

---

Издаётся Евразийским астрономическим обществом  
и Государственным астрономическим институтом имени П.К. Штернберга МГУ

---

№ 1634, 2016 декабря 4

---

**Результаты тайминга пульсара PSR B0943+10 (J0946+0951)  
в 2007–2016 гг. на радиотелескопе БСА ФИАН**

**А.Е. Родин, С.А. Сулейманова**

*Пуцинская радиоастрономическая обсерватория,  
Астрокосмический центр, Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Российской Академии наук, Пуцино, Московская область, 142290, Россия  
E-mail: rodin@pra0.ru*

Поступила в редакцию 24 октября 2016 г.

**Резюме.** Представлены результаты хронометрических наблюдений пульсара PSR B0943+10, известного как «переключающийся» пульсар в радио- и рентгеновском диапазоне частот. Наблюдения проводились на частоте 112 МГц на временном интервале MJD = 54150–57660. Обнаружены дополнительные обстоятельства, указывающие на возможное существование у него планетной системы.

Хронометрирование (тайминг) пульсара PSR B0943+10 на радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН проводится на основе регулярных наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН, начиная с 2007 года. В 2013 году при исследовании связи между явлением переключения режимов излучения (мод) этого пульсара с вариациями моментов прихода импульсов (далее МПИ) были обнаружены значительные отклонения МПИ от предвычисленных значений с периодом в несколько лет [1]. Было высказано предположение, что эти отклонения могут быть следствием как квазипериодических случайных вариации вращения пульсара, так и гравитационных возмущений от планетной системы. Новый цикл наблюдений мог бы если не подтвердить, то, по меньшей мере, повысить вероятность реализации одного из этих сценариев.

В данной работе приводятся результаты обработки массива данных, дополненного наблюдениями с ноября 2013 г. по сентябрь 2016 г. Наблюдения пульсара PSR B0943+10 проводились на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 112 МГц. Радиотелескоп БСА является пассажным инструментом с шириной диаграммы направленности по половинному уровню  $3.5'/\cos\delta$ . За это время регистрируется 194 индивидуальных импульса пульсара PSR B0943+10 с периодом 1.097 с. Для регистрации использовался цифровой пульсарный приемник ЦПП БСА с шириной полосы 2.5 МГц и шириной каждого канала 4.88 МГц. После компенсации дисперсионной задержки по частоте каждого из 194 индивидуальных импульсов и их последующего суммирования результат записывался на жёсткий диск. Амплитуда интегральных импульсов, использованных для дальнейшего анализа и выраженная в единицах сигнал/шум, изменялась в пределах 8–115, а постоянная интегрирования – от 0.8192 до 2.8672 мс (в зависимости от требований параллельно выполняемых задач). Подробнее аппаратура, а также методика наблюдений и обработки представлены в работе [1].

Таблица 1: Эфемериды и параметры вращения пульсара B0943+10 (J0946+0951)

Параметры	Значения
RAJ(hh:mm:ss)	09:46:07.837(2)
DECJ(dd:mm:ss)	09:52:02.9(1)
PMRA, mas/yr	-38
PMDEC, mas/yr	-21
$\nu$ , s <sup>-1</sup>	0.910988959151(3)
$\dot{\nu}$ , s <sup>-2</sup>	-2.95051(9) · 10 <sup>-15</sup>
$\ddot{\nu}$ , s <sup>-3</sup>	-4.6(2) · 10 <sup>-26</sup>
PEPOCH	56500
DM, pc/cm <sup>3</sup>	15.4
EPHEM	DE405
CKO, ms	1.1

Для определения моментов прихода импульсов (МПИ) с максимально возможной точностью проводилась кросс-корреляция полученных импульсов с эталонным профилем. Полученные МПИ анализировались программой фазового анализа Темро [2]. Искомыми являлись астрометрические (прямое восхождение и склонение) и вращательные параметры пульсара (вращательная частота и её производные).

В таблице 1 приведены МНК-оценки параметров хронометрирования пульсаров: прямое восхождение, склонение (J2000) на эпоху MJD = 56500,  $\nu$ ,  $\dot{\nu}$ ,  $\ddot{\nu}$  – частота вращения пульсара и её производные на эпоху  $T_0$  (для модели, включающей кубический полином), мера дисперсии DM (пк/см<sup>3</sup>); CKO остаточных уклонений после исключения долгопериодических вариаций (мс). В круглых скобках указана формальная МНК-оценка параметра, относящаяся к последним значащим цифрам.

Собственное движение по прямому восхождению (PMRA) и склонению (PMDEC) пульсара PSR B0943+10 не определялось из-за недостаточной точности исходных данных. Использованные при вычислениях значения собственной скорости пульсара по прямому восхождению и склонению заимствованы из работы [3].

Барицентрические остаточные уклонения МПИ после вписывания полинома третьей степени для интервала MJD = 54150–57660 показаны на рис. 1. Для вычисления МПИ использовалась модель, включающая в себя астрометрические и вращательные параметры, приведенные в таб. 1. Пульсар PSR B0943+10 на всём исследуемом интервале показывает квазипериодические вариации МПИ. В предыдущих работах, в которых упоминался пульсар PSR B0943+10 [4–6], квазипериодические вариации не были обнаружены.

Для определения параметров долгопериодических вариаций был применен способ определения периода и его гармоник, основанный на явном вписывании в остаточные уклонения функции

$$s = A_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{P} + \varphi_1\right) + A_2 \sin\left(\frac{4\pi t}{P} + \varphi_2\right), \quad (1)$$

описывающей первые две низкочастотные гармоники с наибольшей амплитудой, обнаруженные в остаточных уклонениях. Включение гармоник с периодами  $P/3$  и  $P/4$  не привело к улучшению качества вписывания гармонической кривой.

Таблица 2: Периоды и амплитуды основных гармоник в остаточных уклонениях МПИ.

Параметры	Значение	Погрешность
$P_1$ , сут.	1583	16
$P_2$ , сут.	792	16
A1, мс	3.5	0.2
A2, мс	2.9	0.1

Рисунок 1 показывает, как вписываются две гармоники в данные наблюдений, а в Таблице 2 приведены амплитуды гармоник и их период. Найденные гармонические функции хорошо описывают кривую остаточных уклонений. Остаточные вариации объясняются собственными шумами вращения пульсара.

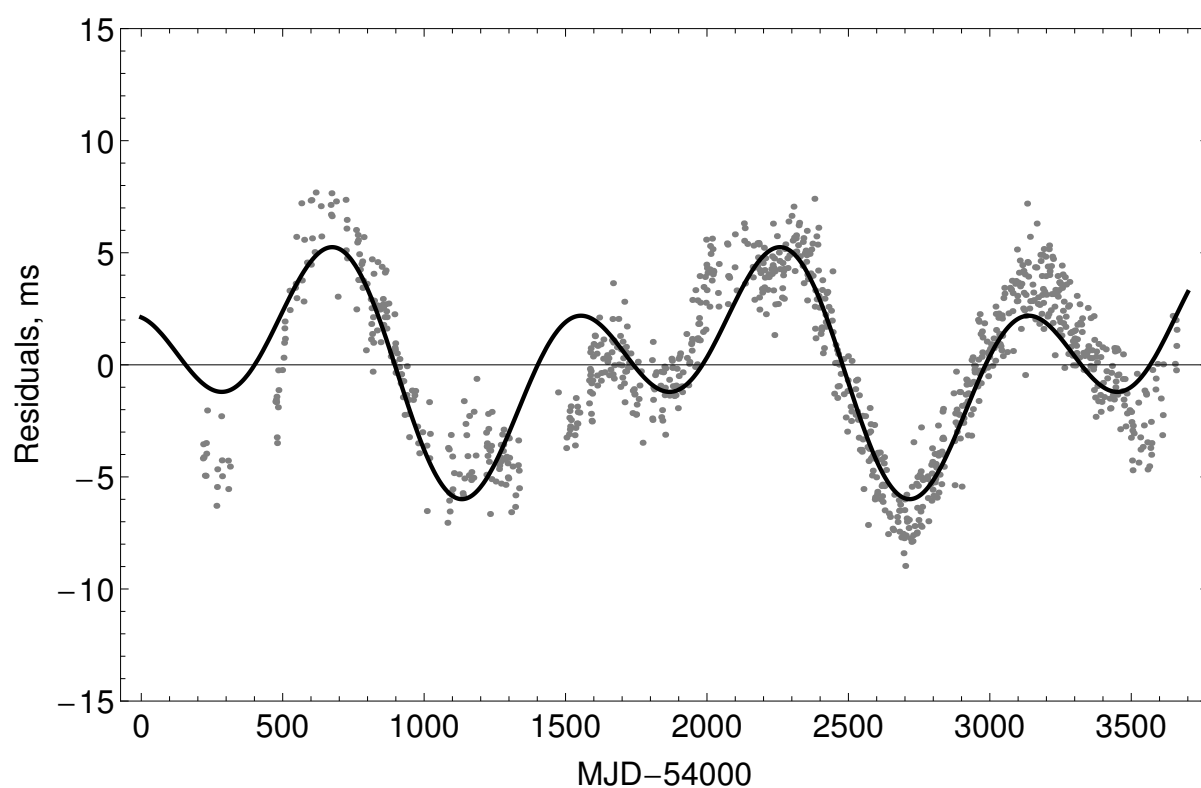


Рис. 1: Остаточные уклонения МПИ пульсара PSR B0943+10 и гармоническая кривая, которая представляет возможное влияние планет вокруг пульсара. Параметры гармонической кривой представлены в таблице 2.

В Таблице 3 представлены орбитальные параметры спутников, выводимые из наблюдений: период обращения, большая полуось орбиты и масса (в единицах массы Юпитера). При вычислении этих параметров суммарная масса пульсара и спутника принята  $M_P + M_C = 1.5 M_\odot$ .

Можно интерпретировать гармонические вариации МПИ как влияние двух планетных тел, вращающихся вокруг пульсара и находящихся на резонансных орбитах с отно-

Таблица 3: Параметры спутников пульсара PSR B0943+10.

	PSR B0943+10b	PSR B0943+10c
$P$ , сут.	792	1583
$a$ , а.е.	1.9	3.0
$m \sin i$ , $M_{\text{Jup}}$	3.8	2.0

пением периодов 1:2. Ранее это предположение было сделано авторами в работе [1] по хронометрированию данного пульсара за период 2007–2013 гг. (MJD = 54150–56613). Результаты обработки с добавлением новой многолетней серии наблюдений повышают достоверность такого предположения и позволяют уточнить параметры планетной системы.

Работа выполнена при поддержке по программе Президиума РАН «Переходные и взрывные процессы в астрофизике».

## Литература

- [1] С.А. Сулейманова, А.Е. Родин, *Астрон. журн.* **91**, 901 (2014).  
[S.A. Suleymanova, A.E. Rodin, *Astron. Rep.* **58**, 796 (2014)].
- [2] J.H. Taylor, J.M. Weisberg, *ApJ* **345**, 434 (1989).
- [3] A.G. Lyne, B. Anderson, M.J. Salter, *MNRAS* **201**, 503 (1982).
- [4] G. Hobbs, A.G. Lyne, M. Kramer, C.F. Martin, C. Jordan, *MNRAS* **353**, 1311 (2004).
- [5] G. Hobbs, A.G. Lyne, M. Kramer, *MNRAS* **402**, 1027 (2010).
- [6] T.V. Shabanova, V.D. Pugachev, K.A. Lapaev, *ApJ* **775**, 1 (2013).

### The PRAO Timing Observations of the Pulsar PSR B0943+10 (J0946+0951) in 2007–2016 at the Frequency of 112 MHz

**A.E. Rodin and S.A. Suleymanova**

*Pushchino Radio Astronomy Observatory  
Astrospace Centre, Lebedev Institute of Physics  
Russian Academy of Sciences  
Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia  
E-mail: rodin@prao.ru*

Received October 24, 2016

**Abstract.** The results of timing observations of the pulsar PSR B0943+10 demonstrating mode switching phenomenon at radio and X-ray frequencies are presented. Observations were carried out at 112 MHz over MJD span 54150–57660. Additional circumstances have been found pointing to the presence of two planets orbiting the pulsar with periods of about 792 and 1583 days.