

УДК 523.9

Пульсации Солнца: сопоставление данных Бирмингема и Крыма

B.A. Котов

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
vkotov@craocriemea.ru

Поступила в редакцию 16 апреля 2025 г.

Аннотация. Согласно измерениям лучевой скорости фотосферы Солнца, выполненным в Крыму и Стэнфорде в 1974–1982 гг., Солнце тогда пульсировало с периодом $P_0 = 9600.6$ с. Однако по данным Бирмингемского университета, эти пульсации не обнаруживались в 1980–1985 гг.: в спектре мощности лучевой скорости Солнца присутствовал только “земной” артефакт – девятая суточная гармоника 9600.0 с. Нами показано, что в те годы и в данных КрАО в среднем отсутствовал сигнал P_0 , что объясняется переменностью амплитуды колебания. Явление похоже на пульсации звезд типа δ Sct: у некоторых из них периодичность также наступает спорадически, иногда полностью исчезая. Природа P_0 -пульсаций Солнца, как и малоамплитудной звезды типа δ Sct, неизвестна.

Ключевые слова: Солнце, пульсации, гелиосеймология, звезды типа δ Sct

1 Введение

Более полувека назад у Солнца было обнаружено новое, неизвестной природы явление – глобальное колебание его фотосферы с периодом $P_0 \approx 1/9$ сут и средней амплитудой около 0.5 м/с (Brookes et al., 1976; Severny et al., 1976). Оно было подтверждено независимыми наблюдениями Grec et al. (1980) на южном полюсе Земли, Scherrer, Wilcox (1983) в Стэнфорде и Palle, Roca Cortes (1988) в Испании.

Поразительно, что это колебание было предсказано французским астрономом-любителем Э. Савэ задолго до фактического обнаружения у Солнца: “... период собственной вибрации Солнца, его так называемый инфра-звук (1/9 суток), играет существенную роль в распределении внешних планет” (Sevin, 1946). Целесообразно привести здесь и размытие Д. Гофа о совпадении периода глобальных солнечных колебаний с девятой гармоникой суток: “Итак, явление земное или солнечное? И если оно солнечное, то разве не интересно, что земной день кратен этому периоду? Это приводит меня к финальной мысли: если периоды вращения всех планет выражить в единицах 160 минут, то они по общему признанию не все целые, но они будут ближе к целым числам, чем следует ожидать для случайной выборки” (Gough, 1983).

Гелиосеймология и теория внутреннего строения Солнца и звезд пока бессильны объяснить P_0 -колебания Солнца (подробнее см., например, Christensen-Dalsgaard, Gough, 1976; Christensen-Dalsgaard et al., 1985; Cox, 1980; Kotov, 1985; Kotov, Haneychuk, 2020, и ссылки там). Наиболее точное значение периода, $P_0 = 9600.606(12)$ с, определили Котов, Левицкий (1987) по начальным моментам хромосферных вспышек, наблюдавшихся на Солнце с 1947 по 1980 г. (использованы данные мировой сети обсерваторий, свободные от влияния земной атмосферы; неопределенность в скобках – аппроксимация стандартной ошибки).

Из-за близости временной шкалы P_0 к девятой гармонике среднесолнечных суток, $P_9 = 9600.000$ с, оппоненты поспешили приписать P_0 -колебания артефактам измерений, специфике обработки наблюдательных данных и особенно – влиянию земной атмосферы (см., например, Grec, Fossat, 1979; Delache, 1981; Elsworth et al., 1989; Fossat et al., 2017; Efremov et al., 2018). Достоверно ли утверждение о P_0 -колебаниях Солнца, какова их причина? Всегда ли они наблюдаются у нашей звезды?

2 Девятая гармоника суток?

Атмосферный эффект тщательно исследовался, и было показано, что сигнал P_0 , наблюдавшийся в колебаниях лучевой скорости фотосфера, имел солнечную природу и не мог быть вызван влиянием земной атмосферы (Koutchmy et al., 1980; Severny et al., 1980; Котов, 2023). Подчеркнем также, что по наблюдениям КрАО и Стенфорда значение P_0 отличается от 1/9 сут на 9σ (Scherer, Wilcox, 1983), а по 45-летним измерениям в КрАО разность $P_0 - P_9$ имеет еще большую значимость (см. Котов, Ханейчук, 2023). Дополнительным свидетельством солнечной природы шкалы P_0 явились измерения эффекта Доплера по теллурической спектральной линии, выполненные в КрАО одновременно с измерениями по фотосферной линии поглощения; было тщательно рассмотрено и влияние атмосферной экстинкции, инструментальных факторов и скважности наблюдений (см. Котов и др., 1983).

Выход о P_0 -колебаниях Солнца, обоснованный многолетними наблюдениями в КрАО, не затрагивает результаты других авторов. Подчеркнем также, что эксперимент в Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (Стэнфордский университет), наиболее близкий к крымским измерениям по конструкции инструмента и методу измерений лучевой скорости, привел к результатам, идентичным крымским (см. Scherrer et al., 1979, 1980; Scherrer, Wilcox, 1983; Котов et al., 1997). Следы P_0 -периодичности были обнаружены и в некоторых данных прибора MDI на спутнике SOHO (Котов, Ханейчук, 2004).

3 Данные Бирмингема и Крыма, 1980–1985 гг.

Отсутствие колебания P_0 в измерениях эффекта Доплера солнечной фотосфера, предпринятых в 1980–1985 гг. Elsworth et al. (1989) на Канарских островах, может быть связано с тем обстоятельством, что там применялся не дифференциальный, а абсолютный метод измерения скорости: в данных присутствовали тренды, обусловленные вращением Земли и превышавшие почти на три порядка амплитуду искомого сигнала; тренды фильтровались с помощью синусоид, что могло привести к удалению искомого сигнала. Но отметим главное: данные КрАО за указанные годы также в среднем не показали присутствия у Солнца периодичности P_0 , что может говорить о сильной переменности амплитуды колебания со временем.

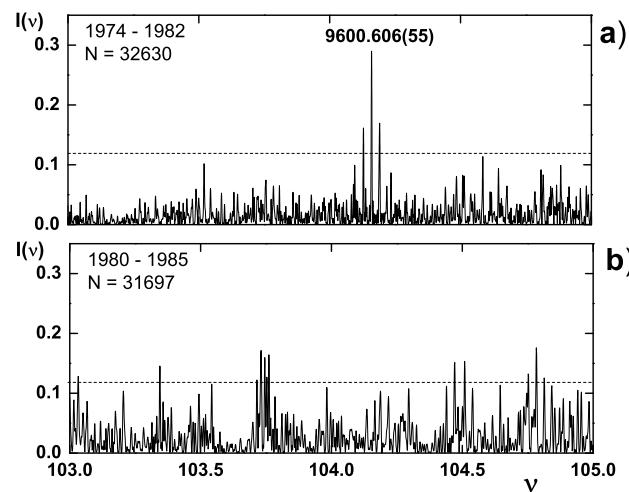


Рис. 1. (а) Спектр мощности колебаний Солнца в 1974–1982 гг. по данным КрАО (число измерений лучевой скорости с пятиминутным усреднением составляет $N = 32630$). По горизонтали – частота ν в мГц, по вертикали – мощность $I(\nu)$ в единицах m^2/c^2 на единичный интервал частот. Пунктирная линия показывает уровень значимости 3σ , а главный пик соответствует периоду 9600.606(55) с. (б) То же для крымских измерений 1980–1985 гг., $N = 31697$

На рис. 1а показан спектр мощности лучевой скорости фотосферы Солнца по наблюдениям в Крыму за 1974–1982 гг., вычисленный прямым Фурье-преобразованием в районе девятой суточной гармоники (Kotov, Haneychuk, 2020): главный пик отвечает периоду 9600.606(55) с, который в пределах ошибки согласуется с “каноническим” значением $P_0 = 9600.606(12)$ с, см. п. 1.

На рис. 1б приведен аналогичный спектр крымских данных за 1980–1985 гг.: в нем, как и по данным Бирмингема за те же годы, отсутствует периодичность P_0 .

После 1982 г. солнечный период принял новое значение ≈ 9597.96 с, близкое к годичному спутнику P_0 : колебание P_0 распалось или “расщепилось”. В итоге за 45 лет крымских наблюдений у Солнца выявлено два колебания, природа которых неизвестна: 9600.626(13) с и $P_1 = 9597.924(13)$ с. Первый в пределах ошибки согласуется с P_0 , период же биений P_0 и P_1 , составляющий 397.7(2.6) сут, странным образом совпадает с синодическим периодом обращения Юпитера 398.9 сут (подробнее см. Kotov, Haneychuk, 2023).

Подчеркнем также, что:

- (а) P_0 -колебание Солнца в КрАО наблюдалось не круглый год, а преимущественно в летние и осенние месяцы, т. е. на определенной части земной орбиты;
- (б) расщепление периода колебаний, или сдвиг частоты, наблюдался и в данных Стэнфорда (см. Kotov et al., 1997);
- (в) в отдельные годы колебание не регистрировалось и в КрАО (в силу переменности амплитуды, см. выше).

Период P_0 находится в диапазоне временных шкал 0.02–0.25 сут, характерных для пульсаций звезд типа δ Sct (см., например, Rodriguez et al., 2000; Samus' et al., 2017), но с очень малой амплитудой изменений блеска нашей звезды. Если типичные звезды типа δ Sct с массой $1.5\text{--}2.5M_{\odot}$ (M_{\odot} – масса Солнца) изменяют блеск с амплитудами от 0.003 до 0.9 зв. вел., то относительные P_0 -вариации блеска Солнца оцениваются крошечной величиной $\sim 10^{-5}$ (Дидковский, Котов, 1987).

4 Заключение

Измерения колебаний Солнца, выполненные исследователями Бирмингемского университета (с участием соавторов из США и Испании), не противоречат выводам Brookes et al. (1976), Severny et al. (1976), Grec et al. (1980) и Scherrer, Wilcox (1983) о глобальных пульсациях Солнца с периодом P_0 . Пульсации имеют переменную амплитуду, исчезая совсем в некоторые годы, как и у части звезд типа δ Sct. Главный вопрос заключается в физической интерпретации этого нового астрономического явления. Изучение причин солнечных P_0 -колебаний поможет прояснить механизм пульсаций и устройство как нашей звезды, так и звезд типа δ Sct.

Заметим также, что почти-совпадение P_0 с девятой гармоникой земных суток может пролить новый свет на генезис Солнечной системы, ее особенностей и уникальности Земли. Однако истинная, глубинная природа пульсаций Солнца пока неизвестна.

Благодарности. Автор признателен Ф.М. Саншезу (Париж) за дискуссию о физике Солнца и архитектуре Солнечной системы, а также В.И. Ханейчуку за активное участие в наблюдениях Солнца в КрАО на телескопе БСТ-1 им. А.Б. Северного и рецензенту за правильное замечание. Работа выполнена по теме государственного задания № 122022400224-7 РАН.

Литература

- Дидковский Л.В., Котов В.А., 1987. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 76. С. 119–138.
[Didkovsky L.V., Kotov V.A., 1987. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 76, pp. 119–138. (In Russ.)]
- Котов В.А., 2023. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 119. № 4. С. 27–34. [Kotov V.A., 2023. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 119, no. 4, pp. 27–34. (In Russ.)]
- Котов В.А., Левицкий Л.С., 1987. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 77. С. 51–71. [Kotov V.A., Levitsky L.S., 1987. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 77, pp. 51–71. (In Russ.)]
- Котов В.А., Ханейчук В.И., 2004. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 100. С. 30–44. [Kotov V.A., Haneychuk V.I., 2004. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 100, pp. 30–44. (In Russ.)]

- Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т., 1983. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 66. С. 3–71.
 [Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T., 1983. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 66, pp. 3–71. (In Russ.)]
- Brookes J.R., Isaak G.R., van der Raay H.B., 1976. Nature, vol. 259, pp. 92–95.
- Christensen-Dalsgaard J., Gough D.O., 1976. Nature, vol. 259, pp. 89–92.
- Christensen-Dalsgaard J., Gough D., Toomre J., 1985. Science, vol. 229, pp. 923–931.
- Cox J.P., 1980. Theory of stellar pulsation. Princeton: Princeton Univ. Press.
- Delache P., 1981. Compt. Rend. Acad. Sci. Paris., vol. 293, pp. 949–951.
- Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A., 2018. Astrophys. Space Sci., vol. 363, no. 12, p. 257.
- Elsworth Y.P., Jefferies S.M., McLeod C.P., et al., 1989. Astrophys. J., vol. 338, pp. 557–562.
- Fossat E., Boumier P., Corbard T., et al., 2017. Astron. Astrophys., vol. 604, p. A40.
- Gough D., 1983. Phys. Bull., vol. 34, pp. 502–507.
- Grec G., Fossat E., 1979. Astron. Astrophys., vol. 77, pp. 351–353.
- Grec G., Fossat E., Pomerantz M., 1980. Nature, vol. 288, pp. 541–544.
- Kotov V.A., 1985. Solar Phys., vol. 100, pp. 101–113.
- Kotov V.A., Haneychuk V.I., 2020. Astron. Nachr., vol. 341, no. 6–7, pp. 595–599.
- Kotov V., Haneychuk V., 2023. Acta Astrophys. Taurica, vol. 4, no. 2, pp. 1–5.
- Kotov V.A., Haneychuk V.I., Tsap T.T., et al., 1997. Solar Phys., vol. 176, pp. 45–57.
- Koutchmy S., Koutchmy O., Kotov V.A., 1980. Astron. Astrophys., vol. 90, pp. 372–376.
- Pallé P.L., Roca Cortés T., 1988. In Christensen-Dalsgaard J., Frandsen S. (Eds.), Advances in helio- and asteroseismology. Dordrecht: Reidel, p. 75–78.
- Rodriguez E., López-González M.J., López de Coca P., 2000. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., vol. 144, no. 3, pp. 469–474.
- Samus' N.N., Kazarovets E.W., Durlevich O.V., et al., 2017. Astron. Rep., vol. 61, no. 1, pp. 80–88.
- Scherrer P.H., Wilcox J.M., 1983. Solar Phys., vol. 82, pp. 37–42.
- Scherrer P.H., Wilcox J.M., Kotov V.A., et al., 1979. Nature, vol. 277, pp. 635–637.
- Scherrer P.H., Wilcox J.M., Severny A.B., et al., 1980. Astrophys. J., vol. 237, no. 3, pp. L97–L98.
- Severny A.B., Kotov V.A., Tsap T.T., 1976. Nature, vol. 259, pp. 87–89.
- Severny A.B., Kotov V.A., Tsap T.T., 1980. Astron. Astrophys., vol. 88, pp. 317–319.
- Sevin É., 1946. Compt. Rend. Acad. Sci. Paris, vol. 222, pp. 220–221.

Solar pulsations: a comparison of the Birmingham and Crimean data

V.A. Kotov

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
vkotov@craocriemea.ru

Abstract. According to measurements of the line-of-sight velocity of the solar photosphere carried out in Crimea and Stanford from 1974 through 1982, the Sun pulsated then with the period $P_0 = 9600.6$ s. However, the new data obtained by the researchers from the University of Birmingham showed that the Sun did not pulsate with this period in 1980–1985: their power spectrum of the solar line-of-sight velocity exhibited the presence of only the “terrestrial” artifact – the 9th daily harmonic 9600.0 s. We demonstrate that during the same years the P_0 signal was on average absent in CrAO data as well, which can be interpreted by the strong amplitude variability of the solar P_0 -oscillation. The phenomenon is similar to pulsations of some δ Sct-type stars: for some of them, periodicity appears sporadically and sometimes disappears completely. The true nature of P_0 -pulsations of the Sun, as well as those of a small-amplitude δ Sct-type star, remains unknown.

Key words: Sun, pulsations, helioseismology, δ Sct-type stars