# ПОИСК ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ НА СКЛОНЕНИЯХ ОТ +56° ДО +87°

© 2021 г. С. А. Тюльбашев<sup>1, \*</sup>, М. А. Китаева<sup>1</sup>, С. В. Логвиненко<sup>1</sup>, Г. Э. Тюльбашева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Пущинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пущино, Россия

<sup>2</sup> Институт математических проблем биологии РАН, Филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Пущино, Россия

\**E-mail: serg@prao.ru* Поступила в редакцию 04.07.2021 г. После доработки 29.07.2021 г. Принята к публикации 31.08.2021 г.

Проведен обзор северной полусферы на частоте 111 МГц. Общее время накопления в каждой точке площадки обзора было не менее одного часа. При поиске диспергированных импульсов обнаружено 75 источников импульсного излучения. Более 80% этих источников являются известными пульсарами, наблюдаемыми в боковых лепестках антенны. У двенадцати известных пульсаров было детектировано от одного до нескольких сотен импульсов. У четырех пульсаров (J0157+6212, J1910+5655, J2337+6151, J2354+6155) узость самых сильных импульсов и отношение пиковых плотностей потока в сильнейших импульсах и в среднем профиле указывают, что они могут быть пульсарами с гигантскими импульсами. Обнаружен один новый вращающийся радиотранзиент (RRAT) J0812+8626 с мерой дисперсии  $DM = 40.25 \, \text{пк/сm}^3$ .

*Ключевые слова:* пульсар, вращающийся радиотранзиент (RRAT), гигантский импульс **DOI:** 10.31857/S0004629921120082

# 1. ВВЕДЕНИЕ

В 2006 г. был открыт новый класс пульсаров вращающиеся радиотранзиенты (RRAT) [1]. Эти пульсары излучают нерегулярно появляющиеся (спорадические) диспергированные импульсы. Регулярное (пульсарное) излучение вращающихся транзиентов зачастую не обнаруживается. За прошедшие 15 лет после открытия RRAT при проведении новых обзоров и переобработке данных ранних обзоров было обнаружено примерно сто вращающихся транзиентов. В основном RRAT детектированы в обзорах по поиску пульсаров (см. ATNF каталог пульсаров<sup>1</sup> и RRATalog<sup>2</sup>). Почти все RRAT обнаружены на крупнейших в мире радиотелескопах. Это радиотелескопы Паркс (64 м), Аресибо (300 м), Грин-Бенк (100 м), Пущино (200 × 400 м). При поиске RRAT важнейшим фактором является мгновенная чувствительность радиотелескопа, которая зависит от эффективной площади и, следовательно, от геометрических размеров антенны.

До настоящего момента времени природа вращающихся транзиентов и их место среди обыч-

ных секундных пульсаров не определены. В среднем RRAT имеют периоды и магнитные поля больше, чем у канонических (обычных) секундных пульсаров и на зависимости  $P/\dot{P}$  зачастую лежат близко к линии смерти [2, 3]. Согласно гипотезе Попова и др. [4] расположение RRAT на зависимости  $P/\dot{P}$ , говорит о том, что они могут являться промежуточным классом между пульсарами с сильными магнитными полями (магнетары, XINS) и обычными секундными пульсарами. Распределение высот над плоскостью Галактики, распределение ширин импульсов RRAT такое же, как у обычных пульсаров [5]. Среднее время между появляющимися импульсами может быть от минут до десятков часов [1, 6]. Согласно [7] появление импульсов подчиняется Пуассоновскому распределению, а согласно [8, рис. 6] у некоторых RRAT наблюдается кластеризация импульсов. Распределение энергии импульсов может быть логнормальным, суммой двух логнормальных распределений, логнормальным со степенным хвостом, степенным, степенным с изломом, т.е. распределения такие же, как и у обычных пульсаров [7, 9–13]. По некоторым оценкам количество вращающихся транзиентов может в два раза превышать популяцию обычных секундных пульса-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> https://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/

ров [14]. Попытка найти эволюционную связь между пульсарами и вращающимися транзиентами сделана в работах [9, 14].

К сожалению, небольшое количество обнаруженных RRAT и трудности с их исследованием из-за спорадического появления импульсов не позволяют дать однозначный ответ о природе вращающихся транзиентов. Так как время появления импульса непредсказуемо, а среднее время между детектируемыми импульсами велико, то для исследования свойств вращающихся транзиентов и выбора предпочтительной гипотезы об их природе необходимо увеличение общего количества транзиентов и проведение долговременных наблюдений длительностью десятки или сотни часов для каждой точки на небе.

В настоящей работе рассмотрен поиск диспергированных импульсов в обзоре, который проводится на радиотелескопе Большая синфазная антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН).

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Использованный для обзора радиотелескоп БСА ФИАН – это меридианная антенна, имеющая четыре независимых системы лучей. Две системы лучей используются для поиска пульсаров и транзиентов. Одна из них (БСАЗ) имеет фиксированные (не переключаемые) положения лучей по высоте, перекрывающих склонения от -9° до +55°. На БСАЗ проводится ежедневный обзор неба, используемый для ряда научных задач, включая поиск пульсаров и RRAT [15-17]. Другая система лучей подвижная (БСА1), и позволяет проводить наблюдения на склонениях от -15° до +87°. На БСА1 для наблюдений можно выбрать от одного до восьми лучей, последовательно выстроенных в вертикальной плоскости по склонениям. Размер одного луча составляет примерно 0.5 × 1°. Радиотелескоп БСА1 использовался в настояшей работе. Еше одна система лучей используется для контроля состояния антенны. Для последней системы лучей рассматривается возможность создания дополнительного полноценного многолучевого радиотелескопа, состоящего из лучей с фиксированными координатами, перекрывающими склонения от +55° до +87°. Некоторые подробности о возможностях антенны БСА ФИАН после ее реконструкции можно посмотреть в работе [15]. Центральная частота наблюдений 110.3 МГц, полоса 2.5 МГц.

Для проведения обзора на БСА1 был разработан новый регистратор на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), являющийся аналогом уже работающего на радиотелескопе БСАЗ 96 канального регистратора. Конструктивно ранее разработанный регистратор представляет собой набор модулей. Всего в регистраторе 12 модулей, каждый из которых обслуживает 8 лучей БСА ФИАН. Модули установлены на шину PCI двух промышленных компьютеров (ПК). Принципы построения, элементная база, программное обеспечение для проведения наблюдений этого регистратора описаны в работе [6].

В алгоритм работы нового двухмодульного регистратора была внесена возможность управления передачей данных из аппаратной части в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) компьютера по шине PCI в режиме канала прямого доступа (КПДП). Для этого были внесены изменения в прошивку ПЛИС модулей регистратора и в программу проведения радиоастрономических наблюдений. Благодаря этим изменениям в регистраторе появилась возможность использовать режим выборочной работы отдельных модулей и, соответственно, режим выборочной передачи данных. Это снизило нагрузку на каналы передачи и регистрации данных, дало возможность использовать широко применяемый в промышленности компьютер и обычную операционную систему ОС (Windows 10 PRO). Такой режим обеспечил устойчивую совместную работу как наблюдательной программы, так и стандартных системных служб ОС, а также возможность выполнения оператором функций контроля за ходом эксперимента.

Наблюдательная программа интегрирована в систему проведения наблюдений пульсаров на радиотелескопе БСА. Участие оператора в наблюдательном процессе сведено к минимуму. Для модулей регистратора были разработаны новые драйвера для работы под управлением ОС Windows 1064 бит. Для этого использовалось программное обеспечение фирмы Microsoft для разработки драйверов – Windows driver kit (WDK). При проверке регистратора в "жестких" режимах работы не было выявлено ошибок регистрации данных при одновременной работе 2 модулей с временным разрешением 3.072 мс и спектральным разрешением 19.53125 кГц (128 спектральных каналов). При изменении временного разрешения, например, в 2 раза до 6.144 мс, можно увеличить спектральное разрешение до 256 спектральных каналов. Параметры по временному и частотному разрешению ограничиваются скоростью записи данных на жесткий диск, объемом выделяемой оперативной памяти в системной области и ограниченностью ресурсов компьютера при совместной работе системных служб ОС, наблюдательных и сервисных программ.

Для обзора были выбраны склонения  $+56^{\circ} < \delta < +87^{\circ}$ , недоступные для наблюдений на БСАЗ. Обзор проводился в восьми пространственных лучах, занимающих, примерно, три градуса по склонению. Программный комитет по

БСА ФИАН выделял на обзор 9 или 10 сут в месяц. Нами фиксировался набор склонений для обзора на все выделенные дни, а на следующий месяц выбирались новые склонения. Таким образом, за 10 мес проводился однократный обзор склонений, перекрывающих 31°.

Наблюдения были начаты в апреле 2019 г. К концу декабря 2020 г. каждая точка на небе, имеющая склонения между +56° и +87°, имела не менее 9 сеансов наблюдений, что соответствует непрерывным наблюдениям не меньше одного временного часа. Площадь обзора около 4000 кв. град. В основном, это наблюдения на высоких галактических широтах и в антицентре Галактики.

Запись проводилась в общей полосе 2.5 МГц, разбитой на 128 частотных каналов с шириной канала 19.53 кГц. Выбранное время опроса было 3.072 мс. Наблюдения проводились круглосуточно. Каждый час записывался один файл. За сутки записываются 24 файла. Калибровочный сигнал, общий для всех радиотелескопов, реализованных на антение БСА ФИАН, подается 6 раз в сутки. Он выглядит как OFF-ON-OFF (калибровочная ступенька). В заданное время антенна отключается на пять секунд (режим OFF), затем при отключенной антенне включается калибровочный сигнал известной температуры на пять секунд (режим ON), затем калибровочный сигнал отключается, и проводится еще одна пятисекундная запись. После записи калибровочной ступеньки антенна включается. Фиксируемая высота калибровочной ступеньки в единицах аналогоцифрового преобразователя (АЦП) имеет сильную зависимость от температуры окружающей среды и меняется как в разные сезоны, так и в течение суток (подробнее см. в работе [18]). В настоящей работе калибровочная ступенька использовалась для выравнивания усиления в частотных каналах.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Поиск диспергированных импульсов проводился при помощи специально разработанной программы, написанной на языке С# в среде Міcrosoft Visual Studio. Обработка данных и поиск событий – импульсов, обладающих признаками дисперсионного запаздывания, производится в несколько этапов. На первом этапе для указанного в параметрах обработки набора мер дисперсий в записи находятся и фиксируются все события, превышающие заданное значение отношения сигнал/шум (СШ). Далее производится последовательный анализ с целью отбраковки помех и повторных обнаружений одного и того же события. Отсеиваются события, вызванные импульсными помехами. Отбраковываются временные участки, соответствующие записи калибровочной ступеньки. В процессе обработки на длительном временном интервале (несколько дней, недель) определяются временные интервалы, соответствующие сигналам от уже отождествленных космических объектов, в том числе сигналам в боковых лепестках и в соседних лучах. Такие области по решению оператора могут вноситься в таблицу, расположенную во внешних файлах, и в обработке не участвуют. Из оставшегося набора событий выбираются группы. которые могут быть следствием наличия в записи одиночного сигнала с дисперсионным запаздыванием. Для каждой из этих групп выделяется и оставляется только одно событие (графический файл) с наибольшим значением СШ. В графическом файле содержатся профиль импульса, динамический спектр импульса, а также приведены другие технические параметры события: название файла, в который записывается обнаруженный импульс, СШ импульса, оценка DM, координаты импульса по прямому восхожлению, координаты луча БСА по склонению, и другие. Указанные меры дают возможность снизить количество событий, требующих дальнейшей ручной обработки. События, прошедшие отбраковку, записываются в папки, соответствующие лучу и звездному времени, в которых они зафиксированы.

В ходе слепого поиска было обнаружено 75 направлений на небе, из которых наблюдаются диспергированные сигналы. Анализ показал, что часть импульсов принадлежит известным пульсарам, наблюдаемым в основном луче, часть импульсов связана с известными пульсарами, наблюдаемыми в боковых лепестках антенны, часть импульсов осталась неотождествленной.

Импульсы известных пульсаров, обнаруживаемые в боковых лепестках БСА ФИАН, представляют серьезную проблему при отождествлении. Если в данный день обнаруживается несколько импульсов, то помимо меры дисперсии можно грубо оценить верхнее значение периода и, соответственно, получить возможные кратные периоды. Полученные оценки периода и меры дисперсии позволяют проверить попадающие в обзор сильные пульсары в качестве кандидатов на отождествление. С другой стороны, может оказаться, что сильный пульсар находится за пределами площадки обзора, а оценка периода у обнаруженного транзиента отсутствует. Мы не можем гарантировать отсутствие фальшивого обнаружения новых транзиентов из-за сложного распределения боковых лепестков БСА ФИАН, однако предпринимаем все возможные усилия для исключения подобных случаев. В боковых лепестках антенны нами детектировано 13 пульсаров, находящихся за пределами площадки обзора. Например, пульсар J1509+5531, находящийся за пределами исследованной площадки, обнаружен 333 раза в боковых лепестках БСА ФИАН. В разных направлениях импульсы пульсара обнаружи-



**Рис. 1.** Пример служебного рисунка, создаваемого программой поиска для каждого детектированного импульса. Вверху – профиль одного импульса пульсара J1509+5531, обнаруженного в боковом лепестке БСА ФИАН в направлении  $\alpha_{2000} = 15^{h}32^{m}$ ;  $\delta_{2000} = 62^{\circ}15'$ . Внизу – динамический спектр импульса. На горизонтальной оси отражена длительность записи в точках. 110 точек соответствуют ~338 мс записи сырых данных. Вертикальная ось динамического спектра отражает частоты. Верх динамического спектра соответствует частоте 111.49 МГц, а низ – частоте 109.01 МГц.

вались от 1 до 101 раза (пример импульса PSR J1509+5531 см. на рис. 1). У части известных пульсаров, находящихся в площадке обзора, также детектируются импульсы в боковых лепестках.

На рис. 2 приведены координаты направлений обнаруженных нами диспергированных импульсов. Крестиками обозначены 13 пульсаров, обнаруженных в боковых лепестках и находящихся за пределами исследованной площадки. Видно, что боковые лепестки имеют сложное распределение, но все обнаруженные импульсы имеют близкое прямое восхождение по отношению к пульсарам, которые породили наблюдаемые импульсы. Обнаруженные в боковых лепестках известные пульсары, попавшие в наблюдаемую площадку, не показаны, чтобы не утяжелять рисунок.

Если пульсар обнаруживается в основном луче, то его легко идентифицировать. Полученные оценки меры дисперсии и координат по прямому восхождению и склонению позволяют отобрать в АТNF кандидатов на отождествление. Последующая проверка кандидатов при усреднении сырых данных с периодом и мерой дисперсии, взятыми из ATNF, делают отождествление однозначным. Если регулярное излучение пульсара не обнаруживалось, объект помещался в список RRAT кандидатов.

Анализ детектированных импульсов показал, что нами наблюдалось 12 известных пульсаров в основном луче и один новый RRAT. Оставшиеся 62 источника импульсного излучения – это излучение известных пульсаров в боковых лепестках БСА ФИАН. Для отождествленных пульсаров и обнаруженного RRAT были сделаны оценки плотности потока с помощью калибровочных источников. Калибровочные источники выбирались таким образом, чтобы их координаты по склонению были близки к координатам обнаруженного объекта, а прямое восхождение отличалось не более, чем на два временных часа. Кандидаты в калибровочные источники выбирались из Пущинского каталога дискретных источников [19]<sup>3</sup>, который был сделан на частоте 102.5 МГц. В работе [18] показано, что при пересчете плотности потока калибровочного источника на частоту 111 МГц поправки будут незначительными. Пред-

полагая, что спектральные индексы  $\alpha$  ( $S \sim \nu^{-\alpha}$ ) у всех калибровочных источников равны единице, плотности потоков на 111 МГц будут равны 0.94 от плотностей потоков на 102.5 МГц. В качестве калибровочных источников были выбраны B0245+603 (44.3 Ян), B0733+806 (32.3 Ян), B0735+744 (12.6 Ян), B0742+576 (14.2 Ян),

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> http://astro.prao.ru/db/



**Рис. 2.** Схематическое изображение площадки обзора, на которой отмечены координаты обнаруженных диспергированных импульсов. По горизонтали отложены координаты по прямому восхождению, а по вертикали – координаты по склонению. Крестиками отмечены наблюдения известных пульсаров в боковых лепестках. Цифрами 1–13 в нижней части рисунка обозначены пульсары, координаты которых находятся за пределами исследованной площадки: 1 – J0332+5434; 2 – J0826+2637; 3 – J0837+0610; 4 – J0922+0638; 5 – J0946+0951; 6 – J1509+5531; 7 – J1543+0929; 8 – J1823+0550; 9 – J2022+2854; 10 – J2022+5154; 11 – J2113+2754; 12 – J2219+4754; 13 – J2305+3100. Закрашенными кружками показаны месторасположения 12 пульсаров, обнаруженных в главном луче, закрашенный квадрат – обнаруженный новый вращающийся радиотранзиент.

В1107+651 (12.0 Ян), В1656+572 (13.6 Ян), В1752+586 (10.0 Ян), В1858+568 (17.4 Ян), В2159+652 (28.1 Ян), В2356+620 (27.2 Ян).

В табл. 1 приведены характеристики обнаруженных импульсов для отождествленных пульсаров. В первом и втором столбцах таблицы приведены имя источника в аннотации Ј2000 согласно обнаружению на БСА ФИАН и согласно отождествлению в каталоге ATNF. Так как диаграмма направленности БСА ФИАН порядка градуса, точность наших координат низкая, и поэтому имена могут не совпадать. Мы приводим оба имени, чтобы можно было сравнить точность координат. В третьем столбце дано количество импульсов, детектированных в основном луче. В столбцах 4-7 располагаются пиковая плотность потока самого сильного обнаруженного импульса  $(S_{nl})$ , полуширина этого импульса, пиковая плотность потока в среднем профиле ( $S_{p2}$ ) и полуширина среднего профиля. Средний профиль строился за ту же сессию, когда наблюдался сильнейший импульс. Сам сильнейший импульс не исключался при построении среднего профиля. Оценки показывают, что исключение сильного импульса приведет к уменьшению S<sub>p2</sub> на 15-20%. В столбцах 8-10 расположены оценки интегральной плотности потока на 111 МГц ( $S_{int}$ ), на 135 МГц [20] и на 102.5 МГц [21]. При получении оценок плотности потока на 111 МГц учитывалось, что положение лучей БСА на небе фиксировано, и пульсар может находиться выше или ниже луча. Поэтому делались поправки плотности потока, учитывающие особенности БСА ФИАН, как антенной решетки. Для пульсаров J0750+57 и J1706+59, открытых в 2014 г. [22], в каталоге ATNF приведены координаты пульсаров с низкой точностью. Поэтому поправка за несовпадение координаты луча и координаты пульсара не делалась. Для этих пульсаров наша оценка плотности потока может быть занижена в несколько раз. В столбце 11 приведено частное столбцов 4 и 6, т.е. значение того, во сколько раз отличается пиковая плотность потока сильнейшего импульса от пиковой плотности потока в среднем профиле за этот же день.

Звездочкой в первом столбце отмечены пульсары, наблюдаемые и в основном луче, и в боковых лепестках. Метки "St" [22] и "S" [20] во втором столбце указывают на работы с первым обнаружением этих пульсаров. Эти работы по поиску пульсаров шли примерно в то же время, что и наш обзор по поиску новых пульсаров и транзиентов. Мы подтверждаем обнаружение этих пульсаров

Name <sub>LPA</sub>	Name <sub>ATNF</sub>	Ν	$S_{\rm pl},{ m Jy}$	$W_{\rm el}$ , ms	$S_{\rm p2},{ m Jy}$	$W_{\rm e2},{\rm ms}$	S <sub>int</sub> , mJy	<i>S</i> <sub>135</sub> , mJy	<i>S</i> <sub>102</sub> , mJy	$S_{\rm pl}/S_{\rm p2}$
J0140+6008*	J0141+6009	562	241.5	12.3	14.3	33.8	394	102.6	_	16.9
J0158+6223	J0157+6212	2	17.7	12.3	0.65	64.5	17.8	4.8	52	27.2
J0653+8054*	J0653+8051	15	15.5	6.1	0.7	27.6	16	13.1	16	22.1
J0750+5724	J0750+57(St)	1	>14	6.1	>0.27	24.6	>6	—	—	—
J0814+7436*	J0814+7429	62	781.4	6.1	56.3	61.4	2674	*358.8	1080	13.9
J1058+6504	J1059+6459(St)	3	4.2	12.3	0.62	33.8	5.8	—	—	6.8
J1708+5858	J1706+59(St)	24	>9.0	6.1	>0.55	58.4	>22	15.7	—	—
J1843+5640*	J1840+5640	757	235.4	6.1	21.4	21.5	275	55.0	50	11
J1911+5654	J1910+5655(S)	2	28.5	3.1	0.26	61.4	46.7	—	—	109
J2225+6527*	J2225+6535	94	55.5	3.1	6.0	27.6	242	126.3	—	9.3
J2336+6145*	J2337+6151	346	77.6	9.2	2.4	27.6	132.4	28.7	75	32.7
J2354+6158	J2354+6155	2	50.6	12.3	1.6	15.4	26	10.5	30	31.6

Таблица 1. Некоторые характеристики пульсаров, обнаруженных по излучению отдельных импульсов

на частоте 111 МГц. Звездочкой в девятом столбце показана ожидаемая плотность потока пульсара J0814+7429 на частоте 135 МГц. Мы также уточняем значение меры дисперсии для пульсаров J0750+57 ( $DM = 26.75 \pm 0.25$  пк/см<sup>3</sup>) и J1706+59 ( $DM = 30.5 \pm 0.25$  пк/см<sup>3</sup>), определенное нами по сильнейшим наблюдаемым импульсам.

На рис. 3 приведены средние профили и сильнейшие импульсы известных пульсаров, найденных в ходе проведенного обзора. Видно, что полуширины сильнейших импульсов существенно меньше, чем полуширины средних профилей пульсаров. По столбцам 5 и 7 в табл. 1 можно оценить, во сколько раз сильнейший импульс у́же, чем средний профиль. Наибольшая разница в полуширине импульса и среднего профиля у пульсара J1910+5655, где полуширины отличаются в 19.8 раза. Наименьшая разница в полуширинах у пульсара J2354+6155, где полуширины среднего профиля и сильнейшего импульса отличаются в 1.3 раза. Медианное значение разницы полуширин приходится на значения 4–5.

Согласно столбцу 11 в табл. 1 пиковая плотность потока сильнейших импульсов, как правило, в десять и более раз больше пиковой плотности потока в среднем профиле пульсаров. Согласно исследованию пульсаров с гигантскими импульсами, проведенному на БСА ФИАН [23], есть ряд признаков, которые отличают пульсар с гигантскими импульсами от обычного пульсара. Два признака, которые можно проверить по нашим данным — это малая ширина гигантского импульса в сравнении со средним профилем и отличие пиковой плотности потока гигантского импульса от интегральной плотности потока в 30 (сильный критерий) или в 10 (слабый критерий) и более раз. Из 12 пульсаров в табл. 1 для двух пульсаров такую оценку сделать не удалось, еще для двух пиковые плотности потока отличаются меньше, чем в 10 раз. Восемь пульсаров удовлетворяют слабому критерию, и четыре из этих восьми удовлетворяют сильному критерию. Поэтому четыре пульсара являются хорошими кандидатами в пульсары с гигантскими импульсами.

Требуются отдельные исследования для того, чтобы проверить, являются ли найденные по диспергированным импульсам источники пульсарами с гигантскими импульсами. В частности, один из объектов (B0809+74/J0814+7429) специально исследовался в работе [23] как кандидат в пульсары с гигантскими импульсами. Для пульсара было найдено почти  $2.8 \times 10^5$  импульсов, из которых 49 удовлетворяли критерию "гигантскости", а именно, их пиковая плотность потока 1500-2000 Ян в 30 и более раз превышала пиковую плотность потока в среднем профиле. Распределение импульсов по энергиям оказалось логнормальным со степенным хвостом. По мнению авторов, построенное ими распределение импульсов по энергиям и наблюдаемый для этого источника дрейф субимпульсов указывают, что пульсар Ј0809+7429 имеет аномально сильные, но не гигантские импульсы.

Помимо известных пульсаров, был найден источник, который отождествить не удалось. У J0812+8626, обозначенного на рис. 2 закрашенным прямоугольником, обнаружено два импульса на  $DM = 40.25 \pm 0.25$  пк/см<sup>3</sup>. Расстояние между импульсами оказалось равным 47.58 с. Произведен поиск периодического излучения в направлении источника в суммированных спектрах мощности и в суммированных периодограммах. Так как у нас было, как минимум, 9–10 дней наблюдений в направлении каждого источника, то некогерентное сложение спектров мощности [24, 25] и периодограмм [26] за все дни наблюде-



**Рис. 3.** Слева – средние профили известных пульсаров, обнаруженных в обзоре по отдельным импульсам, справа – профили самых сильных детектированных импульсов этих пульсаров. На горизонтальной оси оцифровка в точках (3.072 мс в точке). Для всех пульсаров приведен полный период. На вертикальной оси отображена плотность потока в условных единицах. Условные единицы для парных рисунков даны в одной шкале, что позволяет увидеть, во сколько раз пиковые плотности потока сильнейших импульсов больше пиковых плотностей потоков в средних профилях. На левой части парного рисунка приведено название пульсара, на правой части рисунка – его период и мера дисперсии.

ний позволило увеличить чувствительность при поиске периодического излучения примерно в 2–3 раза. Пиковая плотность потока найденных импульсов  $S_p = 10$  и 4.5 Ян, полуширина профиля  $W_e = 10$  мс. Верхняя оценка плотности потока  $S_{int} < 2$  мЯн (если 0.5 с < P < 10 с). Так как появление импульсов RRAT спорадическое, истинные координаты источника могут оказаться в любом месте на диаграмме направленности. Приведем формальные координаты J0812+8626:  $\alpha_{2000} = 08^{h}12^{m}30^{s} \pm 2.5^{m}; \delta_{2000} = 86^{\circ}26' \pm 15'$  (см. рис. 4). Точная координата транзиента не извест-



**Рис. 4.** Динамический спектр (слева) и профиль сильнейшего импульса (справа) RRAT J0812+8626. На вертикальной оси динамического спектра показаны частоты наблюдений. Для профиля одиночного импульса по вертикальной оси приведена плотность потока в условных единицах. На горизонтальных осях показано время наблюдений в точках (одна точка равна 3.072 мс).

на, поэтому нет возможности сделать поправки плотности потока, учитывающие положение лучей БСА ФИАН относительно источника. Приведенные значения пиковых плотностей потока являются нижними оценками. Действительная плотность потока этих импульсов может быть в 1.5–2 раза больше.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении поиска диспергированных импульсов в площадке, покрывающей примерно 4000 кв. град, обнаружено 13 источников импульсного излучения. Двенадцать из них оказались известными пульсарами, у которых детектировано от 1 до 757 импульсов. Четыре пульсара (J0750+57, J1059+6459, J1706+59, J1910+5655) из двенадцати обнаружены в недавних поисках пульсаров на частоте 1400 МГц (Грин-Бенк [22]) и на частоте 135 МГц (LOFAR [20]), и мы подтверждаем их обнаружение на частоте 111 МГц. Для двух (J0750+57, J1706+59) мы уточнили оценку DM. Сравнение полуширин сильнейших импульсов всех 12 пульсаров и полуширин средних профилей этих пульсаров показывает, что средние профили от 1.5 до 20 раз шире, чем сильнейшие импульсы. Сравнение пиковых плотностей потоков сильнейших импульсов и средних прочто четыре филей показывает, пульсара (J0157+6212, J1910+5655, J2337+6151, J2354+6155) хорошие кандидаты в пульсары с гигантскими импульсами. Наилучший кандидат – это пульсар J1910+5655. Пиковая плотность потока его сильнейшего импульса превосходит пиковую плотность потока среднего профиля в 109 раз. Полуширины сильнейшего импульса и среднего профиля отличаются в 20 раз.

Одна из гипотез о природе RRAT была высказана в работе [27]. Согласно предложенной гипотезе вращающиеся транзиенты — это обычные пульсары с необычайно длинным хвостом в распределении импульсов по энергиям. Предполага-

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 98 № 12 2021

ется, что интегральная плотность потока этих пульсаров ниже порога обнаружения для данного радиотелескопа, а отдельные импульсы с хвоста распределения достаточно сильны для их обнаружения. Предельная чувствительность для БСА ФИАН при поиске периодического излучения 5-10 мЯн [16], предельная чувствительность БСА ФИАН при поиске импульсного излучения примерно 2 Ян [17]. Подберем числа, при домножении на которые интегральная плотность потока пульсара уменьшится до 5 мЯн, и домножим на подобранное число пиковую плотность потока сильнейшего импульса данного пульсара. Получим: J0141+6009 (3.1 Ян); J0157+6212 (5.0 Ян); J0653+8051 (4.8 Ян); J0814+7429 (1.5 Ян); J1059+6459 (3.6 Ян); J1840+5640 (4.3 Ян); J1910+5655 (3.1 Ян); J2225+6535 (1.1 Ян): J2337+6151 (2.9 Ян): J2354+6155 (9.7 Ян). Таким образом, из 10 пульсаров, у которых оценена пиковая плотность потока, при удалении пульсара на такое расстояние, чтобы его интегральная плотность потока упала до 5 мЯн, отдельные импульсы не будут видны лишь у двух пульсаров (J0814+7429, J2225+6535).

Гипотеза [27] может быть действительной для части выборки обычных секундных пульсаров. В то же время, как показано в работах [2, 3], типичные периоды RRAT в разы больше типичных периодов секундных пульсаров. Поэтому часть наблюдаемых вращающихся транзиентов принадлежит какой-то другой выборке. Возможно, что часть выборки RRAT связана с гигантскими импульсами. В работах [12, 13] для нескольких RRAT удалось показать, что наблюдаемые импульсы могут являться гигантскими импульсами пульсаров.

Обнаружено два импульса нового RRAT J0812+8626. Детектированное количество импульсов позволяет говорить лишь об обнаружении RRAT, но не дает возможность провести какой-либо анализ.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа С.В. Логвиненко в части создания программы обработки данных была поддержана грантом РФФИ 20-02-00872.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *M. McLaughlin, A. Lyne, D. Lorimer, M. Kramer, et al.*, Nature **439**, 817 (2006).
- 2. *M. A. McLaughlin, A. G. Lyne, E. F. Keane, M. Kramer, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **400**, 1431 (2009).
- 3. *E. F. Keane and M. A. McLaughlin*, Bull. Astron. Soc. India **39**, 333 (2011).
- 4. S. B. Popov, R. Turolla, and A. Possenti, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **369**, L23 (2006).
- S. Burke-Spolaor and M. Bailes, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 402, 855 (2010).
- 6. S. V. Logvinenko, S. A. Tyul'bashev, and V. M. Malofeev, Bull. Lebedev Physics Inst. 47, 390 (2020).
- B. W. Meyers, S. E. Tremblay, N. D. R. Bhat, R. M. Shannon, et al., Publ. Astron. Soc. Australia 36, id. e034 (2019).
- J. Lu, B. Peng, K. Liu, P. Jiang, et al., Sci. China Phys. Mechanics and Astronomy 62(5), id. 959503 (2019).
- E. Keane, D. Ludovici, R. Eatough, M. Kramer, A. G. Lyne, M. A. McLaughlin, and B. W. Stappers, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 401, 1057 (2010).
- 10. B. Y. Cui, J. Boyles, M. A. McLaughlin, and N. Palliyaguru, **840**, id. 5 (2017).
- M. B. Mickaliger, A. E. McEwen, M. A. McLaughlin, and D. R. Lorimer, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 479, 5413 (2018).

- 12. E. A. Brylyakova and S. A. Tyul'bashev, Astron. and Astrophys. 647, id. A191 (2021).
- S. A. Tyul'bashev, T. V. Smirnova, E. A. Brylyakova, and M. A. Kitaeva, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 508, 2815 (2021). https://doi.org/10.1093/mnras/stab2612
- 14. *E. F. Keane and M. Kramer*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **391**, 2009 (2008).
- 15. V. Shishov, I. Chashei, V. Oreshko, S. V. Logvinenko, et al., Astron. Rep. 60, 1067 (2016).
- 16. S. Tyul'bashev, V. Tyul'bashev, V. Oreshko, and S. Logvinenko, Astron. Rep. 60, 220 (2016).
- 17. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, S. V. Logvinenko, et al., Astron. Rep. 62, 63 (2018).
- 18. S. A. Tyul'bashev, P. Y. Golysheva, V. S. Tyul'bashev, and I. A. Subaev, Astron. Rep. 63, 920 (2019).
- 19. R. D. Dagkesamanskii, V. A. Samodurov, and K. A. Lapaev, Astron. Rep. 44, 18 (2000).
- 20. S. Sanidas, S. Cooper, C. G. Bassa, J. W. T. Hessels, et al., Astron. and Astrophys. 626, id. A104 (2019).
- 21. V. M. Malofeev, O. I. Malov, and N. V. Shchegoleva, Astron. Rep. 44, 436 (2000).
- 22. K. Stovall, R. S. Lynch, S. M. Ransom, A. M. Archibald, et al., Astrophys. J. **791**, id. 67 (2014).
- 23. A. N. Kazantsev and V. A. Potapov, Res. Astron. and Astrophys. 18, id. 097 (2018).
- 24. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, A. I. Chernyshova, et al., Astron. Rep. 61, 848 (2017).
- 25. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, and G. E. Tyul'basheva, Astron. Rep. 64, 526 (2020).
- 26. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, and G. E. Tyul'basheva, Astron. Rep., in press (2021).
- 27. P. Weltevrede, B. W. Stappers, J. M. Rankin, and G. A. E. Wright, Astrophys. J. 645, L149 (2006).