

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О СУЩЕСТВОВАНИИ ПЛАНЕТЫ, ОБРАЩАЮЩЕЙСЯ ВОКРУГ ПУЛЬСАРА B0329+54 (J0332+5434)

© 2023 г. В. А. Потапов^{1*}, С. А. Андрианов^{2**}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Пушчинская
радиоастрономическая обсерватория (ПРАО АКЦ ФИАН), Пушино, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет,
Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 10.09.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.; принята к публикации 20.10.2023 г.

Проанализированы результаты наблюдений секундного пульсара B0329+54 (J0332+5434), демонстрирующего квазипериодический ход барицентрических моментов прихода импульсов (МПИ) на длительных временных интервалах. Проверена ранее предложенная для объяснения вариаций МПИ этого пульсара гипотеза о наличии у него планеты с массой, близкой к массе планет земной группы и периодом обращения 27.8 лет. Показано, что эта гипотеза не подтверждается при рассмотрении ряда остаточных уклонений МПИ на всем доступном временном интервале наблюдений 1968–2022 гг., и что вариации МПИ этого пульсара имеют, по-видимому, иную физическую причину.

Ключевые слова: радиоастрономия, нейтронные звезды, пульсары, хронометрирование пульсаров, двойные пульсары, экзопланеты.

DOI: 10.31857/S0320010823100066, **EDN:** MT00XI

1. ВВЕДЕНИЕ

После открытия первого радиопулсара в 1967 г. (Хьюиш и др., 1968) последовал взрывообразный рост интереса к этим объектам, который привел к обнаружению, уже в начале 70-х гг., десятков новых пульсаров. Что наиболее важно для нас, практически сразу были начаты их регулярные наблюдения методом хронометрирования (тайминга). В частности, на радиотелескопах Jet Propulsion Laboratory (JPL) такая программа была начата уже в 1968 г., а результаты были опубликованы в виде рядов моментов прихода импульсов (МПИ) (Даунс, Краузе-Полстофф, 1986). Таким образом, на сегодняшний день мы имеем для некоторых из пульсаров исключительно длительные для радиоастрономии ряды наблюдений.

Хронометрирование пульсаров, т.е. точное определение МПИ на радиотелескоп (локальные или топоцентрические МПИ) и в барицентр Солнечной системы (барицентрические МПИ), оказалось одним из наиболее плодотворных способов их изучения. Результаты проводимых этим методом наблюдений, с точки зрения достигнутой точности

определения вращательных, астрометрических и орбитальных параметров пульсаров, стоят в одном ряду с результатами, получаемыми наиболее точными астрометрическими измерениями.

Уже через несколько лет наблюдений стало ясно, что первоначально предложенная простейшая динамическая модель пульсара как вращающегося магнитного диполя, замедляющегося из-за магнитодипольных потерь, не вполне адекватна наблюдательным данным. То же относится и к феноменологической модели, для которой в качестве параметров используются период собственного вращения пульсара и его первая и вторая производные ($P, \dot{P}, \ddot{P}$). Стандартная процедура уточнения семи основных параметров одиночного пульсара (координат и собственных движений, периода и его первой и второй производных) по методу наименьших квадратов (МНК) (см., например, Дорошенко, Копейкин, 1990) не всегда приводила к удовлетворительному результату. Ряды остаточных уклонений барицентрических моментов прихода импульсов (ОУ МПИ) (разницы между наблюдаемыми и рассчитанными МПИ) демонстрировали необычные тренды, которые не удавалось свести к “белому” шуму вариацией параметров модели. Особенно интересными выглядели обнаруженные у некоторых пульсаров периодические или квазипериодические

* Электронный адрес: potap@prao.ru

** Электронный адрес: st086842@student.spbu.ru

ходы ОУ МПИ, естественным объяснением которых является предположение о наличии у пульсара компаньона.

В 1974 г. был обнаружен миллисекундный двойной пульсар В1913+16 и точно определены кеплеровские и релятивистские посткеплеровские параметры его двойной системы. Обнаружение излучения ею гравитационных волн (Вайсберг и др., 1981) послужило толчком для активизации поиска подобных объектов. К настоящему времени открыто 376 двойных пульсаров, для которых определен период обращения в орбитальной системе и оценена масса компаньона. Согласно последней версии каталога Australia Telescope National Facility (ATNF pulsar catalogue) (Манчестер и др., 2006, 2023), среди них числятся 70 пульсаров с массой компаньона $m_c < 0.1 M_\odot$ (системы со “сверхлегким” компаньоном), шесть — с $m_c < 0.01 M_\odot$, два — с $m_c < 0.001 M_\odot$ (так называемые Юпитеры J3222-2650 и J1719-1438) и только один, обладающий планетной системой (В1257+12). Планетная система вокруг миллисекундного пульсара В1257+12 была обнаружена в 1991 г. (Вольжан, Фрейл, 1992), но сложность с обработкой и интерпретацией данных позволила окончательно определить кеплеровские параметры и массы трех ее планет ($m_c \approx 0.02; 4.3; 3.9 M_\oplus$) только к 2003 г. (Коначки, Вольжан, 2003).

Ниже на основании анализа архивных рядов МПИ и собственных наблюдений нами будет проверена гипотеза о существовании планеты, обращающейся вокруг В0329+54 с периодом ≈ 27.8 лет. Для ее проверки нами был использован ряд наблюдений этого пульсара общей длительностью около 54 лет (1968–2022 гг.), что дает возможность пронаблюдать около двух полных периодов обращения гипотетической планеты. Это позволяет нам, в отличие от предшествующих авторов, вынужденно ограниченных наблюдательными рядами продолжительностью не более 1.6 предполагаемого периода планеты, сделать уверенный вывод о ее существовании или ее отсутствии.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ПЕРВИЧНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

В работе были использованы две группы рядов МПИ пульсара В0329+54: 1) опубликованные результаты наблюдений на радиотелескопах JPL в период 1968–1986 гг. на частоте 2388 МГц (Даунс, Краузе-Полстофф, 1986), эти ряды доступны в виде МПИ, редуцированных в точку отсчета, связанную с центром Земли; 2) результаты наблюдений на радиотелескопе БСА (большой сканирующей антенне) ПРАО АКЦ ФИАН в Пушино в 1978–2022 гг. на частотах 102.76 и 112 МГц в полосе 2.5 МГц, состоящие, в свою очередь, из трех

групп данных: в частности, результатов наблюдений в ПРАО в 1978–2012 гг. с использованием аналоговых анализаторов спектров (АС) в 32–128 частотных каналах и временным разрешением данных 2.432 мс (при постоянной времени 3 мс), результатов 2011–2012 гг., полученных с использованием цифрового анализатора спектра (ЦАС) в 512 частотных каналах с временным разрешением 2.432 мс (наблюдения Т.В. Шабановой), и результатов 2014–2022 гг., полученных с использованием ЦАС с временным разрешением 1.2288 и 2.4576 мс (наблюдения В.А. Потапова и А.Н. Казанцева). Данные с БСА за 1978–2011 гг. были доступны в виде топоцентрических МПИ, данные 2011–2022 гг. (ЦАС) — в виде исходных записей наблюдений пульсаров.

Первичная обработка данных проводилась по стандартному алгоритму хронометрирования пульсаров. Суммарный профиль пульсаров за сеанс наблюдений (определяемый временем прохождения через 1/2 максимума диаграммы направленности БСА) во всех случаях получался синхронным с периодом суммированием импульсов. Компенсация меры дисперсии проводилась суммированием импульсов в отдельных частотных каналах с учетом временной задержки, возникающей при прохождении радиосигналов разных частот через межзвездную среду. МПИ в локальной шкале времени (на радиотелескопе) определялись путем нахождения максимума кросс-корреляции эталонного (шаблонного) профиля пульсара с суммарным за каждый сеанс наблюдений импульсом, полученным из 464 индивидуальных импульсов пульсара. Шаблонный профиль был получен нами суммированием 676 средних за сеанс импульсов пульсара с высоким отношением сигнал/шум (т.е. всего из 313 664 индивидуальных импульсов). Один и тот же шаблон использовался для обработки данных всех сеансов наблюдений, проведенных на ЦАС на БСА в 2011–2022 гг. МПИ суммарного импульса пульсара при использовании такого метода очевидно имеет фазовый сдвиг, зависящий от используемого шаблона (который часто является различным для рядов, полученных на разных телескопах и разными авторами). Это создает проблему объединения разнородных массивов МПИ. При наличии большого временного разрыва между частями ряда МПИ и отсутствии характеристик использованного при их получении шаблона неопределенный фазовый сдвиг между частями ряда может привести к ошибочным определениям параметров пульсаров. В нашем случае устранение фазового сдвига (сшивки) рядов JPL и БСА осуществлялось путем минимизации среднеквадратичных отклонений ОУ МПИ их перекрывающихся по времени фрагментов. В частности, ряды JPL и БСА перекрываются

на промежутке с 1978 по 1983 г., ряды БСА, полученные на АС и на ЦАС — с 2011 по 2012 г. Ошибка, возникающая при таком подходе, много меньше, чем характерная амплитуда исследуемых нами вариаций ОУ МПИ, и не влияет на полученные результаты. Пульсар В0329+54 обладает двумя модами излучения, нормальной и аномальной, число импульсов от которых соотносится приблизительно как 4 к 1, а их МПИ отличаются примерно на 1 мс. Так как время излучения в одной моде у этого пульсара много больше типичного времени сеанса наблюдений (около 330 с для БСА), в ходе каждого сеанса обычно накапливаются импульсы в одной моде. В нашей работе использовались только МПИ, полученные в нормальной моде излучения.

3. АНАЛИЗ МПИ ПУЛЬСАРА В0329+54

Ранее найденные у данного пульсара гармонические вариации ОУ МПИ были сначала проинтерпретированы как следствие возможного наличия на орбите В0329+54 планеты с периодом обращения 1105 дней (Демьянски, Прошински, 1979). Необычный ход ОУ МПИ данного пульсара, проявившийся при наблюдениях на более длительных временных интервалах, привел к предположению, что вокруг него обращается еще один компаньон малой массы $m_c \sin i \approx 2 M_\oplus$ (в предположении, что масса пульсара имеет типичное значение $m_p = 1.4 M_\odot$) с периодом в 16.9 лет (Шабанова, 1995). Последующие исследования (Конацки и др., 1999) показали отсутствие обеих периодичностей в 16.9 лет и 1105 дней в МПИ при анализе данных на временном интервале 1968–1998 г. Позднее (Старовойт, Родин, 2017) на основе анализа рядов JPL, ПРАО и наблюдений в Калязинской обсерватории (на частоте 600 МГц) вновь был обнаружен “большой” орбитальный период, равный 27.8 годам, дана та же оценка массы его компаньона, что в работе (Шабанова, 1995), и не подтвержден период в 1105 дней. Отметим, что в обеих работах (Шабанова, 1995; Старовойт, Родин, 2017) ряд МПИ охватывал примерно 1.6 предполагаемого орбитального периода. В работе Конацкого и др. (1999) имеется большой разрыв данных с 1984 по 1994 г., а корректность фазовой привязки двух частей ряда вызывает определенное сомнение из-за длительного (около 10 лет) разрыва в наблюдаемых данных.

В табл. 1 приведены оценки основных параметров пульсара и гипотетической планетной системы, дававшиеся ранее разными авторами. В правом столбце указаны орбитальные параметры, проверяемые нами и использованные при дальнейшем расчете ОУ МПИ.

В обеих работах (Шабанова, 1995; Старовойт, Родин, 2017) для определения параметров гипотетической планеты использовался стандартный способ уточнения параметров пульсаров по МНК путем вариации их начальных значений, включающих орбитальные (кеплеровские) параметры планетной системы. Очевидная потенциальная проблема такого подхода заключается в том, что наличие производных частоты собственного вращения пульсара ν и эффект орбитального движения могут сходным образом проявляться в его МПИ. В частности, наличие у пульсара производных частоты собственного вращения до $\ddot{\nu}$ включительно, не учтенных в модели, проявляется на графике ОУ МПИ в виде полинома третьей степени по времени. Для времени наблюдений $T_{\text{obs}} \leq 1.6 P_{\text{orb}}$ этот эффект может быть трудно отличим от эффекта, возникающего из-за орбитального движения пульсара. Таким образом, при формальном применении метода наименьших квадратов для уточнения параметров, мы можем получить для некоторых из них (в частности, орбитальных) бессмысленные значения, несмотря на то что рассчитанные с их использованием среднеквадратичные отклонения ряда ОУ МПИ будут уменьшаться.

Чтобы избежать подобной ошибки, желательно иметь возможность провести обработку ряда длительностью хотя бы в два орбитальных периода. В этом случае определение орбитальных параметров становится более надежным, так как вызванный орбитальным движением ход ОУ МПИ уже не может быть удовлетворительно смоделирован при использовании производных до $\ddot{\nu}$. Формальное применение в модели для вычисления МПИ производных ν более высоких порядков (так называемое выбеливание ряда) позволяет при подходящем подборе коэффициентов при производных ν смоделировать квазигармонический ход ОУ МПИ по времени (характерный для орбитального движения). Однако такой подход, очевидно, лишен физического смысла. Применение неправильных, но формально удовлетворяющих критериям МНК на ограниченном временном интервале параметров пульсара, приведет к резкому увеличению среднеквадратичных отклонений ОУ МПИ на более длительном временном интервале, что и служит критерием адекватности модели. В некоторых случаях использование неадекватных значений параметров (включая орбитальные) может привести к так называемой потере фазы (росту значений ОУ МПИ до величин, намного превосходящих период собственного вращения пульсара).

Для проверки гипотезы о наличии планеты вокруг В0329+54 мы использовали объединенный ряд геоцентрических МПИ JPL и топоцентрических МПИ ПРАО, полученный по алгоритму, описанному в разделе 2. Общая продолжительность

Таблица 1. Параметры гипотетической планетной системы вокруг пульсара B0329+54

Параметр	$P_{\text{orb}} \approx 3$ года (Демьянски, Прошински, 1979)	$P_{\text{orb}} \approx 16.9$ лет (Шабанова, 1995)	$P_{\text{orb}} \approx 27.8$ лет (Старовойт, Родин, 2017), данная статья
Орбитальный период P_b (дни)	1105(25)	6160(60)	10 140(11)
Проекция большой полуоси орбиты пульсара $a_p \sin i$ (мс)	1.201(142)	17.7(4)	21.58(14)
Эксцентриситет e	0	0.23(2)	0.236(11)
Эпоха прохождения периастра T_0 (MJD)	41 139(30)	41 056.5(60.0)	47 708(50)*
Долгота периастра ω ($^\circ$)	—	269(3)	240(5)*
Оценка массы планеты $m_c \sin i^{**} (M_\oplus)$	0.3(1)***	$\simeq 2$	1.97(19)
Оценка большой полуоси орбиты планеты a^{**} (AU)	2.3(1)***	7.3(1)	10.26(07)

* Параметры отсутствуют в (Старовойт, Родин, 2017) и вычислены авторами данной статьи непосредственно из рядов МПИ.

** Оценка сделана в предположении, что масса пульсара равна $1.4 M_\odot$ (Шабанова, 1995) или $1.44 M_\odot$ (Старовойт, Родин, 2017).

*** Оценка из (Шабанова, 1995).

Примечание. Везде в круглых скобках указана ошибка измерения (последние значащие цифры), указанная авторами работ.

ряда составляет около двух периодов обращения гипотетической планеты вокруг пульсара и, таким образом, может служить для уверенной проверки гипотезы о ее существовании. Нами были использованы в качестве начальных параметры пульсара из работы (Старовойт, Родин, 2017). Мы не приводим здесь результат обработки ряда МПИ с параметрами из работы (Шабанова, 1995), так как этот результат уже был “закрыт” более ранними работами ряда авторов (см. выше) и его дальнейшего обсуждения не представляет интереса.

Суммарный ряд МПИ за 1968–2022 гг. был обработан по стандартному алгоритму хронометрирования (тайминга) одиночных и двойных пульсаров (Дамур, Деруэлл, 1986; Дорошенко, Копейкин, 1990) с использованием программы фазового анализа timarg405 (ПРАО) и эфемерид DE405 JPL. Наблюдаемые МПИ были редуцированы нами в барицентр Солнечной системы с использованием параметров пульсара и двойной системы, которые приведены в табл. 1 (последний столбец) и табл. 2. При наличии планеты и использовании только вращательных и астрометрических параметров мы должны были бы, очевидно, получить квазигармоническую кривую хода барицентрических ОУ МПИ. Эта кривая модулируется эффектами Рёмера и Допплера, вызванными движением пульсара в двойной системе, и содержит два полных периода в 10 140 дней с амплитудой около 25 мс. При использовании для моделирования также орбитальных параметров из табл. 1 следует ожидать существенного уменьшения “размаха” ОУ МПИ

на графике в сравнении с графиком для модели без учета орбитального движения.

На рис. 1 нами приведен полученный в результате обработки данных, использованных в (Ста-

Таблица 2. Параметры пульсара B0329+54

Параметр	Значение
α , ($^h m s$)	03 32 59.373(1)
δ , ($^\circ ' ''$)	54 34 43.49(2)
μ_α (0.001'')	17(1)
μ_δ (0.001'')	−10(1)
ν (с^{-1})	1.3995410093399(14)
$\dot{\nu}$ (с^{-2})	$-4.0114433(2) \times 10^{-15}$
$\ddot{\nu}$ (с^{-3})	$3.37(2) \times 10^{-27}$
P_{epoch} (MJD)	48 000
DM (пк см^{-3})	27.776(1)*

* Параметр взят из каталога ATNF (Манчестер и др., 2005, 2023)

Примечание. Параметры взяты из (Старовойт, Родин, 2017). Обозначения: α, δ — склонение и прямое восхождение в эпохе 2000, μ_α, μ_δ — собственные движения, $\nu, \dot{\nu}, \ddot{\nu}$ — частота собственного вращения пульсара и ее производные, P_{epoch} — эпоха определения частоты собственного вращения, DM — мера дисперсии.

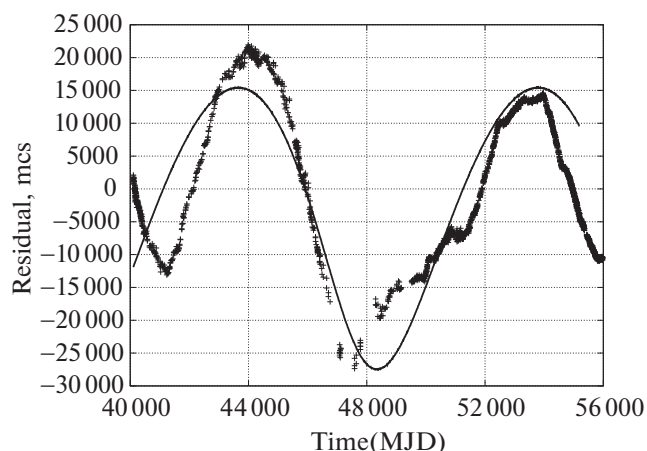


Рис. 1. Ход остаточных уклонений МПИ B0329+54. По оси X — МПИ в модифицированных юлианских днях, по Y — остаточные уклонения МПИ в микросекундах. Наблюдательные данные показаны крестиками (использованы параметры из табл. 2), модель двойной системы с параметрами из табл. 1 (последний столбец) и табл. 2 — сплошной линией.

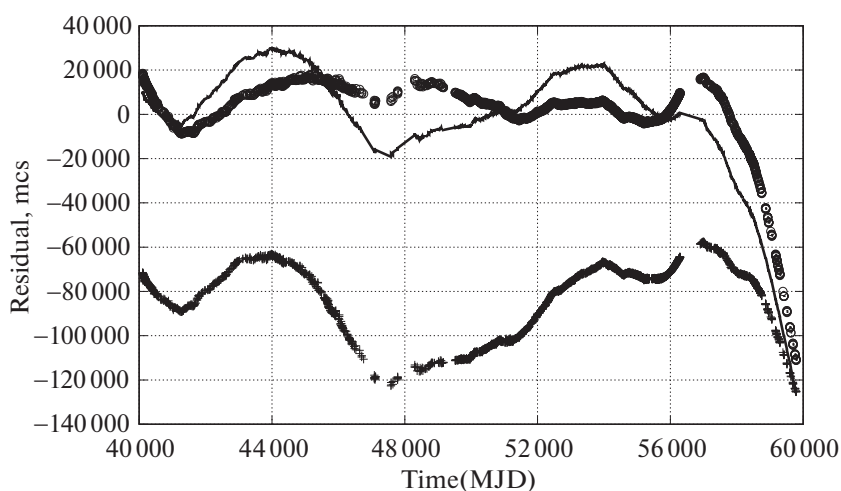


Рис. 2. Ход остаточных уклонений МПИ B0329+54 на всем интервале наблюдений. По оси X — МПИ в модифицированных юлианских днях, по Y — остаточные уклонения МПИ в микросекундах. Верхние графики приведены с параметрами из табл. 1 (последний столбец) и табл. 2. Графики приведены для моделей с учетом (кружки) и без учета (сплошная линия) гипотетической планеты. Нижний график (крестики, для удобства смещен по оси Y на -80 мс) — ОУ МПИ после уточнения астрометрических и вращательных параметров (до $\dot{\gamma}$ включительно) по МНК на всем доступном временном интервале (без модели планеты).

ровойт, Родин, 2017), ряд ОУ барицентрических МПИ, который совпадает (с точностью до фазы МПИ), с графиком на рис. 1 из той же работы. График в иллюстративных целях построен без вычитания вариаций МПИ, обусловленных орбитальным движением в двойной системе, также приведена модельная кривая хода ОУ МПИ пульсара в гипотетической двойной системе. Как можно видеть, кривые на графике удовлетворительно соответствуют друг другу на данном временном интервале.

На рис. 2 приведены графики ОУ МПИ на всем доступном нам временном интервале. Легко видеть, что квазигармоническая составляющая исчезает из рядов ОУ МПИ после $MJD \approx 56\,000$, и ряд начи-

нает быстро расходиться, что свидетельствует о том, что модель планеты с периодом 27.8 лет не может адекватно описать результаты наблюдений на всем временном интервале. Также на графике показан ход ОУ МПИ только с астрометрическими и вращательными параметрами, уточненными нами по МНК на всем временном интервале. Легко видеть, что последняя модель одиночного пульсара, по меньшей мере, не хуже описывает наблюдаемый ход ОУ МПИ, чем модель планетной системы, использованная в (Старовойт, Родин, 2017).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании опубликованных и независимо полученных авторами из собственных наблюдений рядов МПИ были исследованы результаты хронометрирования (тайминга) пульсара B0329+54 на временном интервале около 54 лет.

Ряды ОУ МПИ B0329+54 продемонстрировали необычный ход, содержащий квазипериодические вариации с характерными временами от 3 до более чем 27 лет. Предположения о стабильных вариациях МПИ с периодами ≈ 3 и ≈ 17 лет на длительном временном интервале, которые могли быть проинтерпретированы как наличие планет вокруг этого пульсара, были опровергнуты ранее на основании проведенных рядом авторов наблюдений.

Нами было проверено сделанное в (Старовойт, Родин, 2017) утверждение о наличии у B0329+54 планеты с массой около $2 M_{\oplus}$ и периодом ≈ 27.8 года. Были проанализированы ОУ МПИ пульсара на всем доступном временном интервале длительностью около 54 лет (около 2 периодов гипотетической планеты). Нами был сделан вывод об отсутствии у пульсара планеты с указанными параметрами. Таким образом, вопрос о природе квазипериодических вариаций МПИ от пульсара B0329+54 остается открытым.

Отметим, что схожие с найденными у B0329+54 квазипериодические вариации МПИ ранее были отмечены у некоторых секундных пульсаров (см., например, Хоббс и др., 2010; Шабанова, 2013). Интерпретация подобных ходов МПИ на многолетних интервалах времени вызывает большие затруднения. Для их объяснения рядом авторов использовались различные модели. В частности, следует упомянуть модели прецессии (Шабанова и др., 2001) или “медленных глитчей” (Шабанова, 2009) у пульсара B1642-03, предположение о наличии планет у B0943+10 (Старовойт, Сулейманова, 2019) и у B0525+21 (Родин, 2019). Во многих случаях авторы вынужденно довольствуются феноменологическим описанием наблюдаемых вариаций (“пульсарный шум”), ограничиваясь качественным описанием наблюдаемого хода МПИ (Хоббс и др., 2010).

Авторы выражают благодарность А.Н. Казанцеву (ПРАО, MPIfR) за помощь в подготовке

наблюдений, С.В. Логвиненко и К.А. Лапаеву (ПРАО) за помощь в их проведении, В.Д. Пугачеву (ПРАО) за работу по систематизации и сохранению архива наблюдений по программе хронометрирования на радиотелескопе БСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайсберг и др. (J.M. Weisberg, J.H. Taylor, and L.A. Fowler), *Scientific American*, **245**, 74 (1981).
2. Вольжан, Фрейл (A. Wolszczan and D. Frail), *Nature* **355**, 145 (1992).
3. Дамур, Деруэлл (T. Damour and N. Deruelle), *Annales de l'I. H. P., section A* **44**, 263 (1986).
4. Даунс, Крайзе-Полстофф (G.S. Downs and J. Krause-Polstoff), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **62**, 81 (1986).
5. Демьянски, Прошински (M. Demianski and M. Proszynski), *Nature* **282**, 383 (1979).
6. Дорошенко О.В., Копейкин С.М., *Астрон. журн.* **68**, 986 (1990).
7. Конацки, Вольжан (M. Konacki and A. Wolszczan), *Astrophys. J.* **591**, 147 (2003).
8. Кордс (J.M. Cordes), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **36**, 43 (1993).
9. Манчестер и др. (R.N. Manchester, G.B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs), *Astron. J.* **129**, 1993 (2005), ATNF CSIRO Pulsar Catalogue, v.1.70 <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat> (2023).
10. Родин А.Е., *Астрон. журн.* **96**, 241 (2019).
11. Старовойт Е.Д., Сулейманова С.А., *Астрон. журн.* **96**, 305 (2019).
12. Старовойт Е.Д., Родин А.Е., *Астрон. журн.* **94**, 944 (2017).
13. Хоббс и др. (J. Hobbs, A.G. Lyne, and M. Kramer), *MNRAS* **402**, 1027 (2010).
14. Хьюиш и др. (A. Hewish, S.J. Bell, J.D.H. Pilkington, P.F. Scott, and R.A. Collins), *Nature* **217**, 709 (1968).
15. Шабанова (T.V. Shabanova), *Astrophys. J.* **453**, 779 (1995).
16. Шабанова (T.V. Shabanova), *Astrophys. J.* **700**, 1009 (2009).
17. Шабанова (T.V. Shabanova), *Astrophys. J.* **775**, 2 (2013).
18. Шабанова и др. (T.V. Shabanova, A.G. Lyne, and J.O. Urama), *Astrophys. J.* **552**, 321 (2001).