

## ПОИСК ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ТРАНЗИЕНТОВ С ПЕРИОДАМИ БОЛЬШЕ ДВУХ СЕКУНД НА СКЛОНЕНИЯХ ОТ $+21^\circ$ ДО $+42^\circ$

© 2024 г. С. А. Тюльбашев<sup>1,\*</sup>, Г. Э. Тюльбашева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева, Астрокосмический центр,  
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Пушкино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Институт математических проблем биологии Российской академии наук,  
филиал Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Пушкино, Россия я

\*E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 20.06.2024 г.

После доработки 27.08.2024 г.

Принята в печать 11.09.2024 г.

Проведен поиск долгопериодических транзиентов с периодами  $P$  от 2 до 90 с в ежедневных наблюдениях, проводимых на интервале 5 лет в площадке размером 6300 кв. град. Данные получены на Большой синфазной антенне (БСА) на частоте 111 МГц. Для поиска использовались периодограммы, построенные с помощью алгоритма быстрого суммирования (FFA; Fast Folding Algorithm). Для увеличения чувствительности, периодограммы, полученные в разных наблюдательных сессиях, складывались. Из 14 известных пульсаров, попавших в исследуемую площадку и имеющих периоды  $P > 2$  с и меры дисперсии  $DM < 200$  пк/см<sup>3</sup>, обнаружены 9 объектов, известных по каталогу ATNF. Найдены 2 новых пульсара. Получены средние профили пульсаров и даны оценки их плотностей потоков. Открытый пульсар J1951+28, имеющий период  $P = 7.3342$  с и  $DM = 3\text{--}4$  пк/см<sup>3</sup>, оказался одним из самых близких к Солнцу пульсаров в северном полушарии. Отсутствие новых долгопериодических транзиентов (пульсаров или белых карликов), имеющих периоды десятки секунд при достигнутой чувствительности поиска 1 мЯн вне галактической плоскости, говорит о низкой вероятности существования пульсаров–нейтронных звезд с экстремально большими периодами. Вероятнее всего, недавно найденные источники периодического излучения с периодами от минуты до десятков минут являются белыми карликами.

**Ключевые слова:** поиск пульсаров

**DOI:** 10.31857/S0004629924120074 **EDN:** ICKCOZ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Как правило, употребляя слово радиопульсар (пульсар), подразумевают, что он является быстровращающейся нейтронной звездой, которая на каждом или почти на каждом обороте излучает импульс в радиодиапазоне. Этот импульс мы видим благодаря тому, что ось вращения и магнитная ось располагаются под углом друг к другу.

Первые пульсары были открыты по наблюдениям отдельных импульсов [1], однако сразу после открытия стало ясно, что для поиска и исследования слабых пульсаров нужно увеличивать отношение сигнала к шуму ( $S/N$ ). Для этого отдельные импульсы необходимо складывать. Действительно, складывая импульсы с известным периодом, мы увеличиваем  $S/N$  как корень квадратный из числа сложенных импульсов. Таким образом, складывая импульсы на

все более долгих временных интервалах, можно обнаруживать все более слабые пульсары.

При поиске пульсаров нужно подбирать две характеристики: период пульсара ( $P$ ) и меру дисперсии ( $DM$ ), отражающую количество электронов на луче зрения. Простое сложение импульсов с одновременным перебором всех возможных значений  $DM$  оказалось очень затратным с точки зрения вычислительных ресурсов, поэтому почти сразу после открытия пульсаров для оценки  $P$  и  $DM$  при поиске кандидатов в пульсары были предложены давно известные в математике алгоритмы быстрого суммирования. Спектры мощности, получаемые с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) [2], выявляют периодические сигналы в частотной области. Периодограммы, получаемые с помощью метода быстрого сворачивания (FFA) [3], выявляют периодические сигналы во временной области. Использование для поиска пульсаров спектров мощности оказалось малозатратным по вычислительным

ресурсам, и используется с небольшими вариациями до настоящего времени. Периодограммы требуют больше счетных ресурсов, чем спектры мощности, поэтому их использование для поиска пульсаров вновь начали рассматривать почти через 50 лет после первого применения [4, 5].

И спектры мощности, и периодограммы позволяют проводить поиск пульсаров, но есть нюансы, которые нужно учитывать. Фурье спектры лучше работают, если сигнал занимает большую часть периода, тем самым становясь похожим на часть синусоиды. Периодограммы лучше работают с узкими сигналами. В отличие от Фурье спектров мощности, у которых полная энергия импульсов в периодическом сигнале распределяется по всем гармоникам, периодограммы собирают всю энергию в одной гармонике, что позволяет реализовать максимальную чувствительность. Недавние поиски пульсаров с использованием периодограмм показали, что для пульсаров с узкими импульсами, занимающими незначительную часть периода, чувствительность при FFA поиске может быть выше до 7–8 раз по сравнению со стандартным поиском с помощью спектров мощности [6, 7].

При работе с реальными данными, а не с моделированным сигналом, до использования FFT или FFA необходимо произвести вычитание фонового сигнала из данных наблюдений (вычитание базовой линии). Наблюдаемый на радиотелескопе сигнал складывается из путаницы протяженных и компактных радиоисточников, попадающих в диаграмму направленности радиотелескопа. На эту путаницу накладывается галактический фон, частотные и временные помехи, излучение сильных источников в боковых и задних лепестках антенны. В метровом диапазоне длин волн добавляются еще и мерцания на межпланетной среде и на ионосфере. Все составляющие наблюдаемого сигнала имеют разные характерные временные масштабы, и вычитание базовой линии становится не тривиальной процедурой. В результате неполного вычитания базовой линии в спектрах мощности остаются составляющие (красный шум), соответствующие низким частотам (большим периодам).

Поиск обычных пульсаров на радиотелескопе Большая синфазная антенна (БСА), проведенный с помощью суммированных спектров мощности, показал, что высокую чувствительность можно гарантировать для пульсаров, имеющих  $P < 2\text{--}3$  с [8]. На периодах  $P > 2\text{--}3$  с начинает проявляться низкочастотный шум, мешающий визуальному поиску кандидатов в пульсары, а на периодах  $P > 3\text{--}4$  с крас-

ный шум не позволяет выделять гармоники. Однако, если пульсар сильный, его можно обнаружить по второй, третьей и последующим гармоникам.

Общее количество пульсаров с большими периодами невелико, а их поиск с помощью Фурье спектров мощности затруднен по причинам, указанным выше. Действительно, в пульсарный каталог ATNF<sup>1</sup> [9] на апрель 2024 г. включено около 3000 радиопульсаров, из них  $P > 2$  с имеют около 250 пульсаров ( $\approx 8\%$ ),  $P > 4$  с наблюдается у 78 пульсаров  $P > 6$  с — у 21 пульсара ( $\approx 0.7\%$ ). В отличие от спектров мощности, низкочастотный шум в периодограммах менее выражен, поэтому периодограммы можно использовать для поиска пульсаров с большими периодами.

За последние пять лет произошло неожиданное увеличение списка долгопериодических транзиентов, имеющих сверхбольшие периоды. В работах [10, 11, 12, 13] говорится об открытии транзиентов J0250+5854, J0901–4046, J1627–5235, J1839–1031 с периодами  $P = 23.5, 75.88, 1091, 1318$  с, обнаруженных на частотах 135 МГц (LOFAR), 1.3 ГГц (MeerKAT), 150 и 80 МГц (MWA). При этом нет ясности, все ли эти долгопериодические транзиенты являются нейтронными звездами, или часть из них — белые карлики. Если указанные источники со сверхбольшими периодами являются пульсарами, то их общее количество в выборке радиопульсаров должно быть чрезвычайно мало, если они являются белыми карликами, то их количество может быть велико [14]. Для ответа на этот вопрос нужны наблюдения больших небесных площадок на длительных интервалах времени.

В настоящей работе мы провели поиск пульсаров с периодами в интервале 2–90 с, реализуя высокую чувствительность суммированием FFA спектров, что позволило исключить низкочастотный (красный) шум, наблюдаемый в Фурье спектрах мощности на периодах  $P > 2$  с. Во втором разделе рассмотрена антенна и способ обработки наблюдений. В третьем разделе говорится об открытых источниках периодического излучения и приведены их параметры. В четвертом обсуждаются полученные результаты и дано краткое заключение.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Для поиска пульсаров были использованы мониторинговые круглосуточные наблюдения, проводящиеся с 2014 г. на радиотелескопе БСА Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН) на частоте 111 МГц. БСА ФИАН имеет две независимые

<sup>1</sup> <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

диаграммы направленности, одна из которых (БСА3) имеет 128 стационарных лучей, покрывающих склонения  $-9^\circ < \delta < +55^\circ$  [15, 16]. Данные записываются в двух частотно-временных режимах: 32 частотных канала шириной 78 кГц и с временем опроса точки 12.5 мс, и 6 частотных каналов шириной 415 кГц и с временем опроса точки 100 мс. При низком частотно-временном разрешении объем записи за год в 128 лучах оказывается чуть больше терабайта, при высоком частотно-временном разрешении — около 42 Тб. Эффективная площадь радиотелескопа примерно 45000 кв. м, полоса приема — 2.5 МГц. Лучи БСА3 пересекаются по уровню мощности 0.405.

Данные записываются на три регистратора. Мы обрабатывали данные с регистратора, записывающего 48 лучей БСА3, покрывающих склонения  $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ . На этих склонениях есть многолетние ряды наблюдений, и на них фиксируется минимум помех. Для обработки был взят пятилетний интервал наблюдений за 2015–2019 гг. На склонениях ниже  $+21^\circ$  увеличивается количество промышленных помех, и нужно предпринимать дополнительные меры при обработке данных. На склонениях выше  $+42^\circ$  регистраторы были подключены к лучам БСА3 в 2021–2022 гг., т.е. в наличии лишь относительно короткий ряд наблюдений.

Схема обработки повторяет ранее реализованный способ поиска пульсаров с помощью FFT [17]. Суть обработки заключалась в том, что для увеличения чувствительности мы складывали спектры мощности, соответствующие наблюдениям с одного направления на небе за весь интервал мониторинговых наблюдений. Это повысило чувствительность поиска примерно в 40 раз при сложении спектров мощности на интервале около 3000 дней (период наблюдений 2014–2022 гг.). Спектры мощности, полученные за разные дни, можно складывать. Если в записи есть пульсар, в спектре мощности теряется информация о фазе импульса пульсара, но остается информация о его периоде. И этот период всегда соответствует определенному номеру точки на Фурье спектре мощности.

Аналогичная ситуация возникает и при суммировании периодограмм. Если в записи есть периодический сигнал от пульсара, он отражается в FFA спектре как гармоника, видимая на основном периоде пульсара и периодах кратных основному. Фаза сигнала при этом теряется. Так как периоды пульсаров со временем изменяются медленно, гармоники, соответствующие периодам пульсаров в FFA спектрах, попадают на одни и те же номера точек в этих спектрах. Если в каком-то направлении есть

пульсар, при суммировании периодограмм за разные дни  $S/N$  гармоник будет расти.

Для обработки наблюдений использовался блок счета FFA<sup>1</sup>, описанный в работе [4]. Как рекомендовано авторами программы, счет проводился независимо для периодов  $2 < P < 50$  с и  $30 < P < 90$  с. Обработка данных шла последовательно по дням. Каждый день был разделен по координатам, фиксированным по прямому восхождению и склонению. Каждая координата по прямому восхождению обрабатывалась параллельно на многоядерном процессоре сервера. Обработка года наблюдений занимала 3 дня.

Для экономии счетных ресурсов мы взяли данные, имеющие низкое частотно-временное разрешение. В первом приближении использование данных с низким частотно-временным разрешением оправдано, так как согласно каталогу ATNF ширины импульсов пульсаров по уровню 10% от высоты профиля ( $W_{10}$ ), имеющих  $P > 2$  с, начинаются с 40 мс. Для таких пульсаров потеря  $S/N$  в FFA спектре из-за слишком большого времени опроса точки будет равна  $(100/40)^{1/2} = 1.6$ . У половины пульсаров, имеющих  $P > 2$  с, ширины импульсов  $W_{10} > 80$  мс, поэтому потеря  $S/N$  для таких пульсаров будет меньше, чем  $(100/80)^{1/2} = 1.1$  раза. По нашим оценкам чувствительность при сложении периодограмм на интервале 1 год может вырасти примерно в 10–15 раз [18]. Эта оценка роста  $S/N$  справедлива, если время опроса точки равно длительности импульса. Учитывая, что мы обрабатываем данные с низким частотно-временным разрешением, средние потери в чувствительности будут примерно 30–40% и чувствительность в суммированных FFA спектрах вырастет в 7–11 раз.

Так как ширина импульса может быть больше времени опроса точки, для таких пульсаров появится потеря чувствительности уже из-за слишком широких импульсов. Поэтому FFA спектры нужно получать при разном начальном усреднении данных. Мы усредняли данные с шагом скользящего среднего 2, то есть предполагая ширину импульса 100, 200, 400 мс и до 25600 мс. Согласно ATNF у 90% всех пульсаров, имеющих оценку  $W_{10}$ , отношение  $W_{10}/P$  не превышает 7.5%. То есть для пульсара с  $P = 90$  с ширина импульса будет  $W_{10} < 6.75$  с (6750 мс) для 90% пульсаров. Мы же делаем поиск при существенно больших предполагаемых ширинах импульсов и поэтому не ожидаем уменьшения чувствительности для пульсаров с широкими сред-

<sup>1</sup> <https://github.com/v-morello/riptide>



ними профилями. При просмотре периодограмм программа визуализации позволяет вывести  $S/N$  в гармонике в зависимости от предполагаемой ширины импульса. Это позволяет сделать грубую оценку ширины импульса.

Таким образом, использование данных с низким частотно-временным разрешением потенциально может привести к потере чувствительности в несколько десятков процентов. Мы посчитали возможную потерю чувствительности приемлемой, учитывая, что FFA обработка данных с высоким частотно-временным разрешением может по оценкам занять около года работы сервера. В наших планах есть поиск пульсаров с помощью периодограмм по данным, имеющим высокое частотно-временное разрешение для пульсаров с периодами от 0.025 мс. Однако цель настоящей работы — это поиск пульсаров с  $P > 2$  с и оценка их количества на небе.

Чувствительность при поиске пульсаров меняется, и зависит от периода и меры дисперсии пульсаров. Согласно выводам работы [17, рис. 4] для пульсаров с  $P > 2$  с в 3.5-минутной наблюдательной сессии будут обнаружены все пульсары, имеющие интегральную плотность потока  $S_{\text{int}} > 10\text{--}13$  мЯн и  $S/N \geq 6$ . Мы выбрали границу поиска  $S/N \geq 10$ . Учитывая ожидаемый рост чувствительности на годовом интервале, получим, что граница чувствительности при поиске будет  $S_{\text{int}} \approx 1.1$  мЯн в направлении на зенит и вне плоскости Галактики. Так как наблюдения проводились не в зените, а чувствительность между лучами БСА может упасть в  $0.405^{-1} = 2.5$  раза [16], наихудшая чувствительность будет 2.7 мЯн, с учетом косинуса высоты источника над горизонтом на склонении  $+21^\circ$  и попадания пульсара ровно между лучами. Таким образом, 2.7 мЯн — это ожидаемая граница полноты обзора. Мы должны зарегистрировать все пульсары, у которых  $S_{\text{int}} \geq 2.7$  мЯн. При этом самые слабые пульсары, доступные для детектирования, могут иметь  $S_{\text{int}} = 1.1$  мЯн. Для плоскости Галактики оценки чувствительности ухудшатся примерно в 2 раза. Все представленные оценки чувствительности относятся к  $DM < 200$  пк/см<sup>3</sup> [17]. На больших значениях  $DM$  чувствительность резко падает из-за рассеяния.

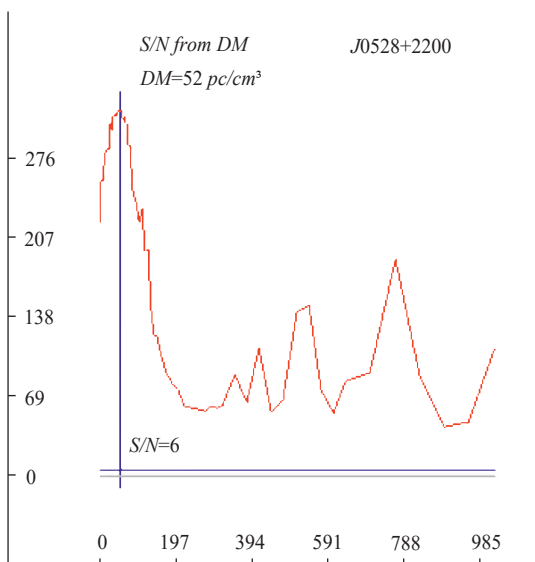
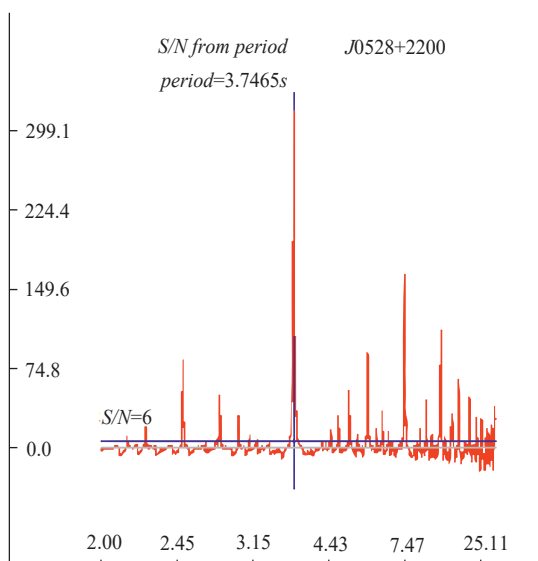
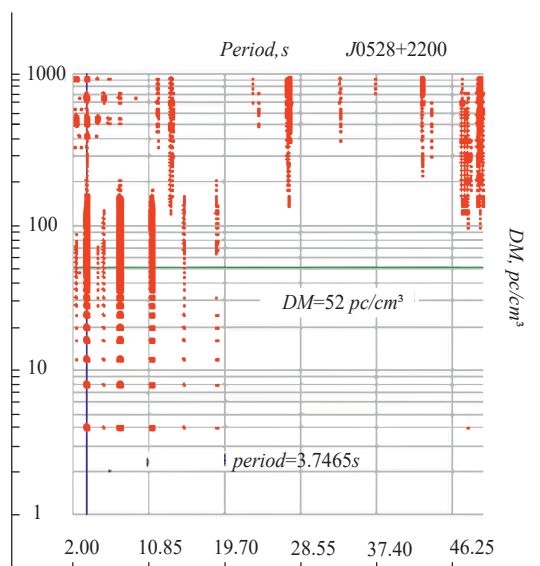
Суммарные периодограммы, построенные для данного направления на небе с перебором различных  $DM$ , представляются на картах вида  $P/DM$ . Несмотря на то, что в проекте по поиску пульсаров PUMPS не обнаружено ни одного пульсара, имеющего  $DM > 250$  пк/см<sup>3</sup> [8], карты построены до  $DM = 1000$  пк/см<sup>3</sup>. Столь высокая граница  $DM$  свя-

зана с тем, что чем больше период пульсара, тем в среднем шире импульсы, и тем меньше рассеяние импульсов влияет на чувствительность. Поэтому карты построены с запасом по  $DM$ , на случай обнаружения пульсаров с широкими профилями и большими периодами.

Для получения  $P/DM$  карт в каждом FFA спектре запоминаются значения гармоник, имеющих  $S/N$  больше заданного, и на картах показываются только эти значения. Пульсар на карте  $P/DM$  виден как набор вертикальных отрезков, ограниченных по  $DM$  (ось  $y$ ) и имеющих координаты по  $P$  (ось  $x$ ), близкие к периоду пульсара и к кратным периодам (см. рис. 1). Значения  $S/N$  периодограмм представляются на интерактивной карте  $P/DM$  в программе визуализации. С помощью мыши можно захватить значения  $P$  и  $DM$  на отрезках и увидеть оригинальные периодограммы, а также более точно оценить  $DM$ . На суммированном FFA спектре (средняя панель) видны характерные треугольные структуры, максимумы которых совпадают с основным периодом и кратными ему гармониками. Правая панель позволяет грубо оценить ожидаемую  $DM$  пульсара. Так как пульсар очень сильный, его сигнал в периодограмме виден на всех мерах дисперсии. Горизонтальная синяя линия на рисунке отмечает уровень  $S/N = 6$ .

После визуального обнаружения кандидатов на картах проводится их поиск по каталогу ATNF. Если источник в ATNF не отождествляется, проводятся работы, в ходе которых нужно показать, что наблюдается новый источник, либо видимые гармоники имеют иную природу. Для этого все кандидаты в новые пульсары проверяются в данных с высоким частотно-временным разрешением.

Алгоритм поиска подробно описан в работе [8]. Суть заключается в том, что из полученных карт берутся начальные значения  $P$  и  $DM$  кандидата. Для каждого доступного дня строятся сотни средних профилей с перебором  $P$  и  $DM$  рядом с выбранными начальными значениями. Все обработанные дни сортируются по уменьшению максимума  $S/N$  в предполагаемом среднем профиле. Такая сортировка помогает выбирать дни с наилучшими профилями. Если максимумы в средних профилях пульсаров за разные наблюдательные сессии получаются на близких  $P$  и  $DM$ , считается, что новый пульсар обнаружен. Значения  $P$  и  $DM$ , на которых в среднем профиле наблюдается максимум  $S/N$ , могут отличаться от начальных значений, взятых из карт  $P/DM$ . Если



средний профиль удалось получить, именно эти скорректированные значения входят в таблицы.

Чувствительность БСА3 в стандартной сессии длительностью 3.5 мин позволяет обнаруживать пульсары с  $S_{\text{int}} = 6\text{--}8$  мЯн вне плоскости Галактики и  $S_{\text{int}} = 15\text{--}20$  мЯн в плоскости Галактики [15]. Как было отмечено выше, при улучшении чувствительности в  $\sim 10$  раз на картах  $P/DM$  могут обнаруживаться пульсары с  $S_{\text{int}} = 1.1\text{--}2.7$  мЯн вне плоскости и в плоскости Галактики. Поэтому, если у слабого пульсара нет сильных (5–10 раз) флуктуаций плотности потока в разные дни, в ходе проверочного поиска зачастую не находится ни одной сессии, по которой можно получить средний профиль [8].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Проверка в каталоге ATNF показывает, что в площадке  $+21^\circ < \delta < +42^\circ$  расположены 14 канонических (имеющих регулярное излучение) пульсаров, у которых  $P > 2$  с,  $DM < 200$  пк/см<sup>3</sup>. Из 14 пульсаров 9 объектов (J0323+3944, J0349+2340, J0509+37, J0528+2200, J0546+2441, J0928+30, J0944+4106, J1746+2245, J1845+21) обнаружены на картах  $P/DM$ . Все эти пульсары ранее обнаруживались и в поиске с помощью суммированных Фурье спектров мощности. Из этих 9 пульсаров 3 были открыты нами ранее на БСА3: J0509+37, J0928+30, J1845+21<sup>1</sup>.

При этом пять из 14 пульсаров (J1829+25, J2000+2920, J2011+3006, J2015+2524, J2111+4058) не обнаружены в суммированных FFA спектрах. Ранее поиск в этой же площадке с помощью FFT спектров проводился на восьмилетнем интервале<sup>2</sup> [8], и ни один из этих 5 пульсаров также не был обнаружен. В то же время известно, что у некоторых пульсаров наблюдается вспыхивающее поведение. Это выключающиеся (intermittent) пульсары, пульсары с нуллинами, пульсары с сильной собственной переменностью и/или переменностью, вызванной межзвездной средой. Поиск таких пульсаров в суммированных FFA спектрах не является оптимальным, так

**Рис. 1.** Пример  $P/DM$  карты (левая панель), суммированной периодограммы (средняя панель) и зависимости максимума гармоники в периодограмме (ее  $S/N$ ) от  $DM$  (правая панель), сгенерированные программой просмотра данных для известного пульсара J0528+2200. Пересечение зеленой (горизонтальной) и синей (вертикальной) линий на карте указывают на  $P$  и  $DM$  сильнейшего сигнала в периодограммах. На  $P/DM$  карте показаны сигналы, имеющие  $S/N > 50$ .

<sup>1</sup> <https://bsa-analytics.prao.ru/en/pulsars/new>

<sup>2</sup> <https://bsa-analytics.prao.ru/en/pulsars/known/>

как сессии, в которых пульсар мог быть обнаружен, будут складываться с сессиями, в которых его излучение отсутствует или очень слабое. Для таких пульсаров нужно проводить поиск излучения за отдельные дни. Например, в работе [19] отмечены вращающиеся радиотранзиенты (RRAT) J0642+30 и J1516+27, у которых регулярное (периодическое) излучение не обнаружено в суммарных спектрах мощности при накоплении, эквивалентном 6 суткам непрерывных наблюдений, но при этом периодическое излучение детектировано в нескольких отдельных сессиях длительностью 3.5 минуты.

Мы провели поиск пяти пульсаров, не обнаруженных в суммированных периодограммах, в ежедневных сессиях на интервале около 10 лет (август 2014 — март 2024). Ни один из пульсаров не найден. Эти пульсары также не были найдены и в поиске пульсаров на LOFAR [20], где на частоте 135 МГц в сессиях длительностью один час чувствительность достигала 1.2 мЯн. Оценка интегральной плотности потока этих не обнаруженных пульсаров на частоте 111 МГц  $S_{\text{int}} < 1$  мЯн.

В площадку также попадают 8 RRAT (J1336+33, J1354+2454, J1502+28, J1538+2345, J1940+2203, J1940+2231, J1946+24, J2008+3758). Из них J1336+33, J1502+28 были ранее открыты на БСАЗ<sup>1</sup>, а J1538+2345 тоже обнаруживался по его импульсам. Периодическое излучение этих RRAT в суммарных периодограммах не обнаружено.

Помимо пульсаров с периодами  $P > 2$  с, на картах  $P/DM$  обнаружено 49 канонических (секундных) пульсаров в гармониках на кратных периодах. Все эти пульсары ранее обнаруживались и в поиске с помощью суммированных спектров мощности. Поэтому в настоящей работе мы не приводим для них детали, и отмечаем их обнаружение для полноты картины. В качестве примера отметим пульсар J2022+2854 (B2020+28), имеющий  $P = 0.3434$  с и детектированный на  $P/DM$  карте на семикратном периоде ( $P = 2.4040$  с).

На рис. 2 приведены средние профили известных пульсаров, которые удалось получить по данным, имеющим высокое частотно-временное разрешение. В табл. 1 приведены параметры пульсаров. В столбцах 1–5 даны имя пульсара, его период и мера дисперсии по каталогу ATNF и по наблюдениям на БСАЗ. Столбцы 2–3 и 4–5 позволяют на практике оценить точность оценок по наблюдениям на БСАЗ. В столбцах 6–9 приведены  $S/N$  в профиле,  $S_{\text{peak}}$  (пиковая плотность потока),  $S_{\text{int}}$  и ширины профилей по

уровню 0.5 от высоты профиля ( $W_{50}$ ). При оценке  $S_{\text{int}}$  и  $S_{\text{peak}}$  выбирались средние профили, у которых визуально на картинке было наилучшее качество. Так как точные координаты пульсаров есть в ATNF, можно сделать поправки, связанные с неточным попаданием пульсаров по центру диаграммы направленности БСАЗ. Учитывая, что для оценок использовались лучшие по качеству записи, в табл. 1 размещены оценки плотностей потоков близкие к максимальным. Звездочка рядом с названием пульсара указывает, что пульсар был обнаружен в суммарных периодограммах, но средний профиль из индивидуальных наблюдательных сессий получить не удалось.

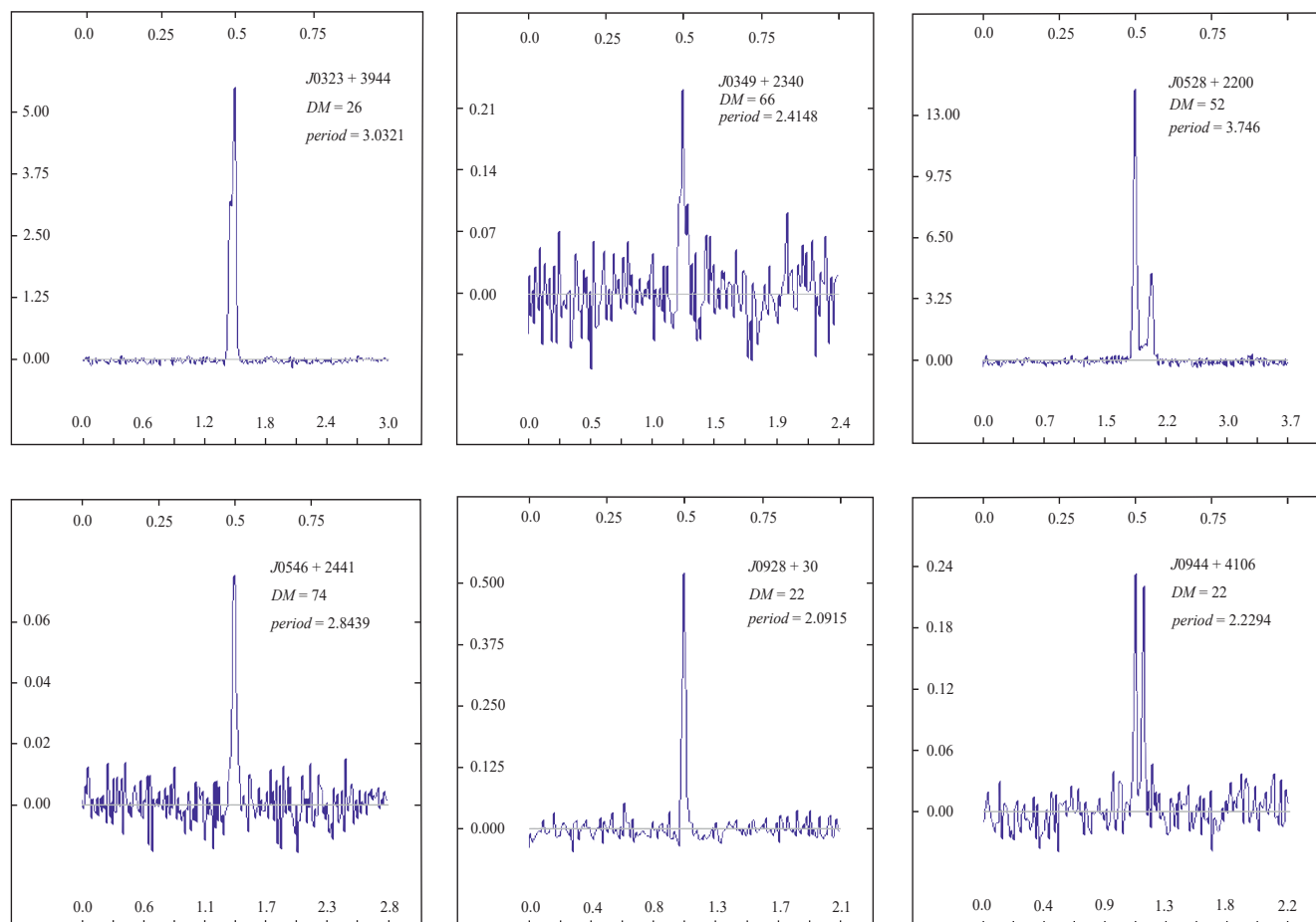
Если средний профиль для пульсара получить не удалось (пульсары J0509+37, J1746+2245, J1845+21), в таблицу помещались оценки, опирающиеся на  $P/DM$  карты (на  $S/N$  обнаруженного пульсара в суммированной периодограмме). Оценка интегральной плотности потока по суммированным FFA спектрам сделана исходя из ожидаемой чувствительности БСАЗ в направлении пульсара, с учетом температуры фона Галактики. Температура фона пересчитана из температуры на изофотах, полученных на частоте 178 МГц [21]. Пересчет произведен в предположении, что температура фона подчиняется закону  $T \sim \nu^{-2.55}$ .

Оценки  $S_{\text{int}}$  пульсаров из табл. 1, полученные на близких частотах (103, 111, 120, 135 и 150 МГц) ранее публиковались в работах [23, 22, 15, 20]. Для пульсаров J0323+3944, J0528+2200, J0546+2441, J0944+4106, J1746+2245 оценки в табл. 1 согласуются с оценками из ранних работ. Для пульсаров J0349+2340, J0509+37, J0928+30, J1845+21 нам не удалось обнаружить в литературе оценок интегральных плотностей потоков, определенных на частотах 100–150 МГц близких к частоте наблюдений на БСА ФИАН. Оценки пиковой и интегральной плотностей потоков даны впервые в указанном диапазоне.

Помимо известных пульсаров, были обнаружены два новых пульсара (J1845+41, J1951+28). На рис. 3 показаны рисунки, по которым произошло визуальное обнаружение пульсаров. На картах  $P/DM$  по вертикали видны вертикальные отрезки, ограничивающие возможные  $DM$ . Видны также и гармоники на кратных периодах.

Первоначальные значения  $P$  и  $DM$ , полученные по поиску в периодограммах, представлены на картах (рис. 3). Для пульсара J1951+28 было проведено уточнение параметров пульсаров из средних профилей (см. рис. 4), получаемых в ходе перебора первоначальных значений  $P$  и  $DM$ , взятых из карт  $P/DM$ . Средний профиль получен с привлечением данных с высоким ча-

<sup>1</sup> <https://bsa-analytics.prao.ru/en/transients/rrat/>

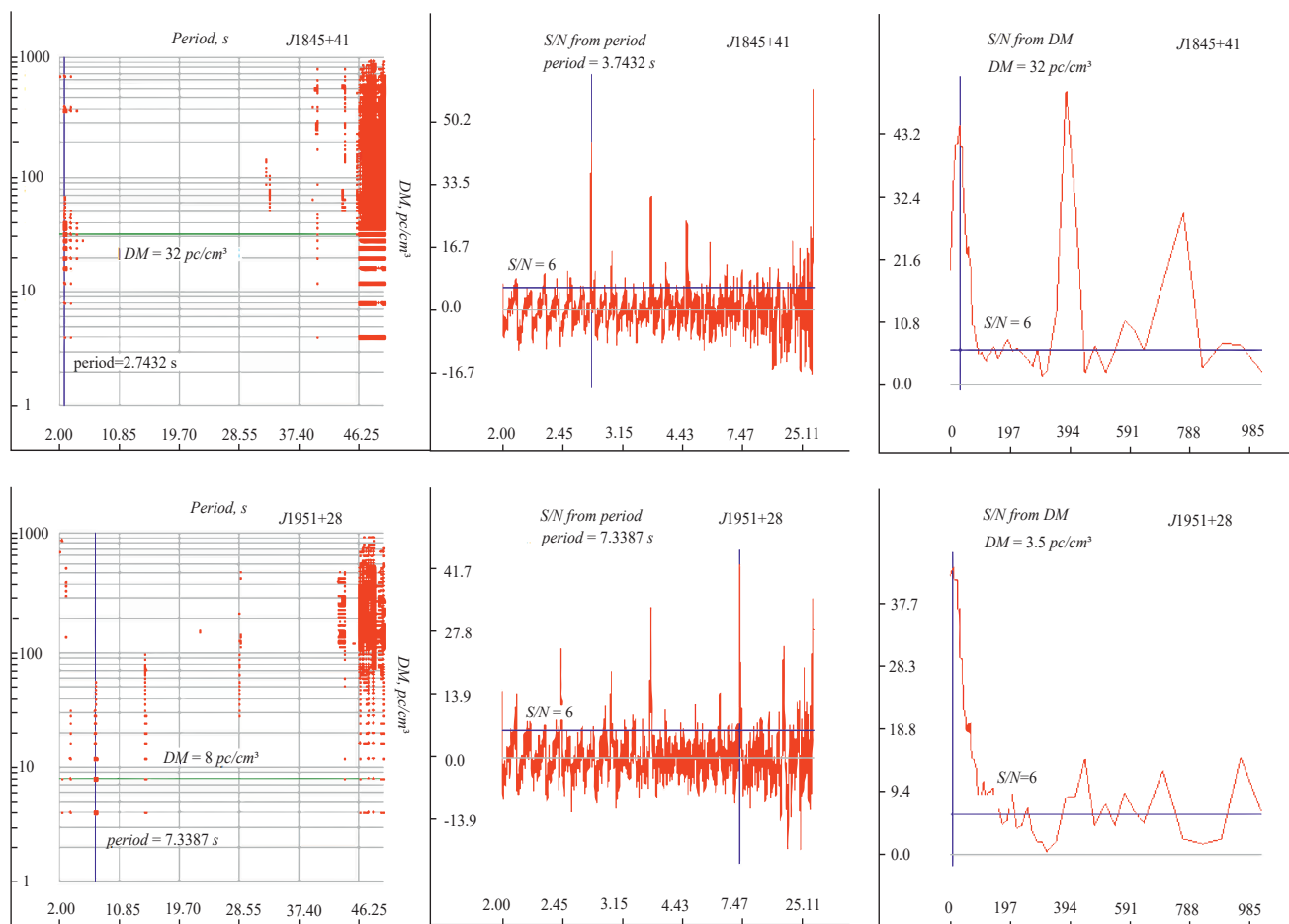


**Рис. 2.** Средние профили пульсаров. На верхней горизонтальной оси каждого профиля показана фаза, на нижней горизонтальной оси — время в секундах (размер шкалы равен периоду пульсара). На вертикальной оси плотность потока в янских. Максимум среднего профиля соответствует фазе 0.5.

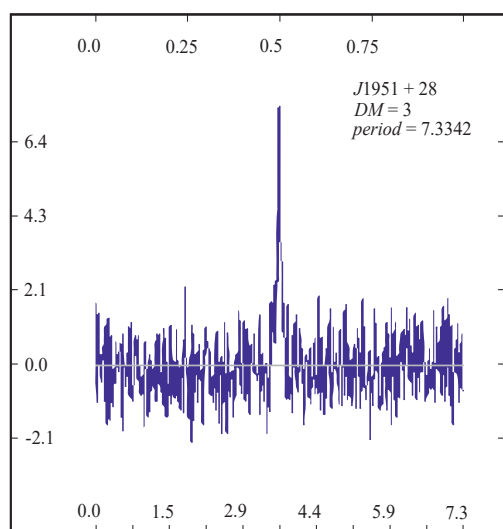
**Таблица 1.** Характеристики пульсаров, попавших в площадку обзора

Имя	$P_{\text{ATNF}}$	$DM_{\text{ATNF}}$	$P_{\text{BCA3}}$	$DM_{\text{BCA3}}$	$S/N$	$S_{\text{peak}}$	$S_{\text{int}}$	$W_{50}$
J0323+3944	3.0320	26.1	3.0321	26	130	6012	115	65
J0349+2340	2.4207	62.9	2.4204	65	8.5	296	4.3	29
J0509+37*	2.4961	30	2.478	30	—	—	$\leq 1.6$	—
J0528+2200	3.7455	50.8	3.7448	50	82	14181	231	45
J0546+2441	2.8438	73.8	2.8439	72	13	774	14.5	51
J0928+30	2.0915	21.9	2.0915	22	33	576	7.7	29
J0944+4106	2.2294	21.4	2.2294	21	15	247	5.9	76
J1746+2245*	3.4650	49.8	3.4646	48	—	—	$\leq 2.5$	—
J1845+21*	3.7556	50	3.7203	40	—	—	$\leq 1.6$	—

**Примечание.** Звездочка рядом с названием пульсара указывает, что пульсар был обнаружен в суммарных периодограммах, но средний профиль из индивидуальных наблюдательных сессий получить не удалось.



**Рис. 3.** Панели повторяют панели рис. 1 для двух новых пульсаров. На периодограммах (в центре) показаны кратные гармоники пульсаров. В правой части красные полосы соответствуют периодам больше 30 с. В периодограммах, построенных для периодов 30–90 с сигналы с большими значениями  $S/N$  не обнаружены.



**Рис. 4.** Средний профиль пульсара J1951+28. Оси размечены как на рис. 2: верхняя шкала фаза, нижняя время в секундах.

стотно-временным разрешением, как это описано в разделе 2 «Наблюдения и обработка».

Извлеченные характеристики новых пульсаров:

#### J1845+41

$$\alpha_{2000} = 18^{\text{h}}45^{\text{m}}40^{\text{s}} \pm 30^{\text{s}};$$

$$\delta_{2000} = 41^{\circ}13' \pm 10';$$

$$P = 2.7432 \pm 0.0050 \text{ с};$$

$$DM = 30 \pm 3 \text{ пк/см}^3;$$

$$S_{\text{int}} < 1 \text{ мЯн};$$

$$W_{50} < 100\text{--}200 \text{ мс}.$$

#### J1951+28:

$$\alpha_{2000} = 19^{\text{h}}51^{\text{m}}30^{\text{s}} \pm 45^{\text{s}};$$

$$\delta_{2000} = 28^{\circ}46' \pm 10';$$

$$P = 7.3342 \pm 0.0010 \text{ с};$$

$$DM = 3.5 \pm 2 \text{ пк/см}^3;$$



$$S_{\text{peak}} = 0.68 \text{ Ян};$$

$$S_{\text{int}} = 11 \text{ мЯн};$$

$$W_{50} = 130 \text{ мс}.$$

Пульсар J1951+28 находится близко к плоскости Галактики ( $b < 1^\circ$ ). Следовательно, он многократно попадал в разные обзоры по поиску пульсаров. Пульсар имеет высокие значения пиковой и интегральной плотности потока и, тем не менее, до настоящего момента не был обнаружен. В нашем десятилетнем ряду наблюдений у него есть десятки сессий длительностью 3.5 минуты, где удалось получить его средний профиль. То есть пульсар стабильно излучает в радиодиапазоне. Отметим также, что пульсар J1951+28 является одним из самых близких к Солнцу пульсаров с очень низкой светимостью. Расстояние  $D = 249$  пк определено для него по модели YMW16 [24]. Его светимость  $L_{111} = 11 \times 0.2492 = 0.68 \text{ мЯн} \cdot \text{кпк}^2$ . Для удобства читателей переведем эту светимость на частоту 400 МГц, на которой из 3534 пульсаров, известных в ATNF на май 2024 г., есть оценки светимости для 806 пульсаров. Предполагая спектральный индекс 1.8, получим интегральную плотность потока  $S_{400} = 1.1 \text{ мЯн}$ , а светимость  $L_{400} = 1.1 \times 0.2492 = 0.068 \text{ мЯн} \cdot \text{кпк}^2$ . На сегодняшний день в ATNF наименьшие светимости отмечены у пульсаров J0307+7443, J0613+3731 и J1016–5345, которые равны соответственно 0.044, 0.055 и 0.047 мЯн·кпк<sup>2</sup>. Оценка светимости J1951+28 сопоставима со светимостями этих пульсаров. Заметим также, что обычно низкие радиосветимости (или отсутствие детектированного радиоизлучения) и большие периоды характерны для магнетаров, но так как у нас нет тайминга для пульсара J1951+28, нет и возможности оценить величину его магнитного поля.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во введении мы указали на долгопериодические транзиенты, найденные в радиодиапазоне. У них отмечены периоды от десятков секунд до десятков минут. Долгопериодические транзиенты находят также в диапазонах, отличных от радиодиапазона. Например, в работе [25] говорится об обнаружении в рентгеновском и оптическом диапазонах пульсара J2056–3014 с периодом 29.6 с, в работе [26] – об обнаружении пульсара J0240+1952 с периодом 24.9 с, в работе [27] – об обнаружении пульсара J1912–4410 с периодом 319 с. В работе [28] говорится об обнаружении рентгеновского пульсара J2043+4438 с периодом 742 с. Значения периодов пульсаров, обнаруженных в рентгеновском диапазоне, сравнимы со

значениями периодов радиопульсаров, отмеченных во Введении.

Однако, природа долгопериодических транзиентов может быть различна. Как утверждают авторы указанных выше работ, часть из найденных источников является пульсарами, а часть белыми карликами. В то же время, необходимо отметить, что для объектов с периодами больше, чем несколько десятков секунд, выяснение их природы представляет непростую задачу.

Очевидно, что минимальные периоды белых карликов ограничены снизу, так как центробежная сила не должна превосходить силу притяжения вещества на поверхности звезды. Минимальные известные периоды белых карликов  $P \simeq 25$  с [25, 26] примерно в  $10^4$  раз больше минимальных периодов пульсаров. В свою очередь, периоды радиопульсаров должны быть ограничены сверху, так как при пересечении линии смерти [29] они должны переходить из состояния радиопульсар в состояние нейтронная звезда без радиоизлучения.

Таким образом, в выборке объектов, имеющих в радиодиапазоне сверхбольшие (от десятков секунд) периоды, могут перемешиваться пульсары и белые карлики. У части пульсаров периоды могут быть больше, чем у белых карликов. При этом природа источника периодического излучения (нейтронная звезда или белый карлик) ясна не для всех обнаруженных объектов. Нет ответа на вопрос о том, могут ли белые карлики иметь когерентное радиоизлучение, которое может быть обнаружено на современных радиотелескопах, и есть ли механизмы, которые могут обеспечить излучение пульсаров за линией смерти. Популяционный синтез, проведенный в работе [14] (см. рисунки и табл. 1 в этой статье) показывает возможное существование пульсаров с большими периодами, но их количество должно быть мало. С другой стороны, в этой же работе показано, что количество белых карликов может быть велико, но не вполне ясен возможный механизм, обеспечивающий их радиоизлучение. Отметим здесь попытки рассмотреть механизмы периодического радиоизлучения белых карликов в работах [30, 31].

Для обнаружения долгопериодических транзиентов (пульсаров или белых карликов) и получения статистики по количеству таких пульсаров можно использовать периодограммы. Так как поиск пульсаров с помощью периодограмм ресурсоемкий по вычислениям, возможностей современной вычислительной техники, по-видимому, не хватает для

переобработки всех доступных архивных данных с обзорами по поиску пульсаров.

Выделим две попытки FFA поиска пульсаров в архивных данных обзоров, проведенных на системе апертурного синтеза GMRT [32, 7] и на 64-метровом радиотелескопе в Парксе [33]. В работах [32, 7] сделан FFA поиск пульсаров с периодами до 100 с (обзор GHRSS) на частоте 327 МГц в площадке размером 2800 кв. град. В работе [33] были взяты данные Парковского обзора (обзор HTRU) и проведен FFA поиск пульсаров с периодами до 432 с на частоте 1.35 ГГц в площадке размером 1 кв. град (направление на центр Галактики). Конечно, площадка в 1 кв. град мала. Однако, как отмечают авторы [33], в этом направлении может наблюдаться около 1000 канонических пульсаров, поэтому небольшая площадь обзора компенсируется большой ожидаемой плотностью пульсаров. Большое рассеяние, ожидаемое в направлении центра Галактики, при поиске долгопериодических транзиентов, по-видимому, не так опасно, как для канонических пульсаров. Это связано с тем, что долгопериодические транзиенты имеют широкие импульсы, а само рассеяние на частоте 1.35 ГГц мало по сравнению с рассеянием на низких частотах. То есть потери чувствительности для долгопериодических транзиентов, имеющих широкие средние профили, не так критичны, как для обычных пульсаров с периодами секунда или меньше.

Теоретическая чувствительность  $S_{\min}$  в обзоре на GMRT была равна 0.5 мЯн для  $S/N = 5$  [34]. В Парковском обзоре, с учетом направления на центр Галактики,  $S_{\min} = 0.1$  мЯн для  $S/N = 6$  [35].

Сравним эти чувствительности с чувствительностью обзора PUMPS, проводимого на БСА3. Для этого пересчитаем чувствительности на частоту 111 МГц, предполагая спектральный индекс  $\alpha = 1.8$  ( $S \sim \nu^{-\alpha}$ ) [36].

Получим  $S_{\min-HTRU} = 9$  мЯн,  $S_{\min-GHRSS} = 3.5$  мЯн,  $S_{\min-PUMPS} = 0.5-1.5$  мЯн. Последняя оценка дана для обзора PUMPS для высоких и низких галактических широт соответственно, при усреднении периодограмм на пятилетнем интервале, при попадании пульсаров точно в луч БСА3. При попадании пульсара между лучами БСА3 оценка чувствительности  $S_{\min}$  ухудшится до 1–3 мЯн.

Как отмечалось выше, периодограммы хорошо выделяют пульсары с узкими импульсами и с большими периодами. Если за большой период принять  $P > 2$  с (как в настоящей работе), оказывается, что в поисках GHRSS и HTRU с помощью периодограмм не найдено ни одного нового пульсара. В нашем поиске обнаружено всего 2 новых источника периодического излучения с  $P > 2$  с, и значения периодов

указывают, что это обычные пульсары. Достигнутая чувствительность в обзоре PUMPS сравнима или выше чувствительности ранних обзоров по поиску пульсаров. Поэтому отсутствие новых пульсаров на периодах больше 10 с показывает, что общее количество пульсаров, имеющих большие периоды, мало.

Складывается противоречивая картина. В обзоре PUMPS пульсары, имеющие периоды  $10 < P < 90$  с и располагающиеся на склонениях  $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ , не обнаружены. То есть их общее количество на небе мало. С другой стороны, вероятность случайного обнаружения в радиодиапазоне трех объектов со сверхбольшими периодами  $P \sim 1$  мин и  $P \sim 20$  мин [10, 12, 13] мала. Эти случайные обнаружения долгопериодических транзиентов, по нашему мнению, говорит о большом количестве подобных объектов, которые должны обнаруживаться при специально организованном поиске. Более того, долгопериодические транзиенты с периодами  $P \sim 20$  мин и пиковыми плотностями потоков импульсов больше 10 Ян обнаружены на частотах 80 и 150 МГц. Частота наблюдений на БСА3 равна 111 МГц, что посередине диапазона 80–150 МГц. Следовательно, при любом разумном спектральном индексе такие объекты должны быть видны на БСА3. Единственное, на наш взгляд, непротиворечивое объяснение заключается в том, что основная часть долгопериодических транзиентов с  $P > 10$  с имеет реальные периоды  $P > 90$  с, и поэтому в нашем поиске они не обнаружены. В этом случае наш поиск произошел в долине периодов ( $10 < P < 90$  с), где обычных пульсаров уже не осталось, а радиоизлучающая периодический сигнал популяция белых карликов еще не началась.

В заключение отметим основные результаты по поиску долгопериодических ( $P > 2$  с) пульсаров на радиотелескопе БСА3 в ежедневных наблюдениях на интервале 5 лет. Поиск проводился с помощью суммированных периодограмм на склонениях  $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ . Поиск с помощью периодограмм показал высокую эффективность. Обнаружено 9 из 14 (64% из попадающих в площадку) известных по каталогу ATNF пульсаров. Пять не обнаруженных пульсаров известны по наблюдениям в дециметровом диапазоне и в метровом диапазоне не подтверждались. Для этих пяти пульсаров был проведен дополнительный поиск в отдельных сессиях длительностью 3.5 минуты. Пульсары вновь не обнаружены. Возможно, что это слабые пульсары со вспышечной активностью, либо пульсары с завалом спектра в метровом диапазоне. В площадке находятся 8 известных RRAT, имеющих периоды  $P > 2$  с. Их регулярное излучение также не обнаружено. Найдены

новые пульсары J1845+41 и J1951+28. Пульсар J1951+28 оказался близким к Солнцу. Он также интересен своей низкой светимостью. Отсутствие новых пульсаров с периодами больше 10 с говорит о малом количестве таких пульсаров на небе.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-12-00236<sup>1</sup>.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим Л. Б. Потапову за помощь при оформлении статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, and R. A. Collins, *Nature* 217(5130), 709 (1968).
2. R. V. E. Lovelace and H. D. Craft, *Nature* 220(5170), 875 (1968).
3. D. H. Staelin, *IEEE Proceedings* 57, 724; *National Radio Astron. Observ., Green Bank, Ser. A., No. 111* (1969).
4. V. Morello, E. D. Barr, B. W. Stappers, E. F. Keane, and A. G. Lyne, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 497(4), 4654 (2020).
5. A. D. Cameron, E. D. Barr, D. J. Champion, M. Kramer, and W. W. Zhu, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 468(2), 1994 (2017).
6. E. Parent, V. M. Kaspi, S. M. Ransom, M. Krasteva, et al., 861(1), id. 44 (2018).
7. S. Singh, J. Roy, B. Bhattacharyya, U. Panda, B. W. Stappers, and M. A. McLaughlin, 944(1), id. 54 (2023).
8. S. A. Tyul'bashev, G. E. Tyul'basheva, M. A. Kitaeva, I. L. Ovchinnikov, V. V. Oreshko, and S. V. Logvinenko, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 528(2), 2220 (2024).
9. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astron. J.* 129(4), 1993 (2005).
10. M. Caleb, I. Heywood, K. Rajwade, M. Malenta, et al., *Nature Astronomy* 6, 828 (2022).
11. C. M. Tan, C. G. Bassa, S. Cooper, T. J. Dijkema, et al., 866(1), id. 54 (2018).
12. N. Hurley-Walker, X. Zhang, A. Bahramian, S. J. McSweeney, et al., *Nature* 601(7894), 526 (2022).
13. N. Hurley-Walker, N. Rea, S. J. McSweeney, B. W. Meyers, et al., *Nature* 619(7970), 487 (2023).
14. N. Rea, N. Hurley-Walker, C. Pardo-Araujo, M. Ronchi, et al., 961(2), id. 214 (2024).
15. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. V. Oreshko, and S. V. Logvinenko, *Astron. Rep.* 60(2), 220 (2016).
16. V. I. Shishov, I. V. Chashei, V. V. Oreshko, S. V. Logvinenko, et al., *Astron. Rep.* 60(12), 1067 (2016).
17. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, and G. E. Tyul'basheva, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 517(1), 1112 (2022).
18. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, and G. E. Tyul'basheva, *Astron. Rep.* 64(6), 526 (2020).
19. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, E. A. Brylyakova, V. S. Tyul'bashev, and G. E. Tyul'basheva, *Astron. Letters* 49(10), 533 (2023).
20. S. Sanidas, S. Cooper, C. G. Bassa, J. W. T. Hessels, et al., *Astron. and Astrophys.* 626, id. A104 (2019).
21. A. J. Turtle and J. E. Baldwin, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 124, 459 (1962).
22. A. V. Bilous, V. I. Kondratiev, M. Kramer, E. F. Keane, et al., *Astron. and Astrophys.* 591, id. A134 (2016).
23. V. M. Malofeev, O. I. Malov, and N. V. Shchegoleva, *Astron. Rep.* 44(7), 436 (2000).
24. J. M. Yao, R. N. Manchester, and N. Wang, 835(1), id. 29 (2017).
25. R. Lopes de Oliveira, A. Bruch, C. V. Rodrigues, A. S. Oliveira, and K. Mukai, *Astrophys. J. Letters* 898(2), id. L40 (2020).
26. I. Pelisoli, T. R. Marsh, V. S. Dhillon, E. Breedt, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 509, L31 (2022).
27. I. Pelisoli, T. R. Marsh, D. A. H. Buckley, I. Heywood, et al., *Nature Astron.* 7, 931 (2023).
28. A. A. Lutovinov, S. S. Tsygankov, I. A. Mereminskiy, S. V. Molkov, et al., *Astron. and Astrophys.* 661, id. A28 (2022).
29. K. Chen and M. Ruderman, 402, 264 (1993).
30. O. C. de Jager, *Astrophys. J. Suppl.* 90, 775 (1994).
31. N. R. Ikhsanov, *Astron. and Astrophys.* 338, 521 (1998).
32. S. Singh, J. Roy, U. Panda, B. Bhattacharyya, V. Morello, B. W. Stappers, P. S. Ray, and M. A. McLaughlin, 934(2), id. 138 (2022).
33. J. Wongpcheauxsorn, D. J. Champion, M. Bailes, V. Balakrishnan, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 527(2), 3208 (2024).
34. B. Bhattacharyya, S. Cooper, M. Malenta, J. Roy, et al., 817(2), id. 130 (2016).
35. M. J. Keith, A. Jameson, W. van Straten, M. Bailes, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 409(2), 619 (2010).
36. O. Maron, J. Kijak, M. Kramer, and R. Wielebinski, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 147, 195 (2000). *Astrophys.* 333, 956 (1998).
37. B. D. S. Budi and H. L. Malasan, Preprint SSRN № 4620956 (2023).

<sup>1</sup> <https://rscf.ru/project/22-12-00236/>

## SEARCH FOR PULSARS WITH PERIODS OF MORE THAN TWO SECONDS AT DECLINATIONS FROM $+21^\circ$ TO $+42^\circ$

S. A. Tyul'bashev<sup>1,\*</sup>, G. E. Tyul'basheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute, Astro-Space center, Pushchino radio astronomy observatory, Pushchino, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Mathematical Problems of Biology RAS (IMPB RAS), branch of Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia*

*\*E-mail: serg@prao.ru*

The search for long period transients with periods ( $P$ ) from 2 to 90 s was carried out in daily observations conducted in a area 6300 sq. deg.. The data was obtained on a Large Phased Array (LPA) at a frequency of 111 MHz. Periodograms calculated using the Fast Folding Algorithm (FFA) were used for the search. To increase the sensitivity, the periodograms obtained in different observation sessions were added. Of the 14 known pulsars that entered the study area, having periods  $P > 2$  c and dispersion measures ( $DM$ ) less than 200 pc/cm<sup>3</sup>, 9 were detected. Two new pulsars were found. The average profiles of pulsars are obtained and estimates of their flux density are given. The discovered pulsar J1951+28, with a period of  $P = 7.3342$  s and  $DM = 3.5$  pc/cm<sup>3</sup>, turned out to be one of the closest pulsars to the Sun. The absence of new long period transients (pulsars or white dwarf) with periods of tens of seconds with the achieved sensitivity of searching for 1 mJy outside the galactic plane indicates a low probability of the existence of pulsars of neutron stars with extremely long periods. Most likely, the recently found sources of periodic radiation with periods from a minute to tens of minutes are white dwarfs pulsars.

**Keywords:** pulsar search