

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 121, № 2, 21–25 (2025)

УДК 523.9

## Пульсации Солнца: сопоставление данных Бирмингема и Крыма

*В.А. Котов*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
*vkotov@crao.crimea.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  $\delta$  Sct: у некоторых из них периодичность также наступает спорадически, иногда полностью исчезая. Природа  $P_0$ -пульсаций Солнца, как и малоамплитудной звезды типа  $\delta$  Sct, неизвестна.

**Ключевые слова:** Солнце, пульсации, гелиосейсмология, звезды типа  $\delta$  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 размышление 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 выразить 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).

Гелиосейсмология 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?

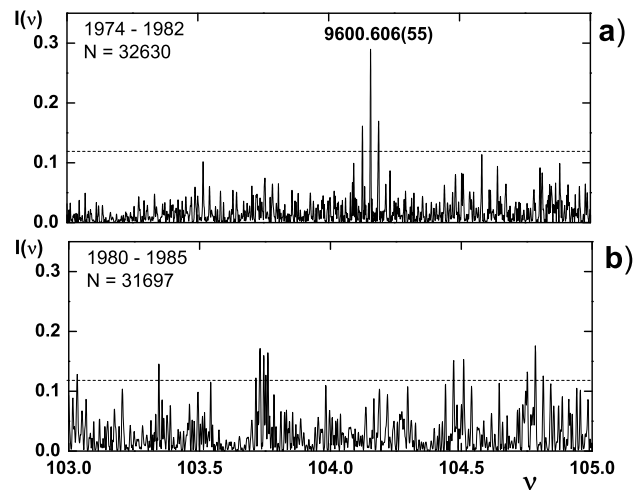
## 2 Девятая гармоника суток?

Атмосферный эффект тщательно исследовался, и было показано, что сигнал  $P_0$ , наблюдавшийся в колебаниях лучевой скорости фотосферы, 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 Стэнфорда значение  $P_0$  отличается от  $1/9$  сут на  $9\sigma$  (Scherrer, Wilcox, 1983), а по 45-летним измерениям в КрАО разность  $P_0 - P_9$  имеет еще большую значимость (см. Kotov, Haneychuk, 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).

Вывод 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; Kotov 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 фотосферы, 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  $\nu$  в мГц, по вертикали – мощность  $I(\nu)$  в единицах  $\text{м}^2/\text{с}^2$  на единичный интервал частот. Пунктирная линия показывает уровень значимости  $3\sigma$ , 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  $\approx 9597.96$  с, близкое к годовому 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  $\delta$  Sct (см., например, Rodriguez et al., 2000; Samus’ et al., 2017), но с очень малой амплитудой изменений блеска нашей звезды. Если типичные звезды типа  $\delta$  Sct с массой 1.5–2.5  $M_\odot$  ( $M_\odot$  – 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  $\delta$  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  $\delta$  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 дискуссии 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@craocrimea.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  $\delta$  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  $\delta$  Sct-type star, remains unknown.

**Key words:** Sun, pulsations, helioseismology,  $\delta$  Sct-type stars