}$ в данных измерений КрАО и СОУ (лучевой скорости фотосферы), как и прежнего колебания $P_0 = 160.010 \text{ мин}$, остается загадкой. Интерес к этому явлению подогревается странным обстоятельством, что колебания Солнца с периодом $1/9 \text{ сут}$, т. е. примерно 160 мин, были предсказаны более полувека тому назад Савэнном [19].

Поразительно, что начальная фаза колебания P_1 сохранялась на протяжении всех 25 лет наблюдений в Крыму. Происхождение этого колебания непонятно. (Идея о возможном сверхбыстром, с периодом порядка часа, вращении центрального ядра, выдвинутая в свое время Роксбургом [13] для объяснения дефицита солнечных нейтрино, противоречит стандартной модели Солнца).

Не поддается объяснению и изменение частоты колебания от P_0^{-1} к P_1^{-1} , произошедшее за 10 лет, поскольку теоретическое время жизни

обычных g -мод составляет 10^4 — 10^6 лет. Для ответа на эти вопросы необходимо продолжение дифференциальных измерений колебаний фотосферы и, конечно, тщательный анализ наблюдений спутника SOHO и мировых гелиосейсмологических сетей, в частности данных сетей GONG и BiSON.

Авторы признательны А. Г. Косовичеву и Ф. Шерреру за предоставление данных прибора SOHO/MDI для анализа, обсуждение результатов и плодотворные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке ГФФИ Украины (грант № Ф 4/174—97).

1. Котов В. А., Северный А. Б., Цан Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца: II. Результаты наблюдений в 1974—1980 гг., их анализ и некоторые выводы // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—66.—С. 3—71.
2. Северный А. Б., Котов В. А., Цан Т. Т. Колебания Солнца и проблема его внутреннего строения // Астрон. журн.—1979.—56, вып. 6.—С. 1137—1148.
3. Brookes J. R., Isaak G. R., van der Raay H. B. Observation of free oscillations of the Sun // Nature.—1976.—259, N 5539.—P. 92—95.
4. Elsworth Y. P., Jefferies S. M., McLeod C. P., et al. The 160 minute solar oscillation: an artifact? // Astrophys. J.—1989.—338, N 1.—P. 557—562.
5. Finsterle W., Frühlich C. Low frequency oscillations: the story of P1 // World Radiation Center. Annual Rep. 1997. — Davos: PMOD/WRC, 1998.—P. 9—10.
6. Finsterle W., Frühlich C. Reduction of noise in the total solar irradiance // 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, 1998.—Vol. 1.—P. 167—170.—(ESA SP—418).
7. Frühlich C., Finsterle W., Andersen B., et al. Observational upper limits for low-degree solar g modes // 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, 1998.—Vol. 1.—P. 67—71.—(ESA SP—418).
8. Grec G., Fossat E., Pomerantz M. Solar oscillations: full disk observations from the geographic South Pole // Nature.—1980.—288, N 5791.—P. 541—544.
9. Kotov V. A. The 160 minutes oscillations // Solar Phys.—1985.—100, N 1-2.—P. 101—113.
10. Kotov V. A., Haneychuk V. I., Tsap T. T., Hoeksema J. T. The splitting or disappearance of the solar 160-min mode? // Solar Phys.—1997.—176, N 1.—P. 45—57.
11. Kotov V. A., Scherrer P. H., Howard R. F., Haneychuk V. I. Magnetic field of the Sun as a star: the Mount Wilson Observatory catalog 1970—1982 // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1998.—116, N 1.—P. 103—117.
12. Pallé P. L., Roca Cortés T., Gelly B., et al. On the presence of the solar 160-min signal in GOLF data / 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, 1998.—Vol. 1.—P. 291—294.—(ESA SP—418).
13. Roxburgh I. W. Internal rotation of the Sun and the solar neutrino flux // Nature.—1974.—248, N 5445.—P. 209—211.
14. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. J.—1982.—263, N 2.—P. 835—853.
15. Scherrer P. H., Bogart R. S., Bush R. I., et al. The solar oscillations investigation — Michelson Doppler Imager // Solar Phys.—1995.—162, N 2.—P. 129—188.
16. Scherrer P. H., Hoeksema J. T., Kotov V. A. On the upper limit for detecting g -mode oscillations of the Sun // Publ. Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. —1993.—42.—P. 281—284.
17. Scherrer P. H., Wilcox J. M. Structure of the solar oscillation with period near 160 minutes // Solar Phys.—1983.—82, N 1—2.—P. 37—42.
18. Severny A. B., Kotov V. A., Tsap T. T. Observations of solar pulsations // Nature.—1976.—259, N 5539.—P. 87—89.
19. Sevin É. Sur la structure du système solaire. (Prévision d'une nouvelle planète) // Compt. Rend. Acad. Sci. Paris.—1946.—222.—P. 220—221.

Поступила в редакцию 04.10.99