

## ПОИСК ВРАЩАЮЩИХСЯ РАДИОТРАНЗИЕНТОВ В ПУЩИНСКОМ МНОГОЛУЧЕВОМ ОБЗОРЕ

© 2023 г. С. А. Тюльбашев<sup>1\*</sup>, М. А. Китаева<sup>1</sup>,  
Е. А. Брылякова<sup>1</sup>, В. С. Тюльбашев<sup>2</sup>, Г. Э. Тюльбашева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича, ПРАО АКЦ ФИАН, Московская обл., Пушкино, Россия

<sup>2</sup>ООО Яндекс, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт математических проблем биологии РАН — филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Московская обл., Пушкино, Россия

Поступила в редакцию 09.08.2023 г.

После доработки 14.09.2023 г.; принята к публикации 14.09.2023 г.

Проведен поиск импульсного излучения на частоте 111 МГц в направлении 116 RRAT кандидатов. Для поиска использовались архивные данные, полученные на меридианном 128-лучевом радиотелескопе Большая Синфазная Антенна. Для каждого кандидата накоплено около шести суток наблюдений на интервале восьми лет. Обнаружено одиннадцать новых RRAT. Для шести из них удалось оценить периоды, а для четырех — построить средние профили. Часть кандидатов оказались известными пульсарами, наблюдаемыми в боковых лепестках радиотелескопа, и помехами. Для части кандидатов не удалось найти импульсов, имеющих отношение сигнала к шуму больше семи, и их природа остается не известной.

*Ключевые слова:* вращающиеся радиотранзиенты (RRAT).

**DOI:** 10.31857/S0320010823090061, **EDN:** OHRCYD

### ВВЕДЕНИЕ

Вращающиеся радиотранзиенты (RRAT) — это особый вид пульсаров, открытый МакЛафлин и др. (2006) при поиске диспергированных импульсов (импульсов регистрируемых сначала на высоких, а затем на низких частотах). Особенность RRAT заключается в том, что, в отличие от классических секундных пульсаров, время появления очередного импульса непредсказуемо, а между последовательными импульсами может пройти от десятков секунд до десятков часов (МакЛафлин и др., 2006; Логвиненко и др., 2020). Для поиска RRAT используются, как правило, прямые методы поиска импульсов с перебором возможных мер дисперсии ( $DM$ ) и возможных ширин импульсов.

Согласно Кван (2008), количество RRAT в Галактике должно быть в два раза больше количества обычных секундных пульсаров. В каталогах, содержащих RRAT (<https://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>; <http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/>; <https://bsa-analytics.prao.ru/en/transients/rrat/>), а также в свежих работах числится примерно

250 RRAT. Из последних работ отметим препринт 2023 г., в котором опубликовано 76 RRAT, найденных на 500-м телескопе FAST (Чжоу и др., 2023). В пульсарном каталоге ATNF (Манчестер и др., 2005) находится почти 3400 пульсаров, и это означает, что доля транзиентов меньше 10% от общего количества пульсаров. Очевидно, что существует большой дефицит RRAT.

Однозначного понимания природы RRAT пока нет. Есть ряд феноменологических гипотез, объясняющих наблюдаемые свойства RRAT (Велтевреде и др., 2006; Жан и др., 2007; Ванг и др., 2007; Брылякова, Тюльбашев, 2021; Тюльбашев и др., 2021). При исследованиях RRAT выяснилось, что часть из них являются пульсарами, у которых распределение импульсов по энергиям является логнормальным с большими отклонениями энергии импульсов от среднего значения. Таким образом, их распределение импульсов по энергиям имеет длинный “хвост”. Для таких транзиентов наблюдатели видят самые яркие импульсы с “хвоста” распределения, но не детектируют регулярное (периодическое) излучение из-за недостаточной чувствительности за сеанс наблюдений.

\*Электронный адрес: [serg@prao.ru](mailto:serg@prao.ru)

Часть транзиентов являются, по-видимому, пульсары с гигантскими импульсами. Для пульсаров с гигантскими импульсами характерно степенное распределение импульсов на хвосте распределения. Именно степенное распределение импульсов зарегистрировано у ряда RRAT. Это говорит о вероятном обнаружении гигантских импульсов. Для таких RRAT наблюдатели могут регистрировать гигантские импульсы, но не способны увидеть регулярное излучение. Очевидно, что для пульсаров с длинным хвостом распределения импульсов по энергиям и пульсаров с гигантскими импульсами при длительных сеансах наблюдений должен накапливаться средний профиль.

Часть транзиентов — это пульсары с большой долей нуллингов, т.е. с большим количеством пропусков импульсов. У пульсаров с нуллингами между отдельными импульсами регулярное излучение отсутствует, и поэтому пульсары с высокой долей нуллинга не обнаруживаются стандартными способами поиска периодических сигналов. Для пульсаров с большой долей нуллингов при длительных сеансах наблюдений средний профиль накопить нельзя.

Существуют также включающиеся пульсары. У них наблюдаются периоды активности, сменяемые периодами отсутствия импульсов. Если периоды активности небольшие, то при стандартном поиске с помощью спектров мощности или периодограмм такие пульсары могут быть пропущены.

Специальные исследования проведены лишь для пары десятков ярких RRAT с сотнями и тысячами найденных импульсов (см., например, Рейнолдс и др., 2006; Карастергиу и др., 2009; Киан и др., 2011; Паллиягуру и др., 2011; Баттачария и др., 2018; Брылякова, Тюльбашев, 2021; Смирнова и др., 2022; Чен и др., 2022; Хсу и др., 2023; Жан и др., 2023). Из-за малого числа исследованных RRAT не исключены эффекты селекции, так как для слабых RRAT трудно определить их природу и, соответственно, их долю в общем количестве транзиентов.

Изучать RRAT трудно по двум причинам. Во-первых, непредсказуемость появления импульсов по времени приводит к необходимости выделения большого наблюдательного времени для их исследования. Во-вторых, импульсы RRAT в целом слабые, поэтому, помимо наблюдательного времени, нужны еще и телескопы, обеспечивающие самую высокую чувствительность. Так, в исследовании транзиентов J1538+2345, J1854+0306, J1913+1330 на телескопах диаметром 64, 76, 100, 300 м (Паркс, Джодрел-Бэнк, Грин-Бэнк, Аресибо) и на распределенной интерферометрической системе LOFAR регистрировалось от единиц до десятков импульсов в час. При этом наблюдения на

500-м телескопе FAST (Гуайчжоу) этих же транзиентов показывают темп прихода импульсов от 1.5 до 100 раз больше (Лу и др., 2019).

Всего в Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) в ряде проведенных поисков было обнаружено 48 RRAT (<https://bsa-analytics.prao.ru/en/transients/rfat/>). При этом в ходе прошедших поисков часть кандидатов была нами отброшена, так как отношение сигнала к шуму (СШ) в их профиле оказалось меньше шести. Для визуального поиска импульсов мы строили динамические спектры, т.е. рисунки, на которых по вертикальной шкале представлена частота, а по горизонтальной — время. Плотность потока на спектрах отображается в отдельных пикселях рисунка оттенками цвета от белого до черного. Яркий импульс на динамическом спектре виден как диагональная полоска, а наклон этой полоски определяется квадратичной зависимостью времени прихода импульса от частоты и говорит о мере дисперсии ( $DM$ ). После компенсации  $DM$  и сложения всех частотных каналов можно получить профиль импульса. Для слабых импульсов в динамическом спектре не видно диагональной полоски, тогда как профиль импульса все еще хорошо различим. В настоящей работе мы говорим о проверке, проведенной для ранее найденных слабых импульсов в архивных данных, накопленных за восемь лет.

## НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

В 2012 г. закончилась модернизация радиотелескопа БСА (Шишов и др., 2016), и появилась возможность реализовать четыре независимых радиотелескопа на базе одного антенного поля. Сейчас в ПРАО работают два радиотелескопа, на одном из которых (БСА3) с августа 2014 г. проводятся круглосуточные ежедневные наблюдения в 96 пространственных лучах, выстроенных вдоль плоскости меридиана. С 2022 г. на БСА3 одновременно наблюдаются 128 лучей, покрывающих площадку на небе  $\approx 50$  кв. град. Мониторинговые наблюдения на БСА3 проводятся на частоте 111 МГц, в полосе 2.5 МГц, разделенной на 32 частотных канала шириной 78 кГц. Длительность записи источника определяется размером диаграммы направленности БСА и зависит от склонения. Так, как БСА — это меридианный инструмент, любой источник на небе может наблюдаться один раз в сутки. Длительность записи в направлении на зенит — примерно 3.5 мин за одну сессию, что соответствует времени накопления в каждой точке на небе около шести суток за восемь лет наблюдений. Время опроса точки равно 12.5 мс. Данные, получаемые в 32-канальном режиме, используются для поиска

пульсаров и транзиентов (Тюльбашев и др., 2016, 2018a).

Согласно работе Тюльбашев и др. (2018a), чувствительность БСА3 при поиске импульсного радиоизлучения примерно равна 2.1 Ян для СШ, равного семи, если длительность импульса совпадает с временным интервалом оцифровки сигнала. Так как наблюдаемые ширины импульса RRAT могут быть 40–50 мс (Тюльбашев и др., 2018б), для части RRAT с широкими импульсами чувствительность можно улучшить до одного янского, если усреднять исходные данные перед поиском импульсов.

Объем накопленных с 2014 г. мониторинговых данных приближается к 250 терабайтам, поэтому основными проблемами при обработке наблюдений являются быстрый доступ к данным и скорость обработки. В 2022 г. в обсерватории появилось два сервера, имеющих дисковые полки по 24 диска. На полках реализованы рейд массивы. Каждый из серверов на настоящий момент времени имеет оперативную память два терабайта. Часть оперативной памяти резервируется под виртуальные диски, на которые записываются промежуточные результаты счета. На жесткие диски записываются конечные результаты обработки данных, которые занимают незначительные объемы памяти. Сервера позволили организовать как быстрый доступ к данным, так и максимально быструю обработку.

Для проверки было выбрано 116 кандидатов, находящихся на склонениях  $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ . Все кандидаты показывают признаки RRATs: высота профиля импульса СШ  $\sim 5$ –6, каждый кандидат наблюдается в одном луче, в записях не видно явных помех, на динамических спектрах наблюдаются признаки диспергированных импульсов, т.е. видны пиксели черного цвета, располагающиеся вдоль диагональной линии. Для всех кандидатов имелись оценки координат, ширины импульса, меры дисперсии из ранее проведенных поисков.

При поиске диспергированного сигнала в направлении RRAT кандидата выполнялся ряд стандартных процедур: проводилось вычитание базовой линии в каждом частотном канале; делался перебор мер дисперсии вблизи ожидаемой с последующим сложением частотных каналов; определялись среднеквадратичные отклонения шума ( $\sigma_n$ ) в направлении кандидата; определялась амплитуда сигнала ( $A$ ) для каждой проверяемой  $DM$ ; запоминались сигналы, имеющие СШ  $> 6$  (СШ =  $A/\sigma_n$ ); проводился перебор разных ширины импульсов, предполагая, что ширина профиля импульса может быть 1, 2, 4, 8, 16 точек (12.5–200 мс). Для каждой перебираемой ширины проводились все стандартные процедуры, описанные выше. Для всех найденных импульсов проводился визуальный контроль динамических спектров и профилей импульсов. Помимо контроля помех,

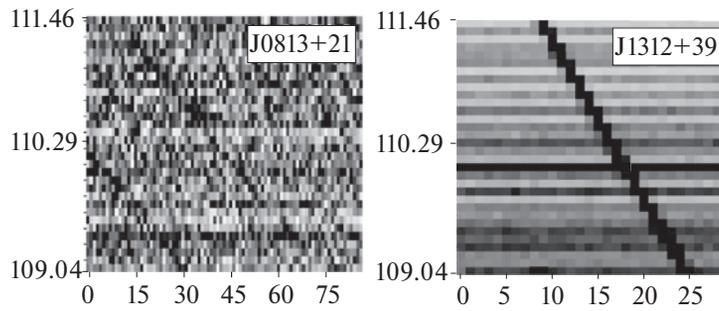
визуальный просмотр позволяет обнаруживать дополнительные импульсы, имеющие СШ  $< 6$ . Эти импульсы использовались для уточнения периода пульсаров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

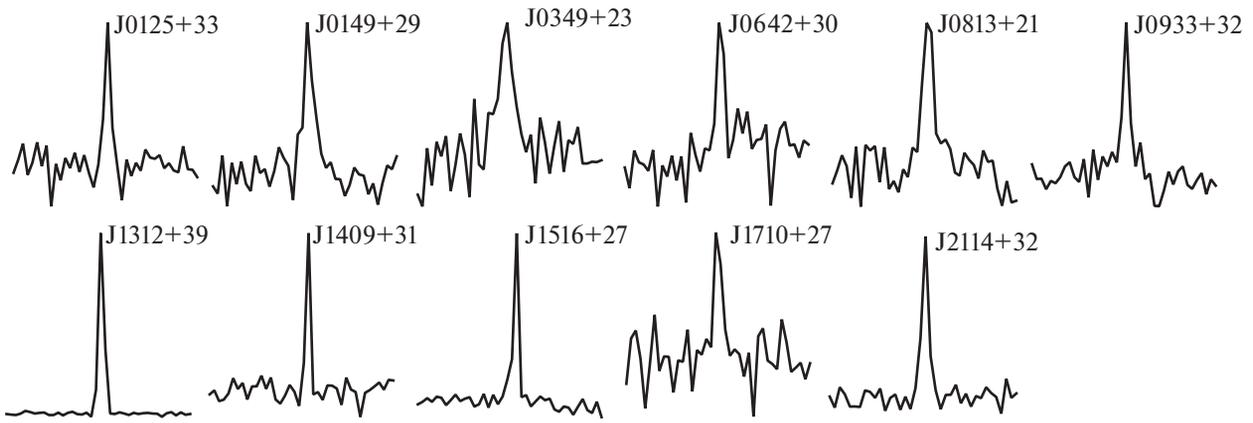
При визуальной проверке оказалось, что для 69 кандидатов из 116 (59.4%) не удалось найти импульсы с СШ  $> 6$ . Их природа осталась неясной. 21 кандидат (18.1%) показывает сигнал с дисперсионной задержкой, но этот сигнал наблюдается меньше чем в половине частотных каналов, и линия дисперсионной задержки не подчиняется квадратичной зависимости времени прихода импульса от частоты. По-видимому, эти сигналы связаны с помехами неизвестной природы. 15 источников (12.9%) отождествлены с яркими пульсарами, наблюдаемыми в дальних боковых лепестках антенны. Например, у кандидатов J1505+4207, J1506+35, J1508+28, J1511+30, J1511+34 найдено несколько тысяч импульсов с одинаковой  $DM$ . Все эти кандидаты отождествлены с ярким пульсаром J1509+5531 (B1508+55), находящимся за пределами исследуемой площадки ( $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ ) и имеющим прямое восхождение, близкое с найденными кандидатами. Учитывая, что B1508+55 ранее уже обнаруживался десятки раз в других боковых лепестках, можно быть уверенными в том, что он вновь обнаружен в дальних боковых лепестках БСА.

Одиннадцать кандидатов (9.5%) оказались новыми RRAT. Примеры динамических спектров двух RRAT приведены на рис. 1. У транзиента J0813+21 видны два импульса, находящихся на расстоянии 42 пикселя (525 мс). На динамическом спектре J1312+39 показан очень яркий импульс, который был ярчайшим для всех 11-ти найденных транзиентов. На сайте (<https://bsa-analytics.prao.ru/en/>) по поиску пульсаров и транзиентов на БСА ФИАН приведены динамические спектры всех найденных транзиентов. На рис. 2 показаны профили импульсов найденных RRAT.

В табл. 1 приведены измеренные параметры найденных RRAT. В столбцах 1–3 даны имя и координаты транзиентов на 2000 г., в столбцах 4–9 приведены период (если определен), мера дисперсии, полуширина среднего профиля ( $W_e$ ), наблюдаемая пиковая плотность потока ( $S_p$ ) для ярчайшего импульса, СШ импульса, количество ( $N$ ) импульсов с СШ  $> 7$ . Точность координат по прямому восхождению определялась как половина размера диаграммы направленности ( $\pm 1.7^m$ ), точность координат по склонению — половина расстояния между соседними лучами ( $\pm 15'$ ). Период определялся как наибольший общий временной интервал при наблюдении нескольких импульсов



**Рис. 1.** Динамические спектры двух новых транзиентов. По горизонтальной оси время. Одна точка соответствует 12.5 мс. По вертикали частота измерений в МГц.



**Рис. 2.** Профили импульсов RRAT. В правом верхнем углу профиля отображено имя транзиента. Другие характеристики приведенных импульсов:  $P$ ,  $DM$ ,  $W_e$  и  $S_p$  в табл. 1. Для каждого профиля длительность записи 0.5 с.

в день либо из спектров мощности. Настоящий период может быть в целое число раз меньше значения, указанного в таблице. Типичная точность определения периода равна 0.005 с. Для определения  $DM$  строилась зависимость СШ импульса от перебираемой  $DM$ . Точность определения  $\pm 2.0$  пк/см<sup>3</sup>. Полуширина профиля определялась на половине высоты импульса. Пиковая плотность потока определялась из температуры фона в направлении транзиента и наблюдаемого СШ. При получении оценки учитывались зенитное расстояние источника и поправка за отклик сигнала в луче. Почти для всех транзиентов оценка  $S_p$  является нижней оценкой плотности потока импульса, так как нам неизвестна точная координата транзиента, и нет возможности сделать поправки, учитывающие попадание транзиента не по центру диаграммы направленности. Точные поправки были сделаны для J0813+21 и J0933+32, так как у них известны координаты из ATNF, а также для J1312+39, импульсы от которого наблюдаются в двух соседних лучах практически на одинаковых СШ. Реальные

пиковые плотности потока импульсов для оставшихся транзиентов могут быть до 1.5–2 раз больше значений, приведенных в табл. 1.

Звездочкой в табл. 1 отмечены транзиенты J0149+29, J0813+21, J0933+32, у которых ранее отмечалось регулярное излучение. RRAT J0149+29 ( $DM = 34.5$  пк/см<sup>3</sup>;  $P = 2.654$  с) обсуждается в нашей работе по поиску пульсаров, находящейся на рецензии (Тюльбашев и др., послана в MNRAS). В табл. 1 мы приводим значение периода из этой работы. Пульсар J0813+22 ( $DM = 52.29$  пк/см<sup>3</sup>;  $P = 0.5314$  с) найден в обзоре LOTAAS, проведенном на частоте 135 МГц на LOFAR (Санидас, 2019). Авторы приводят средний профиль с наблюдаемым СШ  $\simeq 5-6$ , но не отмечают обнаружение отдельных импульсов, хотя поиск диспергированных импульсов ими проводился. Период, приведенный в таблице, определен независимо, как расстояние между регистрируемыми импульсами. Пульсар J0935+33 ( $DM = 18.35$  пк/см<sup>3</sup>;  $P = 0.9615$  с) был обнаружен на БСАЗ ранее (Тюльбашев и др., 2017),

Таблица 1. Некоторые характеристики найденных RRAT

Имя	$\alpha_{2000}^{(h,m,s)}$	$\delta_{2000}^{(o,')}$	$P$ , с	$DM$ , пк/см <sup>3</sup>	$W_e$ , мс	$S_p$ , Ян	$S/N$	$N$
J0125+33	01 25 50	33 10	—	21.0	15	3.3	9.6	3
J0149+29*	01 49 00	29 12	2.654	36.5	30	3.1	8.5	3
J0349+23	03 49 30	23 42	—	58.5	40	2.9	8.0	4
J0642+30	06 42 50	30 37	1.4114	39.5	25	2.7	8.1	1
J0813+21*	08 13 30	21 54	0.531	51.5	35	3.1	6.7	4
J0933+32*	09 33 10	32 54	0.9616	18.0	25	8.5	10.2	1
J1312+39	13 12 40	39 56	—	12.5	15	165	210	3
J1409+31	14 09 50	31 35	—	8.0	20	4.2	12.1	4
J1516+27	15 16 20	27 59	1.125	14.5	20	12.8	29.4	24
J1710+27	17 10 20	27 01	—	17.5	25	3.1	8.4	1
J2114+32	21 14 10	32 18	0.597	25.5	20	4.7	10.7	2

но его отдельные импульсы не регистрировались. Приводимый в таблице период определен по расстоянию между отдельными импульсами. Отметим также, что по формальным критериям источник J0813+21 необходимо исключить из табл. 1, так как его ярчайший импульс имеет СШ  $< 7$ . Однако совпадение координат,  $DM$  и  $P$  с известным пульсаром позволяет оставить его в таблице.

Для найденных транзиентов был проведен поиск регулярного (периодического) излучения. Средние профили удалось получить для четырех RRAT (см. рис. 3).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для транзиентов J0642+30 и J1516+27 построены средние профили по данным в одной наблюдательной сессии. При этом их периодическое излучение не было обнаружено в поиске пульсаров с помощью суммированных спектров мощности, который проводился на интервале восемь лет (Тюльбашев и др., послана в MNRAS). Чувствительность в поиске PUMPS в 35–40 раз выше чувствительности в одной наблюдательной сессии, и достигает 0.2 мЯн (Тюльбашев и др., 2022). В представленных средних профилях пиковая и интегральная плотности потока у J0642+30 и J1516+27 соответственно  $S_{p1} = 220$  и 430 мЯн,  $S_{int} = 9$  и 20 мЯн. Так как средние профили были накоплены в трехминутных сессиях, и при этом

J0642+30 и J1516+27 не обнаружены при усреднении спектров за 3000 дней по одной сессии в день, то у этих RRAT должна наблюдаться очень сильная переменность.

2. У транзиентов J0642+30, J0813+21, J0933+32, J1516+27 наблюдается обычное пульсарное излучение. Отношение пиковой плотности потока ярчайших импульсов и пиковой плотности потока в среднем профиле  $S_p/S_{p1} = 12, 21, 7, 30$ . Мы полагаем, что эти транзиенты являются обычными пульсарами с длинным хвостом распределения импульсов по энергиям, либо пульсарами с гигантскими импульсами (J0813+21, J1516+27). Наблюдения с чувствительностью, в несколько раз превышающей чувствительность БСА3, могут показать это однозначно.

3. Количество найденных импульсов транзиентов с СШ  $> 7$  меняется от 1 до 24. За исключением J1516+27, оно не превышает четырех импульсов, найденных за время, эквивалентное наблюдательной сессии длительностью в шесть суток. Таким образом, для подтверждения этих транзиентов нужно от полутора до шести суток наблюдений для каждого источника на антеннах с чувствительностью, эквивалентной чувствительности БСА3.

4. Наиболее интересный из найденных транзиентов — это RRAT J1312+39. У него обнаружено всего три импульса на СШ  $> 7$ , но все импульсы яркие. Их СШ = 210, 60, 42, а

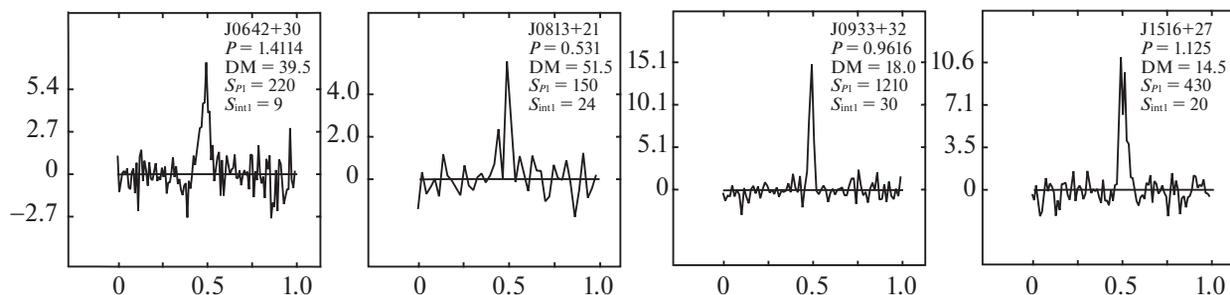


Рис. 3. Средние профили, накопленные в одной сессии за 180 с. По вертикальной оси СШ профиля, по горизонтальной — фаза. В правом верхнем углу средних профилей — имя транзientа,  $P$  (в секундах),  $DM$  (в пк/см<sup>3</sup>),  $S_{p1}$  и  $S_{mit1}$  (в мЯн).

пиковые плотности потока соответственно  $S_p = 165, 46, 33$  Ян. В диапазоне уровня сигнала  $6 < \text{СШ} < 7$  не обнаружено ни одного импульса. При накоплении спектров мощности за 3000 наблюдательных сессий периодический сигнал не обнаруживается. Согласно работе Тюльбашев и др. (2022), верхняя оценка интегральной плотности потока этого транзientа должна быть  $< 0.5$  мЯн, если его период  $0.5 < P < 3$  с. Длинный хвост распределения импульсов по энергиям для этого транзientа маловероятен, так как в этом случае должно наблюдаться тем больше импульсов, чем меньше их СШ. Если J1312+39 является пульсаром с нуллингами, то можно оценить долю нуллингов, предположив период пульсара 1 с и 10 с. В этом случае доля нуллинга будет от 99.999 до 99.994%. У J1312+39 детектирован самый яркий импульс из всех RRAT, найденных на северной полусфере. Ранее самый яркий импульс наблюдался у J0139+33 (40 Ян; Тюльбашев и др., 2018).  $S_p$  импульса транзientа J1312+39 сравнима с оценками  $S_p$  импульсов ярчайших секундных пульсаров, наблюдавшихся ранее в поиске RRAT на БСА3 (Тюльбашев и др., 2018): J1136+1551 (B1113+16; 408 Ян), J1239+2453 (B1237+25; 215 Ян), J0953+0755 (B0950+08; 174 Ян) и J0837+0610 (B0834+06; 107 Ян). За исключением B0834+06, оставшиеся источники находятся в списках пульсаров с гигантскими импульсами (Казанцев, Потапов, 2018).

Главным результатом работы при проверке ранее обнаруженных слабых импульсов в архивных данных, накопленных за восемь лет, является обнаружение 11 новых RRAT. Для шести транзientов оценены периоды. Общее количество найденных RRAT в Пушинском многолучевом обзоре (PUMPS; Тюльбашев и др., 2022) достигло 59.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-12-00236, (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>). Авторы благодарны Л.Б. Потаповой за помощь при оформлении статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баттачария и др. (B. Bhattacharyya, A.G. Lyne, B.W. Stappers, P. Weltevrede, E.F. Keane, M.A. McLaughlin, M. Kramer, C. Jordan, and C. Bassa), *MNRAS* **477**, 4090 (2018).
2. Брылякова, Тюльбашев (E.A. Brylyakova and S.A. Tyul'bashev), *Astron. Astrophys.* **647**, A191 (2021).
3. Ванг и др. (N. Wang, R.N. Manchester, and S. Johnston), *MNRAS* **377**, 1383 (2007).
4. Велтевреде и др. (P. Weltevrede, B.W. Stappers, J.M. Rankin, and G.A.E. Wright), *Astrophys. J.* **645**, L149 (2006).
5. Жан и др. (B. Zhang, J. Gil, and J. Dyks), *MNRAS* **374**, 1103 (2007).
6. Жан и др. (S.B. Zhang, J.J. Geng, J.S. Wang, et al.), *arXiv:2306.02855* (2023).
7. Казанцев, Потапов (A.N. Kazantsev and V.A. Potapov), *Res. Astron. Astrophys.* **18**, 097 (2018).
8. Карастергиу и др. (A. Karastergiou, A.W. Hotan, W. van Straten, M.A. McLaughlin, and S.M. Ord), *MNRAS* **396**, L95 (2009).
9. Киан, Крамер (E.F. Keane and M. Kramer), *MNRAS* **391**, 2009 (2008).
10. Киан и др. (E.F. Keane, M. Kramer, A.G. Lyne, B.W. Stappers, and M.A. McLaughlin), *MNRAS* **415**, 3065 (2011).
11. Логвиненко и др. (S.V. Logvinenko, S.A. Tyul'bashev, and V.M. Malofeev), *Bull. Lebedev Phys. Instit.* **47**, 390 (2020).
12. Лу и др. (J. Lu, B. Peng, K. Liu, et al.), *Sci. China Phys., Mech., and Astron.* **62**, 959503 (2019).
13. МакЛафлин и др. (M.A. McLaughlin, A.G. Lyne, and D.R. Lorimer), *Nature* **439**, 817 (2006).
14. Манчестер и др. (R. Manchester, G. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs), *Astron. J.* **129**, 1993 (2005).
15. Паллиягору и др. (N.T. Palliyaguru, M.A. McLaughlin, E.F. Keane, M. Kramer, A.G. Lyne, D.R. Lorimer, R.N. Manchester, F. Camilo, and I.H. Stairs), *MNRAS* **417**, 1871 (2011).
16. Рейнолдс и др. (S.P. Reynolds, K.J. Borkowski, B.M. Gaensler, N. Rea, M. McLaughlin, A. Possenti, G. Israel, M. Burgay, et al.), *MNRAS* **639**, L71 (2006).

17. Санидас и др. (S. Sanidas, S. Cooper, C.G. Bassa, J.W.T. Hessels, V.I. Kondratiev, D. Michilli, B.W. Stappers, C.M. Tan, et al.), *MNRAS* **626**, A104 (2019).
18. Смирнова и др. (T.V. Smirnova, S.A. Tyul'bashev, E.A. Brylyakova, M.A. Kitaeva, I.V. Chashei, G.E. Tyul'basheva, V.V. Oreshko, and S.V. Logvinenko), *MNRAS* **517**, 1126 (2022).
19. Тюльбашев и др. (S.A. Tyul'bashev, V.S. Tyul'bashev, V.V. Oreshko, and S.V. Logvinenko), *Astron. Rep.* **60**, 220 (2016).
20. Тюльбашев и др. (S.A. Tyul'bashev, V.S. Tyul'bashev, M.A. Kitaeva, A.I. Chernyshova, V.M. Malofeev, I.V. Chashei, V.I. Shishov, R.D. Dagkesamanskii, S.V. Klimenko, I.N. Nikitin, and L.D. Nikitina), *Astron. Rep.* **61**, 848 (2017).
21. Тюльбашев и др. (S.A. Tyul'bashev, V.S. Tyul'bashev, and V.M. Malofeev), *Astron. Astrophys.* **618**, A70 (2018a).
22. Тюльбашев и др. (S.A. Tyul'bashev, V.S. Tyul'bashev, V.M. Malofeev, S.V. Logvinenko, V.V. Oreshko, R.D. Dagkesamanskii, I.V. Chashei, V.I. Shishov, and N.N. Bursov), *Astron. Rep.* **62**, 63 (2018b).
23. Тюльбашев и др. (S.A. Tyul'bashev, T.V. Smirnova, E.A. Brylyakova, and M.A. Kitaeva), *MNRAS* **508**, 2815 (2021).
24. Тюльбашев и др. (S.A. Tyul'bashev, M.A. Kitaeva, and G.E. Tyul'basheva), *MNRAS* **517**, 1112 (2022).
25. Хсу и др. (J.A. Hsu, J.C. Jiang, H. Xu, et al.), *MNRAS* **518**, 1418 (2023).
26. Чен и др. (J.L. Chen, Z.G. Wen, J.P. Yuan, et al.), *Astrophys. J.* **934**, 24 (2022).
27. Чжоу и др. (D.J. Zhou, J.L. Han, J. Xu, et al.), *arXiv:2303.17279* (2023).
28. Шишов и др. (V.I. Shishov, I.V. Chashei, V.V. Oreshko, S.V. Logvinenko, S.A. Tyul'bashev, I.A. Subaev, P.M. Svidskii, V.B. Lapshin, and R.D. Dagkesamanskii), *Astron. Rep.* **60**, 1067 (2016).