

ОБНАРУЖЕНИЕ ДВУХ НОВЫХ RRAT НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2023 г. В. А. Самодуров^{1,2}, С. А. Тюльбашев^{2,*}, М. О. Торопов³, А. В. Долгушев⁴,
В. В. Орешко², С. В. Логвиненко²

¹ Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Пушкино, Россия

³ ООО ТЭК Информ, Москва, Россия

⁴ ООО “Яндекс”, Москва, Россия

*E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

На радиотелескопе БСА ФИАН проведен поиск импульсных сигналов в площадке со склонениями $+52^\circ < \delta < +55^\circ$. При обработке десяти месяцев наблюдений, записанных в шести частотных каналах с шириной канала 415 кГц и общей полосой 2.5 МГц, было найдено 22 тысячи событий, имеющих выраженную дисперсионную задержку сигналов по частотным каналам, т.е. имеющих признаки пульсарных импульсов. Оказалось, что найденные импульсы принадлежат четырем известным пульсарам и двум новым вращающимся радиотранзиентам (RRAT). При дополнительном поиске импульсов, проведенном в 32-канальных данных с шириной канала 78 кГц, обнаружено 8 импульсов для транзидента J0249+52 и 7 импульсов для транзидента J0744+55. Периодическое излучение транзистентов не обнаружено. Анализ наблюдений показывает, что найденные RRAT вероятнее всего являются пульсарами с нуллингами, где доля нуллинга больше, чем 99.9%.

Ключевые слова: методика обработки, вращающийся радиотранзистент (RRAT), пульсар

DOI: 10.31857/S0004629923070071, **EDN:** MDAIQC

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2014 г. на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) после модернизации антенны, в ходе которой флуктуационная чувствительность радиотелескопа выросла в 2–3 раза, а количество одновременно наблюдаемых лучей возросло до 128, были начаты регулярные мониторинговые наблюдения. Эти наблюдения используются для исследования межпланетной плазмы [1], поиска пульсаров и транзистентов [2], исследований переменности активных ядер галактик [3]. Возросшая чувствительность радиотелескопа позволяет регистрировать отдельные импульсы более чем 150 пульсаров¹. Часть из этих пульсаров, представляющих нерегулярно наблюдаемые импульсные сигналы, обнаружена впервые на БСА ФИАН и принадлежит выборке вращающихся радиотранзистентов (RRAT).

Оптимальный поиск импульсных диспергированных сигналов (импульсов, приходящих сначала

на высокой, а потом на низкой частоте), учитывая их рассеяние и мерцания на межзвездной среде, был рассмотрен в работе Кордса в 2003 г. [4]. Использование предложенного способа поиска импульсов в приложении к архивным данным, полученным на 64-метровом радиотелескопе (Паркс, Австралия), привело в 2006 г. к открытию 11 пульсаров с особыми свойствами [5] и в 2007 г. к открытию импульсов внегалактической природы [6]. Если обычные пульсары излучают импульсы на каждом или почти на каждом обороте, и их поиск может быть проведен стандартным образом с помощью спектров мощности или с помощью периодограмм, то у RRAT между наблюдаемыми последовательными импульсами может проходить много периодов без излучения импульса. Поэтому при поиске стандартными способами такие пульсары не обнаруживаются.

Общее количество известных RRAT невелико. В базе данных ATNF² [7] и RRATalog³ числится примерно 100–150 вращающихся радиотранзистентов

¹ <https://bsa-analytics.prao.ru/en/>

² <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

³ <http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/>

тов. Совсем недавно появилась работа по поиску RRAT на 500-м радиотелескопе FAST, и в ней сообщается об обнаружении еще 76 транзиентов [8]. Вместе с этой работой количество известных RRAT перевалило за 200. При этом оценки показывают, что ожидаемое количество RRAT может быть в два раза больше, чем количество обычных пульсаров [9]. То есть обнаружена ничтожная часть вращающихся радиотранзиентов. Почти все RRAT открыты на нескольких радиотелескопах, имеющих высокую мгновенную чувствительность: Паркский 64-м телескоп (Австралия) [5]; телескоп Аресибо, диаметром 300 м (Пуэрто-Рико) [10]; телескоп Грин-Бенк (GBT) диаметром 100 м (США) [11]; телескоп БСА ФИАН, являющийся антенной решеткой 200×400 м (Россия) [2]; телескоп FAST диаметром 500-м (Китай) [8]; телескоп CHIME размером 80×100 м (Канада) [12].

Появление импульсов RRAT непредсказуемо. Типичное время между двумя последовательными импульсами может быть от минут до часов [5], но может достигать и десятков часов [13]. В работе [14] отмечены два RRAT (J1132+25, J1336+33), у которых в более 250 наблюдательных сессиях, проходивших один раз в день и имевших длительность около 3.5 мин, не было зарегистрировано ни одного импульса. Таким образом, для поиска RRAT, помимо антенны с высокой флуктуационной чувствительностью, нужно иметь длительные ряды наблюдений.

В ходе наблюдений на БСА ФИАН постоянно регистрируются импульсные сигналы. Специальное исследование по проверке качества данных, получаемых в ходе мониторинга, показало, что примерно пятая часть этих импульсных сигналов связана с пульсарами, а все остальные являются помехами [15]. Статистический подход, используемый при проверке качества мониторинговых данных, позволил детектировать от нескольких до нескольких тысяч импульсов шести известных пульсаров, а также открыть 4 новых RRAT в данных, записываемых на новом регистраторе [15].

В настоящей работе исследованы сигналы короткой длительности, обнаруживаемые в сырых данных. Мы рассматриваем статистику обнаружений импульсных источников излучения в новой площадке, включенной в мониторинговую программу по поиску пульсаров в тестовом режиме осенью 2021 г., и отождествление этих импульсных источников с помехами и реальными сигналами, имеющими внеземное происхождение.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Радиотелескоп БСА ФИАН — это меридианный инструмент. Любой источник на небе можно наблюдать один раз в сутки, и типичная длитель-

ность сеанса (наблюдательной сессии) составляет 3–4 мин. В ходе модернизации антенны удалось реализовать схему, которая позволяет на базе одного антенного поля запустить 4 независимых радиотелескопа. На настоящий момент времени в строй запущено два радиотелескопа. Один из них (БСА1) используется для стандартных наблюдений пульсаров. Его 512 лучей покрывают склонения в диапазоне $-15^\circ < \delta < +87^\circ$ при перекрытии лучей по уровню 0.8. Второй телескоп (БСА3) — 128-лучевой и покрывает склонения $-9^\circ < \delta < +55^\circ$ при перекрытии лучей по уровню 0.4. Если координаты источника совпадают с координатами луча, то в лучах выше и ниже источник не наблюдается.

В период 2013–2014 гг. к двум регистраторам 128-лучевого радиотелескопа были подключены 96 лучей, перекрывающих склонения $-9^\circ < \delta < +42^\circ$. В конце 2020 г. был создан новый регистратор, к которому в тестовом режиме подключены еще 24 луча, перекрывающих склонения $+42^\circ < \delta < +52^\circ$. Анализировалось качество наблюдений в этих 24 лучах, и результаты анализа были опубликованы в работе [15]. Помимо оценки качества данных в новых подключенных лучах удалось обнаружить и четыре новых RRAT. В 2021 г. были запущены в эксплуатацию последние 8 лучей, перекрывающие склонения $+52^\circ < \delta < +55^\circ$. Таким образом, на БСА3 используются все доступные лучи ($128 = 48 + 48 + (24 + 8)$), к которым присоединены три блока с регистраторами. Период тестирования аппаратуры в целом закончился 20.10.2021 г., после чего начаты тестовые наблюдения в режиме круглосуточного мониторинга. В настоящей работе представлены первые результаты анализа данных в период с 21.10.2021 по 31.08.2022 г.

Характеристики БСА3 следующие: центральная частота приема 110.25 МГц, принимаемая полоса — 2.5 МГц, эффективная площадь антенны около 45 000 кв.м. Сырые данные синхронно записываются в двух частотно-временных разрешениях. В данных с низким частотно-временным разрешением полоса приема разделена на 6 частотных каналов шириной 415 кГц. Время опроса точки составляет 100 мс. Эти данные используются в проекте “Космическая Погода” [1]. Помехи (импульсные сигналы) анализируются именно по этим данным. Данные с высоким частотно-временным разрешением записываются в 32-канальном режиме при ширине канала 78 кГц. Время опроса точки составляет 12.5 мс. 32-канальные данные используются при необходимости проведения дополнительной проверки найденных импульсов. Запись данных проводится на часовых интервалах. Сразу после окончания записи немедленно стартует запись следующего часа наблюдений.

Для выравнивания усиления в частотных каналах используется шумовой сигнал известной температуры, подаваемый на распределенную систему усиления. Он записывается в виде OFF—ON—OFF (калибровочная ступенька), где режим OFF означает отсутствие калибровочного сигнала при отключении всех промежуточных усилителей. В этом случае прописывается шум в антенных трактах, соответствующий температуре окружающей среды. Режим ON соответствует включению калибровочного сигнала (температура 2400 К) при отключенных дипольных линиях. Подробнее о работе с калибровочной ступенькой можно посмотреть в статье [3].

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Предварительно усиление в частотных каналах выравнивается с помощью калибровочной ступеньки, записываемой 6 раз в сутки. Затем данные делятся на десятисекундные временные отрезки. Для каждого отрезка и для каждого канала оцениваются: минимальное и максимальное значение интенсивности в антенных градусах после калибровки по ступеньке, медианное значение интенсивности, среднеквадратичные отклонения шума. Для каждого отрезка сохраняются также дата и час наблюдений по московскому времени и начало исследуемого десятисекундного отрезка по звездному времени. Сохраняемая в базу данных информация по объему в десятки раз меньше, чем объем исходных сырых данных. Она позволяет выявлять уровень помех на любом выбранном интервале времени, а также исследовать отдельные импульсные помехи (события).

Обработка данных подробно описана в работах [15, 16]. Здесь же отметим, что запоминаемая координата наблюдаемого максимума внутри десятисекундного интервала позволяет привязать максимумы для каждого частотного канала по времени, и тем самым позволяет при обработке грубо определять дисперсионное запаздывание сигнала по частоте. Так как нам известно среднеквадратичное отклонение шума внутри канала, можно провести поиск импульсных сигналов на заданном уровне СШ. Отношение сигнала к шуму определяется как $\text{СШ} = A/\sigma_{\text{noise}}$, где A — это амплитуда сигнала после вычитания базовой линии (фоновый сигнал), а σ_{noise} — среднеквадратичные отклонения на 10 с интервале. Если на исследуемом отрезке для найденного импульса СШ был больше 5 хотя бы в трех частотных каналах из шести, считается, что найден кандидат в транзисты. Кандидат в RRAT дополнительно проверяется по данным с высоким частотно-временным разрешением.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На интервале наблюдений с 21.10.2021 по 31.08.2022 г. после вычета пропусков данных анализировалось 7496 файлов-часов (312.33 звездных суток). Всего при обработке 6-канальных данных было обнаружено 2.5 млн. импульсов. Многие импульсы одновременно проявлялись в нескольких лучах. Такие случаи автоматически объединялись в одно событие. Всего найдено 160 504 взаимосвязанных событий.

Распределение количества одновременных событий по разным лучам похоже на распределение, которое было при раннем анализе 24 лучей [15]. Чаше всего импульс наблюдается либо в одном луче, либо во всех лучах одновременно. Реальные пульсарные импульсы должны наблюдаться в одном или в двух смежных лучах. Это, конечно, не исключает помех, которые тоже могут попадать только в один луч. Импульсы, наблюдаемые во всех лучах, в подавляющем большинстве случаев являются помехами. Отдельные очень мощные импульсы пульсаров также могут наблюдаться во многих лучах, появляясь в боковых лепестках БСА ФИАН. Возможны и другие источники генерации данного вида импульсов, но это будет посвящена отдельная работа.

Проанализировав импульсы, обнаруженные в одном или двух лучах, мы нашли, что примерно 22 000 импульсов или 13.9% от их общего количества имеют выраженную дисперсионную задержку, т.е. похожи на импульсы пульсаров. Поиск новых пульсаров по их отдельным диспергированным импульсам проводился только для 8 лучей из 32 ($+52^\circ < \delta < +55^\circ$), так как поиск по 24 лучам был сделан в более ранней работе [15].

Как и в работе [15], исследуемая площадка разбивалась на кластеры длиной 2 мин. Для каждого кластера проверялось количество найденных импульсов, координаты по прямому восхождению и склонению, средняя мера дисперсии найденных импульсов, номер луча, юлианская дата (MJD), время (UT), звездное время, наблюдаемый СШ в частотных каналах, списки номеров лучей с похожими импульсами. Всего программа обработки выделила 45 кластеров из 5760 возможных кластеров, приходящихся на исследуемую площадку. У каждого кластера есть координата по прямому восхождению, определяемая двухминутным отрезком, и координата по склонению, определяемая номером луча БСАЗ. В выделенных 45 кластерах есть хотя бы одно «пульсарное» событие. Координаты кластеров определены, и поэтому можно провести отождествление с каталогом ATNF.

Известные сильные пульсары могут занимать сразу несколько соседних кластеров как по прямому восхождению, так и по склонению. Они легко отождествляются в ATNF, и удаляются из

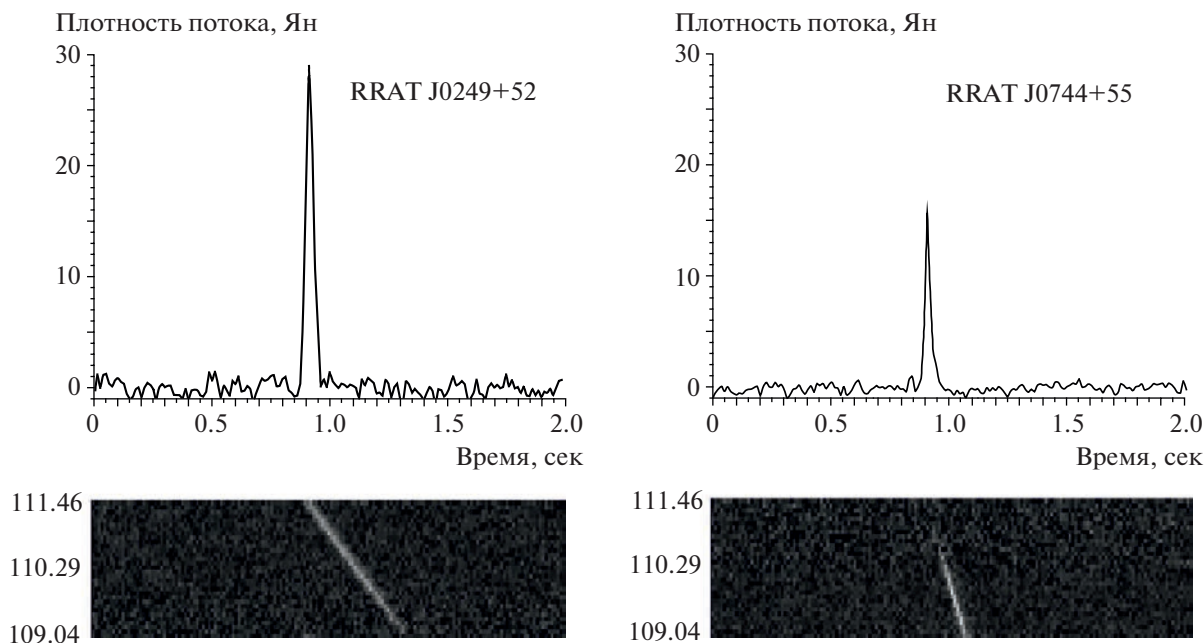


Рис. 1. Верхняя панель: профили сильнейших импульсов найденных транзиентов. По вертикальной оси отложена плотность потока в янских. Нижняя панель: динамические спектры этих импульсов. По вертикальной оси отражены частоты нескольких каналов. Интервалы времени на горизонтальной оси профиля импульса и соответствующего динамического спектра совпадают.

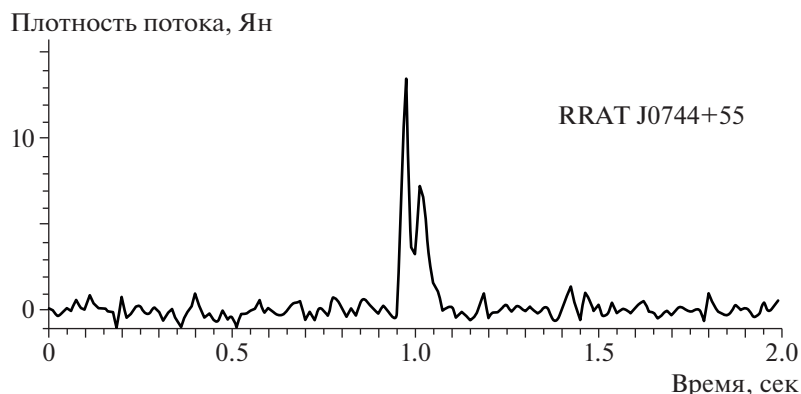


Рис. 2. Профиль транзиента J0745+55, демонстрирующий двойной пик.

дальнейшего анализа. Всего при анализе было обнаружено четыре известных пульсара: B0329+54 ($P = 0.7145$ с; $DM = 26.7$ пк/см³); B0343+53 ($P = 1.9344$ с; $DM = 67.3$ пк/см³); B1508+55 ($P = 0.7396$ с; $DM = 19.6$ пк/см³) и B2021+51 ($P = 0.5291$ с; $DM = 22.5$ пк/см³). Для этих пульсаров было обнаружено от одного (B0343+53) до более чем 10 тысяч (B0329+54) импульсов. Импульсы пульсаров B0329+54 и B1508+55 наблюдались также и в боковых лепестках.

Помимо известных пульсаров в записях были обнаружены импульсы, принадлежащие двум новым RRAT (J0249+52; J0744+55). На рис. 1 приве-

дены их профили и динамические спектры. Для J0744+55 у части импульсов виден профиль с двойным пиком. Вероятнее всего, в этом транзиенте наблюдаются субимпульсы (см. рис. 2). Расстояние между вершинами в профиле составляет 25–35 мс.

В табл. 1 приведена информация по найденным RRAT. В столбцах 1–3 расположены имя транзиента, координаты источника по прямому восхождению и склонению. Прямое восхождение определялось как медианное значение детектированных импульсов, а ошибка, в силу небольшого количества обнаруженных импульсов, опреде-

Таблица 1. Характеристики найденных RRAT

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	DM , пк/см ³	$W_{0.5}$, мс	S_{peak} , Ян	N_1/N_2	n , час ⁻¹
J0249+52	02 ^h 49 ^m 00 ± 90 ^s	52°46 ± 15'	27.5 ± 1.5	37–72	16.5/29.0	8/8	0.44
J0744+55	07 44 45 ± 90	55 05 ± 10	10.5 ± 1.5	20–42	8.8/15.5	7/7	0.38

лялась как размер диаграммы БСА по половинной мощности. Найденные импульсы у J0249+52 видны в одном луче и не видны в лучах выше и ниже, поэтому координата по склонению определялась как склонение луча, а точность оценки координаты, как половина расстояния по склонению между лучами. Импульсы J0744+55 видны в двух соседних лучах, и координата определялась как средняя координат лучей по склонению. В столбцах 4–6 приведены оценки меры дисперсии DM , полуширины профиля $W_{0.5}$, пиковые плотности потока S_{peak} слабейшего, и, через прямой слэш (“/”), сильнейшего из найденных импульсов. Так как 6 раз в сутки во всех частотных каналах прописывается калибровочная ступенька известной температуры, данные в каналах калибруются с помощью ступеньки. Таким образом, высота найденного импульса известна в единицах температуры. Запись ведется круглосуточно. Помимо калибровочных ступенек в записи есть и дискретные источники с известной плотностью потока. Поэтому есть возможность пересчитать наблюдаемые пиковые плотности потока из единиц температуры в Янские. Приведенные оценки — это нижние оценки плотности потока. Точная координата транзиента ни по прямому восхождению, ни по склонению не известна. Поэтому нельзя сделать поправки, учитывающие возможное попадание импульса на край диаграммы направленности БСА и возможное не совпадение координаты луча БСА и координаты транзиента по склонению. Вследствие этого, оценка пиковой плотности потока может быть занижена до 2 раз. В столбце 7 указано, сколько импульсов обнаружено (N_1) по данным с высоким частотно-временным разрешением. Через слэш “/” указано число дней детектирования импульсов (N_2). В столбце 8 приведена частота появления импульсов (n), имеющих СШ > 10 ($S_{\text{peak}} > 3.5$ –4 Ян) в 32-канальных данных за один час наблюдений. При получении оценки n предполагалось, что вероятнее всего импульсы появляются в центральной части диаграммы направленности БСА3, которая по половинной мощности примерно равна 3.5 мин. Всего накапливается (312 сессий × 3.5 мин)/60 мин = 18.2 ч наблюдений в направлении каждого транзиента.

У обоих RRAT обнаружено примерно одинаковое количество импульсов. Однако, если у транзиента J0744+55 импульсы появлялись при-

близительно равномерно в течение всего периода наблюдений, то у транзиента J0249+52 все его 8 импульсов зарегистрированы за четыре подряд идущих месяца.

Так как RRAT — это пульсары, мы попытались найти их периодическое излучение. В Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS) [17] площадка со склонениями $+52^\circ < \delta < +55^\circ$ ранее не исследовалась. Предполагая, что найденные RRAT могут быть обычными секундными пульсарами, мы провели стандартный поиск с помощью спектров мощности Фурье. Для поиска выбирались дни с наилучшим качеством шумовой дорожки. Всего из 312 дней наблюдений была отброшена треть записей. Для оставшихся дней с помощью быстрого преобразования Фурье получались спектры мощности, которые складывались. При сложении спектров должен наблюдаться рост СШ гармоник, если в исследуемых направлениях есть периодические сигналы. В суммированных спектрах мощности не обнаружены какие-либо детали в спектрах мощности на уровне СШ > 5 и на периодах $P < 2$ с. В ранних работах было показано, что при суммировании спектров наблюдаемый рост СШ гармоник меньше, чем корень из количества сложенных сессий [17]. Оценки показывают, что увеличение чувствительности при сложении спектров мощности будет примерно в 10 раз, а не в 15 раз, как можно было бы ожидать. С учетом температуры фона в направлении найденных транзиентов, и предполагая периоды транзиентов $P < 2$ с, можно дать верхнюю оценку на ожидаемую пиковую плотность потока при регулярном пульсарном излучении: $S_{\text{peak}} < 0.3$ Ян (J0249+52), $S_{\text{peak}} < 0.2$ Ян (J0744+55). Так как периоды найденных RRAT не найдены, оценки интегральной плотности потока получить не удалось.

Помимо использования спектров мощности, оценку периода RRAT можно получить, исходя из наблюдаемого интервала времени между импульсами, подбирая наибольший общий делитель (интервал времени, целое число раз укладывающийся между временами появления любых импульсов), который и будет верхней оценкой периода транзиента. Настоящий период может быть в целое число раз меньше. Наш поиск проводился для заведомо сильных импульсов (СШ > 10 для суммарного по 32 частотным каналам профиля импульса). Для получения оценки периода мы провели поиск более слабых импульсов (до СШ = 5)

в окрестностях найденных сильных импульсов. Слабые импульсы обнаружить не удалось.

Природа найденных RRAT не ясна. В работах [8, 18] показано, что RRAT — это смесь известных видов пульсаров. Часть из них — это пульсары с очень длительными нуллингами. Часть — это пульсары с очень широким распределением импульсов по энергиям, и для слабых пульсаров наблюдаются сильные импульсы с хвоста этого распределения. Часть RRAT являются пульсарами с гигантскими импульсами. У двух RRAT из настоящей работы наблюдается один импульс за 2.5 ч наблюдений. Если предположить, что найденные RRAT имеют период $P = 1$ с, то их нуллинги будут равны 99.99%. То есть мы видим один импульс из 10 000. Верхние пиковые плотности потока в среднем профиле у J0249+52 и J0744+55 равны соответственно 0.3 и 0.2 Ян. В этом случае (см. табл. 1) наблюдаемые плотности потоков импульсов превосходят верхние оценки пиковой плотности потока в среднем профиле в 40–100 раз и более. Такая разница пиковых плотностей в отдельном импульсе и в среднем профиле может быть присуща как пульсарам с гигантскими импульсами, так и пульсарам с длинным хвостом распределения импульсов по энергиям. Отсутствие регулярного излучения говорит в пользу нуллинговой природы найденных RRAT. Однако для однозначного выбора гипотезы о природе найденных J0249+52 и J0744+55 нужны наблюдения на более чувствительных, чем БСА ФИАН, радиотелескопах.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа контроля качества проводимых наблюдений по данным, записанным с низким частотно-временным разрешением, показала высокую эффективность, позволяя оперативно реагировать на изменение как внешних условий наблюдений, так и внутренних причин, отвечающих за ухудшение наблюдений. В ходе наблюдений регистрируется импульсный сигнал, видимый в одном канале или одновременно во многих лучах в среднем каждые 3 мин. В целом качество наблюдений высокое.

Основная часть обнаруженных импульсов связана с помехами, и для выделения импульсов пульсаров из выборки пришлось применять кластерный анализ. За почти годовой период наблюдений в шестиканальных данных детектированы десятки тысяч импульсов, имеющих признаки “пульсарности”. Для каждого из этих событий импульс на высокой частоте приходит раньше, чем на низкой частоте, и регистрируется в одном или двух соседних лучах. Проверка этих импульсов показывает, что около половины из них при-

надлежат пульсарам, а остальные импульсы — это разного рода артефакты обработки.

В слепом поиске обнаружены 4 известных пульсара, у которых наблюдается от 1 до более чем 10000 импульсов в данных с низким частотно-временным разрешением за 7496 наблюдательных часов (более 312 сут). Помимо известных пульсаров обнаружены два новых RRAT. Появление импульсов транзиентов в среднем каждые 2.5 ч соответствует известным случаям [5]. Общее количество RRAT, открытых в наблюдениях на БСА ФИАН, достигло 48 источников⁴.

Проведенный анализ показал, что, вероятнее всего, найденные транзиенты — это пульсары с очень длительными нуллингами. Для однозначного ответа нужны наблюдения на радиотелескопах, имеющих мгновенную чувствительность выше, чем у радиотелескопа БСА ФИАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ)⁵ № 22-12-00236.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят антенную группу за обеспечение наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН, а также Л.Б. Потапову за помощь с оформлением работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. I. Shishov, I. V. Chashei, V. V. Oreshko, S. V. Logvinenko, et al., *Astron. Rep.* **60**(12), 1067 (2016).
2. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, S. V. Logvinenko, et al., *Astron. Rep.* **62**(1), 63 (2018).
3. S. A. Tyul'bashev, P. Y. Golysheva, V. S. Tyul'bashev, and I. A. Subaev, *Astron. Rep.* **63**(11), 920 (2019).
4. J. M. Cordes and M. A. McLaughlin, *Astrophys. J.* **596**, 1142 (2003).
5. M. A. McLaughlin, A. G. Lyne, D. R. Lorimer, M. Kramer, et al., *Nature* **439**, 817 (2006).
6. D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, and F. Crawford, *Science* **318**, 777 (2007).
7. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astron. J.* **129**, 1993 (2005).
8. D. J. Zhou, J. L. Han, Jun Xu, Chen Wang, et al., *arXiv:2303.17279 [astro-ph.HE]* (2023).
9. E. F. Keane and M. Kramer, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **391**(4), 2009 (2008).
10. J. S. Deneva, K. Stovall, M. A. McLaughlin, S. D. Bates, P. C. C. Freire, J. G. Martinez, F. Jenet, and M. Bagchi, *Astrophys. J.* **775**, 51 (2013).
11. K. Stovall, R. S. Lynch, S. M. Ransom, A. M. Archibald, et al., *Astrophys. J.* **791**, 67 (2014).

⁴ <https://bsa-analytics.prao.ru/en/transients/rrat/>

⁵ <https://rscf.ru/project/22-12-00236/>

12. *F. A. Dong, K. Crowter, B. W. Meyers, Z. Pleunis, et al.*, arXiv:2210.09172 [astro-ph.HE] (2022).
13. *S. V. Logvinenko, S. A. Tyul'bashev, and V. M. Malofeev*, Bull. Lebedev Physics Inst. **47**, 390 (2020).
14. *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*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **517**, 1126 (2022).
15. *V. A. Samodurov, S. A. Tyul'bashev, M. O. Toropov, and S. V. Logvinenko*, Astron. Rep. **66**(4), 341 (2022).
16. *V. A. Samodurov, A. S. Pozanenko, A. E. Rodin, D. D. Churakov, et al.*, in *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains*, XVIII International Conference, held in Ershovo, Moscow, Russia, October 11–14, 2016, edited by L. Kalinichenko, S. Kuznetsov, Y. Manolopoulos (Cham: Springer, 2017), p. 130 (2017).
17. *S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, and G. E. Tyul'basheva*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **517**, 1112 (2022).
18. *S. A. Tyul'bashev, T. V. Smirnova, E. A. Brylyakova, and M. A. Kitaeva*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **508**, 2815 (2021).