УДК 524.354.4

# 12-ЛЕТНЯЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ В УКЛОНЕНИЯХ МОМЕНТОВ ПРИХОДА ИМПУЛЬСОВ ПУЛЬСАРА PSR B0943+10

© 2019 г. Е. Д. Старовойт<sup>1\*</sup>, С. А. Сулейманова<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пущинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пущино, Россия Поступила в редакцию 23.08.2018 г.; после доработки 19.10.2018 г.

При обработке данных наблюдений за 26-летний период, начиная с 1992 г., в остаточных уклонениях моментов прихода импульсов пульсара PSR B0943+10 обнаружены синусоидальные вариации с периодом около 12 лет. Подобное поведение остаточных уклонений может быть обусловлено влиянием планеты, обращающейся вокруг пульсара. Наблюдения проводились на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 112 МГц.

DOI: 10.1134/S0004629919030101

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Пульсар PSR B0943+10 (J0946+0951) привлекает к себе внимание исследователей с момента обнаружения у него двух переключающихся режимов (мод) радиоизлучения. Переключения между спокойной Q-модой (Quiescent-mode) и вспышечной В-модой (Burst-mode) радиоизлучения пульсара PSR B0943+10 были обнаружены в 1980 г. в Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО), а их основные характеристики были описаны в [1]. В частности, было показано, что профиль усредненного импульса в Q-моде, напоминающий гауссиану, при переключении в Вмоду преобразуется в двухкомпонентный с доминированием первого компонента. Ширина окна излучения при таком переключении не меняется, а амплитуда импульса возрастает в несколько раз. Высокая интенсивность и узкий профиль первого компонента усредненного импульса, как было показано в работе [2], обеспечивают более точное определение момента прихода импульсов (МПИ) для задач, связанных с хронометрированием пульсара. Важным этапом в изучении этого пульсара стало обнаружение регулярного и значительного изменения всех основных характеристик его радиоизлучения на протяжении нескольких часов, пока длится вспышечная мода [2-4]. Подобный процесс не наблюдается ни в одном другом из немногочисленной группы "переключающихся" пульсаров. В этом смысле пульсар PSR B0943+10 можно отнести к аномальным пульсарам, несмотря на то,

что он является одиночным, долгопериодическим ( $P_s = 1.0977$  с), имеет возраст около 5 млн. лет, и обладает другими свойствами, типичными для переключающихся пульсаров [5].

Причины, вызывающие переключения режимов излучения (мод) в пульсарах, пока неизвестны. В целом причины могут быть связаны либо с аномальными свойствами поверхности "переключающихся" пульсаров, либо с неким внешним воздействием. Недавние синхронные наблюдения пульсара PSR B0943+10 в рентгеновском и радиодиапазонах с использованием космического телескопа XMM-Newton и наземных радиотелескопов GMRT и LOFAR на частотах 328 и 140 МГц соответственно показали коррелирующие модальные вариации интенсивности [6]. Оказалось, что рентгеновский поток убывает при вспышках радиоизлучения: поток в В-моде составляет 42% от потока в Q-моде [7].

В работе [2] было высказано предположение, что такая антикорреляция может быть вызвана эпизодическим вторжением в магнитосферу пульсара вещества из окружающей среды. Падение вещества на звезду разогревает ее поверхность, которая становится источником рентгеновского излучения. Спустя некоторое время магнитосфера пульсара возобновляет генерацию радиоволн в форме вспышек В-моды. Источником аккрецирующего вещества может служить диск, сформированный после взрыва сверхновой. Не исключено, что из части вещества, выброшенного при взрыве сверхновой, могут формироваться не только диски, но и планетные тела. В этом случае можно пытаться искать гравитационное возмущение от планетной

<sup>\*</sup>E-mail: starovoit.prao@gmail.com

<sup>\*\*</sup>E-mail: suleym@prao.ru

системы на остаточные уклонения МПИ. Поиски такого влияния привели к обнаружению 4-летней периодичности в таких уклонениях за временной интервал наблюдений 2007–2013 гг. [2].

Следует сказать, что квазипериодические вариации уклонений МПИ обнаружены у ряда пульсаров [8], однако амплитуда и период таких изменений претерпевают значительные изменения в зависимости от интервала наблюдений. Авторы работы [2], учитывая это, отмечают, что для поиска гравитационных возмущений от планетной системы пульсара В0943+10 необходимо значительно расширить временной интервал наблюдений. Расширить этот интервал удалось как за счет авторских наблюдений пульсара после 2013 г., так и за счет архивных данных, полученных Т.В. Шабановой. Этот архив включает измерения МПИ 27 пульсаров, проведенных с 1978 до 2012 г. Результаты исследований вариаций МПИ и частоты вращения пульсаров на основе этих данных опубликованы ею в работе [9]. Для пульсара PSR B0943+10 были приведены графики вариаций МПИ за 30-летний интервал наблюдений с 1982 по 2012 г. Был сделан обобщающий вывод, что эти вариации можно описать кубическим полиномом, соответствующим значительной отрицательной второй производной скорости вращения звезды. Здесь следует подчеркнуть, что о каких-либо периодических вариациях в уклонениях МПИ пульсара PSR B0943+10 в работе [9] не сообщалось.

В настоящей работе представлены результаты анализа остаточных уклонений МПИ пульсара PSR B0943+10 за временной интервал 1992— 2017 гг., охватывающий 26 лет наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 112 МГц. Показано, что вариации остаточных уклонений МПИ имеют синусоидальный характер с периодом около 12 лет. Обсуждается возможная причина этих вариаций.

## 2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для наблюдений пульсара использовался многоканальный цифровой приемник на частоте 112 МГц. Ширина рабочей полосы приемника составляет 2.5 МГц и с помощью БПФ (быстрого преобразования Фурье) разбивается на 512 спектральных каналов с шириной каждого канала 4.88 кГц. Практически в обработке использовались каналы 10–470 в полосе 2.245 МГц, с компенсацией запаздывания сигнала, связанного с частотной дисперсией в межзвездной среде, к частоте 111.88 МГц, соответствующим 470-му каналу; далее в тексте она будет упоминаться как частота 112 МГц. Узкая полоса канала является одним из преимуществ используемых приемников, поскольку позволяет уменьшить влияние уширения импульсов в полосе канала из-за дисперсионного запаздывания. Для пульсара PSR B0943+10 при мере дисперсии 15.4 пк/см<sup>3</sup> уширение импульса на частоте 112 МГц по уровню половины амплитуды пренебрежимо мало.

Алгоритм работы приемников в основных режимах следующий. В предвычисленные моменты времени, определяемые временем начала сеанса и периодом пульсара, запускается процесс формирования спектров сигнала. Спектр сигнала вычисляется с помощью аппаратно реализованного 1024-точечного процессора быстрого преобразования Фурье. Смежные по времени спектры могут суммироваться заданное количество раз в соответствии с параметром, называемым временным разрешением. После каждого импульса запуска, синхронного с периодом пульсара, формируется заданное количество таких суммарных спектров. Внутренняя шкала времени приемников использует в качестве опорной частоты сигнал с частотой 5 МГц, поступающий от GPS приемника. Абсолютное значение времени внутренней шкалы устанавливается по коду времени, получаемому NTP (Network Time Protocol) клиентом компьютера, в который встроены цифровые приемники, и производится аппаратная синхронизация счетчиков шкалы по переднему фронту сигнала 1 Гц от GPS приемника. Таким образом, точность временной привязки приемников соответствует точности ведения времени GPS приемника и составляет + +30 нс. Подробнее аппаратура и методика наблюдений описаны в работе [10].

Наблюдения пульсара PSR B0943+10 были продолжены на радиотелескопе Пущинской Радиоастрономической обсерватории БСА ФИАН в течение 2013-2017 гг. Радиотелескоп БСА является пассажным инструментом. Время прохождения радиоисточника через диаграмму направленности по половинному уровню составляет  $3.5/\cos\delta$  минут, где  $\delta$  — склонение радиоисточника. За это время регистрируется 194 индивидуальных импульсов пульсара PSR B0943+10. Средний профиль интенсивности импульса за один сеанс получался в результате накопления импульсов в каждом канале и последующего сложения сигнала в полосе приема 2.245 МГц с компенсацией дисперсионной задержки. Амплитуда усредненного импульса в отдельном сеансе наблюдений, выраженная в единицах "сигнал/шум", на обеих частотах изменялась в пределах 8-260. Проанализировано несколько сотен эпизодов вспышечной моды. Известно, что вращение плоскости поляризации сигнала в межзвездной среде при приеме на антенну с линейной поляризацией приводит к периодической модуляции амплитуды импульсов по частоте в полосе приема (эффект Фарадея). Для пульсара PSR B0943+10 с мерой вращения, равной  $15 \pm 1$  рад/м<sup>2</sup>, значение периода фарадеевской модуляции на частоте 112 МГц равно 1.6 МГц. При усреднении в общей полосе регистрации 2.245 МГц амплитуда импульсов на частоте 112 МГц практически соответствует полной интенсивности. При среднем значении степени поляризации около 30% искажения формы и фазы импульса будут незначительными.

Моменты прихода импульсов определялись путем вычисления центра тяжести кросс-корреляционной функции текущего импульса и эталонного импульса (шаблона). Шаблон формировался суммированием полученных в разные дни усредненных за сеанс импульсов с высоким отношением сигнал/шум. Были созданы шаблоны среднего профиля под основные временные разрешения 2.8672, 1.024, 0.8192 мс в зависимости от используемого наблюдательного материала. Затем шаблоны были выровнены друг относительно друга по времени и амплитуде. Поскольку соотношение амплитуд двухкомпонентного импульса на протяжении вспышечной моды на частоте 112 МГц изменяется примерно в 10 раз, для пульсара PSR B0943+10 невозможно использовать единый универсальный шаблон с двухкомпонентным профилем. Это приводило бы к влиянию текущей формы импульса на измеряемые значения МПИ. Поэтому было решено исключить из шаблона второй компонент. В тех редких случаях, когда в текущем импульсе доминировал второй компонент, МПИ корректировались с учетом временного расстояния между компонентами 29 мс.

Обработка всего объема данных МПИ, включая исходные данные из архива, проводилась в программе Тетро<sup>1</sup>. Фазовый анализ пульсарных наблюдений и поведения остаточных уклонений подробно описаны в работе Лоримера и Крамера [11], а также в работах Хоббса [12, 13] и Дорошенко [14]. Модель фазового анализа данных PSR B0943+10 включала в себя астрометрические параметры (координаты пульсара) и вращательные (значение частоты, ее первой и второй производной). Все параметры определялись на эпоху MJD 56 000.

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Массив данных для процедуры тайминга представляет собой совокупность результатов собственных измерений МПИ и исходных архивных данных. Использованные нами архивные данные являются частью более обширного материала. Полный интервал наблюдений, указанный в работе [9] для PSR B0943+10, охватывает

1982-2012 гг. (MJD 45134-55956) и включает 4.5-летний интервал отсутствия данных, начиная с 1986 г. (MJD 46664). Мы применили процедуру тайминга для последовавшего за ним непрерывного ряда данных в интервале MJD 48736-58100 (24.04.1992-13.12.2017) общей протяженностью около 26 лет. Стыковка данных произведена при MJD 55956 (30.01.2012). В результате обработки объединенных данных МПИ, проведенной в программе Тетро, был получен вид остаточных уклонений пульсара PSR B0943+10, представленный на рис. 1. Не вызывает сомнений наличие синусоидальной формы изменения уклонений МПИ за указанный 26-летний интервал. Подобное поведение остаточных уклонений может свидетельствовать о наличии вокруг этого пульсара планеты, обращающейся с периодом  $P \sim 12$  лет.

Обращает на себя внимание зашумленность левой части графика (серые точки). Одно из наиболее вероятных объяснений этого состоит в том, что в своих измерениях Т.В. Шабанова использовала 2 шаблона для каждой моды усредненного импульса отдельно. Поскольку разница в положении максимума усредненного импульса для двух мод на частоте 112 МГц составляет примерно 14.5 мс, это привело к дискретным скачкам МПИ на эту величину день ото дня и значительному дополнительному шуму в тайминге. Мы, как было сказано выше, в измерения включали только импульсы, относящиеся к В-моде (черные точки).

Для создания объединенного массива, включающего только импульсы В-моды, архивные данные были сглажены. Сглаживание проводилось путем исключения данных из массива по следующему условию: соседние по дате измерения не должны отличаться более чем на 7 мс. Вид объединенного массива после сглаживания показан на рис. 2.

В табл. 1 показаны параметры вращения и эфемериды для интервала 26 лет (MJD 48 736– 58 100). RAJ, DECJ — прямое восхождение и склонение;  $\nu, \dot{\nu}, \ddot{\nu}$  — вращательная частота пульсара, первая и вторая производная частоты; PEPOCH — эпоха, на которую приведены координаты и вращательные параметры; DM — мера дисперсии; EPHEM — эфемериды, используемые для редукции МПИ в барицентр. В скобках приведена погрешность, относящаяся к последним значащим цифрам. PMRA, PMDEC — собственное движение по прямому восхождению и склонению не определялось, а взято из работы [15].

Для описания поведения остаточных уклонений пульсара PSR B0943+10 в присутствии гравитационных возмущений использовалась следующая модель:

$$r = a_p \sin i \cos(E + \omega) + b + ct + dt^2, \quad (1)$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> http://tempo.sourceforge.net/



**Рис. 1.** Остаточные уклонения МПИ пульсара B0943+10: архивные данные (серые точки) и данные авторских наблюдений (черные точки) соответствуют временным интервалам 1992–2012 и 2012–2017 гг. соответственно. Уклонения получены после вписывания тайминговой модели, включающей частоту вращения пульсара и две ее производные.



**Рис. 2.** Остаточные уклонения МПИ пульсара B0943+10 (точки) и теоретическая кривая (сплошная черная линия), описывающая движение пульсара в двойной системе при наличии планеты, обращающейся с периодом ~12 лет. Архивные данные представлены после процедуры сглаживания.

Параметры	Значения
RAJ	$09^{\rm h}46^{\rm m}07.743(95)^{\rm s}$
RECJ	$09^{\circ}52'00.64(3.98)''$
PMRA, mas/yr	-38
PMDEC, mas/yr	-21
$\nu, \mathrm{c}^{-1}$	0.9109890868133(38)
$\dot{\nu}, \mathrm{c}^{-2}$	$-2.95346(5) \times 10^{-15}$
$\ddot{\nu}, c^{-3}$	$-1.064(2)\times 10^{-25}$
PEPOCH	$56\ 000$
DM, $пк/см^3$	15.4
EPHEM	DE405

**Таблица 1.** Параметры вращения и эфемериды для интервала 26 лет (MJD 48 736-58 100)

Примечание. mas/yr (milli arc second) — угловая миллисекунда дуги в год, единица измерения собственных движений звезд.

где  $a_p \sin i$  — проекция большой полуоси орбиты пульсара вокруг центра тяжести системы, i наклон орбиты пульсара относительно картинной плоскости, E — эксцентрическая аномалия,  $\omega$  долгота перицентра,  $(b + ct + dt^2)$  — полином второго порядка, t — время.

В качестве независимых аргументов в данной модели выступают два параметра: эксцентрическая аномалия *E* и время *t*. Для приведения модели к одному независимому аргументу — времени *t* — используется разложение эксцентрической аномалии *E* по степеням эксцентриситета в ряд Лагранжа [16]:

$$E(M) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^k}{k!} \frac{d^{k-1}(\sin^k M(t))}{dM(t)^{k-1}},$$
 (2)

где M(t) — средняя аномалия.

С помощью приведенной выше модели была получена кривая, описывающая поведение остаточных уклонений (рис. 2), определены период обращения P, эксцентриситет e и проекция большой полуоси пульсарной орбиты на луч зрения  $a_p \sin i$ .

Для получения оценки массы планеты использовалась функция масс [17]:

$$m_c \sin i = a_p \sin i \left(\frac{4\pi^2 m_p^2}{GP^2}\right)^{1/3}.$$
 (3)

Здесь  $m_c \sin i$  — масса планетного компаньона пульсара с точностью до наклона орбиты,  $m_p$  масса пульсара, G — гравитационная постоянная,

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 4 2019

**Таблица 2.** Проекция большой полуоси пульсарной орбиты, орбитальные параметры и масса планеты, обращающейся с периодом ~12 лет

Параметры	Значения
Проекция большой полуоси, $a_p \sin i$ , мс	$32.43\pm0.13$
Большая полуось относительной орбиты, <i>a</i> , a.e.	$5.94\pm0.07$
Период <i>P</i> , годы	$12.07\pm0.02$
Эксцентриситет, <i>е</i>	$0.24\pm0.01$
Масса планеты, $m_c \sin i, M_\oplus$	$5.14\pm0.02$

P и  $a_p \sin i$  — период обращения и проекция большой полуоси пульсарной орбиты, соответственно, определенные с помощью теоретической кривой, описывающей поведение остаточных уклонений. В предположении, что масса пульсара равняется  $m_p = 1.44 \ M_{\odot}$ , формулу для массы планеты можно записать следующим образом [18, 19]:

$$m_c \sin i = 1.42 \times 10^{-4} a_p \sin i P^{-2/3},$$
 (4)

где период обращения P измеряется в днях, проекция большой полуоси  $a_p \sin i - в$  метрах, а рассчитываемая масса пульсарного компаньона  $m_c \sin i - в$  массах Земли.

Кроме того, из третьего закона Кеплера была определена большая полуось относительной орбиты *a*:

$$a = (m_p P^2)^{1/3}$$
. (5)

Орбитальные параметры и масса возможной планеты представлены в табл. 2.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже перечислены основные результаты данной работы.

1. Проведено хронометрирование аномального пульсара PSR B0943+10 за период 1992-2017 гг. с использованием архивных исходных данных наблюдений для временно́го интервала 1992-2012. Определены его астрометрические и вращательные параметры (период вращения и его первая производная) на эпоху MJD 56 000. Моменты прихода импульсов определялись по положению в окне излучения доминирующего первого компонента.

2. В остаточных уклонениях МПИ после вписывания квадратичного полинома для временно́го интервала 1992—2017 гг. обнаружена гармоническая вариация. Подобное поведение остаточных уклонений может свидетельствовать о наличии вокруг этого пульсара планеты, обращающейся с периодом  $P \sim 12$  лет. В рамках планетной модели

получены значения периода обращения, большой полуоси и массы спутника.

По современным представлениям, нейтронные звезды — пульсары — возникают в результате взрыва сверхновой на конечной стадии эволюции звезд сверхгигантов. В окружающее пространство выбрасывается огромная масса вещества. В сценарии, описанном в работе [20], часть этого вещества падает назад в направлении остатка сверхновой, формируя со временем газо-пылевые диски и планетные тела. По мнению этих авторов, обнаружение планетной системы вокруг пульсара PSR B1257+12 [17] подтверждает такой сценарий, поскольку радиус орбиты планет этой системы меньше радиуса звезды-предшественника. По мнению авторов работы [20], пульсары, обладающие планетами, являются первыми кандидатами для поиска инфракрасного излучения от газопылевых дисков вокруг нейтронных звезд.

В случае с пульсаром PSR B0943+10 ситуация обратная: в интерпретации авторов [2] именно присутствие вещества в окружающей среде как причины антикорреляции вариаций радио- и рентгеновского излучения может указывать и на присутствие планетных тел в окрестности звезды. Если обнаруженная нами синусоидальная 12летняя модуляция уклонений МПИ действительно вызвана гравитационным возмущением от планетной системы, мы получаем дополнительный аргумент в пользу предположения, что модальные вариации электромагнитного излучения пульсара PSR B0943+10 вызваны взаимодействием его магнитосферы с окружающей средой. Другим доказательством этого стало бы обнаружение инфракрасного излучения от газо-пылевого диска, вращающегося вокруг пульсара PSR B0943+10 и вызывающего "аномальное" поведение его основных характеристик при вспышках радиоизлучения.

Попытки обнаружить излучение газо-пылевых дисков вокруг 5 пульсаров в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах предпринимались еще в 1994 г. [21]. Они оказались неудачными из-за недостаточной чувствительности используемых наземных инструментов. В октябре 2018 г. предполагается вывести на орбиту большой телескоп, который будет исследовать Вселенную в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах (The James Webb Space Telescope) и обладать несравненно большей чувствительностью. Пульсар PSR B0943+10 является хорошим кандидатом для включения в список объектов наблюдений этого космического телескопа.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны директору ПРАО Р.Д. Дагкесаманскому за поддержку работы, ведущим сотрудникам ПРАО В.В. Орешко и С.В. Логвиненко за обеспечение эффективной работы радиотелескопа БСА ФИАН и цифровых многоканальных приемников, а также всему техническому персоналу обсерватории за помощь в выполнении многолетних наблюдений. Выражаем признательность В.Д. Пугачеву как хранителю обширного архива Т.В. Шабановой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. С. А. Сулейманова, В. А. Извекова, Астрон. журн. **61**(2), 53 (1984).
- 2. С. А. Сулейманова, А. Е. Родин, Астрон. журн. **91**(11), 901 (2014).
- 3. J. M. Rankin and S. A. Suleymanova, Astron. and Astroph. **453**, 679 (2006).
- 4. S. A. Suleymanova and J. M. Rankin, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **396**, 870 (2009).
- 5. С. А. Сулейманова, В. Д. Пугачев, Астрон. журн. **94**(5), 424 (2017).
- 6. W. Hermsen, J. W. T. Hessels, L. Kuiper, J. van Leeuwen, *et al.*, Science **339**, 436 (2013).
- 7. S. Mereghetti, A. Tiengo, P. Esposito, and R. Turolla, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **435**, 2568 (2013).
- 8. G. Hobbs, A. G. Lyne, M. Kramer, *et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **353**, 1311 (2004).
- 9. T. V. Shabanova, V. D. Pugachev, and K. A. Lapaev, Astrophys. J. **775**, 2 (2013).
- С. А. Сулейманова, С. В. Логвиненко, Т. В. Смирнова, Астрон. журн. 89(3), 237 (2012).
- 11. D. Lorimer and M. Kramer, *Handbook of pulsar astronomy* (Cambridge University Press, 2005).
- 12. G. B. Hobbs, R. T. Edwards, and R. N. Manchester, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **369**, 655 (2006).
- 13. R. T. Edwards, G. B. Hobbs, and R. N. Manchester, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **372**, 1549 (2006).
- О. В. Дорошенко, С. М. Копейкин, Хронометрирование пульсаров — принципы, аглоритмы и программы обработки наблюдений (М.: ФИАН, 1990).
- 15. A. G. Lyne, B. Anderson, and M. J. Salter, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **201**, 503 (1982).
- Г. Н. Дубошин, Небесная механика. Основные задачи и методы (Москва: Наука, 1968).
- 17. A. Wolszczan, Science 264, 538 (1994).
- P. C. Freire, F. Camilo, M. Kramer, D. R. Lorimer, A. G. Lyne, R. N. Manchester, and N. D'Amico, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 340, 1359 (2003).
- 19. M. Kramer, in *Planetary systems beyond the main sequence*, Proc. of the Intern. Conference, AIP Conference Proc. **1331**, 5 (2011).
- 20. M. Jura and J. Taylor, Spitzer Proposal, id. 23 (2004).
- 21. J. A. Phillips and C. J. Chandler, Astrophys. J. **420**, L83 (1994).

2019