СТАТИСТИКА ОБНАРУЖЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В ПЛОЩАДКЕ СО СКЛОНЕНИЯМИ ОТ +42° ДО +52° НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2022 г. В. А. Самодуров^{1, 2}, С. А. Тюльбашев^{2, *}, М. О. Торопов³, С. В. Логвиненко²

¹ Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия ² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пущинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича, ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, Россия ³ ООО ТЭК Информ, Москва, Россия

**E-mail: serg@prao.ru* Поступила в редакцию 12.12.2021 г. После доработки 27.12.2021 г. Принята к публикации 27.12.2021 г.

Проведен поиск импульсных сигналов в новой площадке, включенной в мониторинговую программу по поиску пульсаров и транзиентов. Обработка нескольких месяцев данных, записанных в шести частотных каналах с общей полосой 2.5 МГц, показала, что в среднем в каждом из 24 подключенных стационарных лучей наблюдается 4 импульса в час. Из этих импульсов 18.3% похожи на импульсы пульсаров. Они видны в одном или двух соседних лучах и имеют выраженный дисперсионный сдвиг, т.е. регистрируются сначала на высокой, а потом на низкой частоте, что говорит о возможном прохождении сигнала через межзвездную среду. Почти 68% таких детектированных импульсов принадлежит шести известным пульсарам, имеющим меры дисперсии от 9 до 141 пк/см³, а почти все оставшиеся импульсы являются либо помехами неизвестной природы, либо артефактами предложенной методики выделения импульсов. При дополнительном исследовании выделенного массива из 3650 явных пульсарных импульсов было обнаружено 13 импульсов, принадлежащих четырем врашающимся радиотранзиентам (RRAT). Их меры дисперсии находятся в диапазоне 17–51 пк/см³. Проведен поиск регулярного (периодического) излучения RRAT по спектрам мощности, суммированным за 121 день. Периодическое излучение не обнаружено, но для двух RRAT по измерениям промежутков времени между импульсами получены верхние оценки периодов. Верхние оценки интегральной плотности потока обнаруженных RRAT находятся в диапазоне 2-4 мЯн на частоте 111 МГш.

Ключевые слова: вращающиеся радиотранзиенты (RRAT), пульсары **DOI:** 10.31857/S0004629922040053

1. ВВЕДЕНИЕ

Изначально пульсары были открыты как источники импульсного диспергированного излучения [1]. Наблюдаемые импульсы располагались на одинаковых временны х интервалах (периодах) друг от друга. Импульсы можно было сложить и. если период известен с достаточной точностью, улучшить отношение сигнала к шуму (S/N). Очевидная логика говорит нам, что для обнаружения слабых пульсаров нужно складывать много периодов, т.е. при прочих равных условиях увеличивать общее время наблюдений. Помимо этого, изза дисперсии сигнала в межзвездной среде наблюдения нужно проводить во многих частотных каналах, а из-за короткой длительности импульса пульсара использовать время опроса одной точки от сотен микросекунд до миллисекунд. Выполнение этих условий приводило к накоплению больших объемов сырых данных, которые нужно было обрабатывать с использованием слабых, на тот момент, возможностей вычислительной техники.

Практически сразу же после открытия пульсаров было предложено проводить их поиск, используя быстрые алгоритмы, позволяющие обнаруживать периодические сигналы. Поиск в частотной области можно было проводить при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ), а поиск во временной области – при помощи периодограмм [2–4]. Очевидные шаги для убыстрения обработки наблюдений привели к тому, что на десятки лет способ поиска пульсаров по их отдельным импульсам был оставлен в стороне.

В ранней истории пульсарной астрономии исследование отдельных импульсов представляло мало интереса, так как форма отдельных импульсов и их интенсивность меняются в широких пределах. Более устойчивой структурой являются средние профили, в которых суммируются сотни и тысячи импульсов. Форма средних профилей отражает геометрические особенности строения магнитосферы пульсаров. Тем не менее исследование импульсов наиболее сильных пульсаров показало существование микроструктуры импульсов, дрейфа субимпульсов, гигантских импульсов, нуллингов и переключение мод (см. справочник по пульсарной астрономии [5] и ссылки в нем).

В 2003 г. появилась работа [6], в которой рассматривался оптимальный поиск импульсных сигналов с учетом их рассеяния и мерцаний на межзвездной среде. В 2006 г. были открыты вращающиеся радиотранзиенты (RRAT), т.е. пульсары, у которых между детектированными импульсами может проходить от десятков секунд до часов [7]. Между последовательными сильными импульсами периодическое излучение зачастую не обнаруживается. В 2007 г. были открыты быстрые радиовспышки (FRB), которые представляют собой импульсные сигналы, приходящие изза пределов Млечного Пути [8].

Открытие импульсных сигналов внеземной природы, которые нельзя обнаружить с помощью стандартного поиска периодического излучения, вернуло к жизни поиск диспергированных импульсных сигналов как дополнительный способ поиска при проведении обычного поиска пульсаров. Поиск этих диспергированных сигналов сопряжен с рядом сложностей. Во-первых, для поиска и исследования отдельных импульсов нужны радиотелескопы, имеющие высокую мгновенную чувствительность, позволяющую найти одиночный импульс на приемлемом отношении сигнала к шуму (S/N). Для сравнения рассмотрим поиск обычного пульсара, имеющего период $P_0 = 1$ с. Десятиминутной записи такого пульсара достаточно для увеличения S/N почти в 25 раз. То есть, пульсар от индивидуальных импульсов которого даже следа не видно в сырой записи, может без особых проблем исследоваться на радиотелескопе со средними характеристиками. Во-вторых, при поиске новых транзиентов мы a priori не знаем ни меру дисперсии импульса, ни ширину его профиля, что увеличивает количество переборов при поиске. При этом в сырых данных ширина шумовой дорожки может меняться из-за изменения температуры фона, меняя при этом среднеквадратичные отклонения шума. Это приводит к необходимости постоянного контроля шумов в локальных точках. В дополнение к этому на низких частотах (метровый диапазон длин волн) к уширению дорожки может привести и попадание мерцающего (компактного) источника на луч зрения одновременно с импульсным сигналом. Мерцания компактного радиоисточника на межпланетной плазме уширяют шумовую дорожку. Если в диаграмму направленности антенны одновременно попадают мерцающий источник и диспергированный импульс, условия наблюдений могут ухудшиться. Помимо этого, в записях регулярно обнаруживаются помехи, импульсы которых могут иметь признаки диспергирования. Поэтому трудно разработать систему поиска, которая однозначно будет отделять диспергированные импульсы внеземной природы от помех. Ситуация отделения реальных сигналов от помех при поиске классических пульсаров выглядит гораздо лучше. Повторяемость сигналов по звездному времени, одинаковость периодов, одинаковая мера дисперсии, схожесть средних профилей за разные дни, возможность накопления сигнала за разные дни однозначно свидетельствуют в пользу открытия нового пульсара.

В настоящей работе, в рамках организованного обзора PUMPS (Пущинский многолучевой поиск пульсаров [9–11]), исследованы виды сигналов короткой длительности, обнаруживаемые в сырых данных. Мы рассматриваем статистику обнаружений импульсных источников излучения в новой площадке, включенной в мониторинговую программу по поиску пульсаров и отождествление этих источников с помехами и реальными сигналами, имеющими внеземное происхождение.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились на меридианном телескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН). Центральная частота приема была 110.25 МГц, используемая полоса частот - 2.5 МГц. После капитальной реконструкции антенны появилась принципиальная возможность на базе одного антенного поля сделать четыре независимых радиотелескопа [9, 12]. В настоящей работе рассматривается радиотелескоп (БСАЗ), на котором проводятся мониторинговые наблюдения. Особенность антенны БСАЗ заключается в том, что у нее сделана фиксированная по направлениям система лучей. Всего реализовано 128 лучей, перекрывающих в плоскости меридиана склонения от -9° до $+55^{\circ}$. В период 2013-2014 гг. к регистраторам были подключены 96 лучей, перекрывающих склонения от -9° до $+42^{\circ}$. В конце 2020 г. был создан новый регистратор, к которому в тестовом режиме подключены еще 24 луча. В настоящее время на новом регистраторе проверяются отдельные подключенные лучи, частотные каналы, работа усилителей, количество помех, качество наблюдений в целом и так далее.

На выходе дипольных линий БСА ФИАН располагаются усилители первого этажа. На вход

этих усилителей можно подать сигнал известной температуры (калибровочный сигнал: калибровочная ступенька), отключая при этом сами линии диполей. Этот сигнал проходит все антенные тракты и все усилители, располагающиеся по дороге. Калибровочный сигнал записывается в форме OFF-ON-OFF (калибровочная ступенька), где режим OFF означает отсутствие калибровочного сигнала при отключении всех промежуточных усилителей и антенны (дипольных линий). В этом случае прописывается шум в антенных трактах (кабелях), соответствующий температуре окружающей среды. Режим ON – это включение калибровочного сигнала при отключенных дипольных линиях. Так как запись калибровочной ступеньки проходит во всех частотных каналах, можно выравнивать усиление в каждом частотном канале независимо (подробнее см. в работе [13]).

Режим работы нового регистратора такой же, как и у регистраторов, используемых для работы в 96 лучах [9]. В начале производится оцифровка полной полосы наблюдений. В регистраторе входной поток данных преобразуется в данные с низким (0.1 с; 6 частотных каналов) и высоким (12.5 мс; 32 частотных канала) частотно-временны́м разрешением, после чего данные в обоих форматах записываются на жесткие диски. Начало и конец записи каждого файла с сырыми данными совпадают с началом и концом очередного часа по UT.

Ранее данные с низким частотно-временны́м разрешением использовались в проекте "Космическая Погода" [12], а также при поиске пульсаров [9]. Для этих же целей будут использоваться и данные с нового регистратора. Так как запись данных в обоих форматах идет одновременно, то можно оценить качество наблюдений в целом, обрабатывая лишь данные с низким частотновременны́м разрешением. Объем этих данных примерно в 35 раз меньше, чем у данных с высоким частотно-временны́м разрешением. В настоящей работе мы рассматриваем качество данных в подключенных к новому регистратору 24 лучах, перекрывающих склонения от +42° до +52°.

Так как БСА является меридианным инструментом, исследуемый источник можно наблюдать лишь во время его прохождения через меридиан. Время прохождения составляет, примерно, 3.5 мин на склонении $\delta = 0^{\circ}$ по ширине луча диаграммы направленности на уровне половинной мощности. Форма диаграммы направленности подчиняется зависимости $[\sin(x)/x]^2$ и поэтому

подчиняется зависимости $[sin(x)/x]^{-1}$ и поэтому при оценке плотности потока необходимо делать поправки, учитывающие особенности антенной решетки.

Перед обработкой наблюдений усиление в частотных каналах выравнивается с помощью калибровочной ступеньки. Затем качество данных и помеховая обстановка оцениваются на десятисекундных временных отрезках стандартными статистическими методами. Для каждого временного отрезка оцениваются минимальные и максимальные значения интенсивности в условных единицах до и после удаления импульсных помех, медианное значение интенсивности на исследуемом отрезке, среднеквадратичные отклонения. Запоминаются дата и час наблюдений по московскому времени, а также начало исследуемого десятисекундного отрезка по звездному времени. Проводимое сравнение среднеквадратичных отклонений день ото дня и от одного отрезка к другому в течение дня позволяют контролировать уровень помех как в данный день, так и на любом выбранном интервале времени.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки качества наблюдений и для понимания природы импульсных помех был выбран полугодовой интервал 16.12.2020-24.08.2021. Часовые файлы данных калибровались с помощью калибровочной ступеньки и затем разделялись на 10-секундные отрезки для анализа. В каждом частотном канале проводился независимый S/N > 5поиск импульсных сигналов с $(S/N = A/\sigma_{\text{noise}})$, где A -это амплитуда сигнала после вычитания базовой линии (фонового сигнала), а σ_{noise} – среднеквадратичные отклонения на 10-секундном интервале. Если на исследуемом отрезке для найденного импульса *S*/*N* был больше 5 хотя бы в трех частотных каналах из шести, то данный отрезок исследовался отдельно. Похожая методика, но с другими интервалами (5 с), и с использованием механизмов баз данных уже применялась при работе с данными за 2012-2013 гг. [14]. В ходе ранней работы было зафиксировано 83 086 импульсов на склонениях от $+3^{\circ}$ до $+42^{\circ}$. В частности, в этой работе были впервые обнаружены два новых RRAT пульсара.

Для каждого найденного в частотном канале импульсного сигнала записывалось время, когда наблюдался его максимум. Если максимум импульса на более низкой частоте наблюдается позже, чем на более высокой частоте, это говорит о возможной дисперсии сигнала, вызванной межзвездной средой. Такие кандидаты проверялись дополнительно. Записывалась также информация об импульсах, имеющих противоположное ("антипульсарное") поведение, т.е. импульс на низкой частоте приходил раньше, чем на более высокой частоте. В паспорта запоминаемых импульсов для каждого из 10-секундных отрезков данных вносилась информация о номере луча,



Рис. 1. Гистограмма распределения импульсов: по вертикали – количество детектированных импульсов, по горизонтали – количество лучей, в которых детектирован импульс.

юлианской дате (MJD), времени (UT), звездном времени, наблюдаемом S/N в частотных каналах, ожидаемой мере дисперсии (DM), метке кандидата в пульсар или ожидаемой помехе, записывалась информация о том, в скольких лучах наблюдался импульс, списки номеров лучей с похожими импульсами. В частности, информация о том, в скольких лучах одновременно наблюдался импульс, позволяет выявлять помехи. Так как помехи не направленные, то они записываются во многих или даже во всех 24 исследуемых лучах.

На всем интервале наблюдений в 24 лучах было обнаружено 3.2 миллиона импульсных событий. Проверка показала, что после 15 апреля 2021 г. подавляющая часть событий наблюдалась в двух пространственных лучах, что говорит о технических проблемах. Причины понижения качества наблюдений выясняются. Мы связываем столь резкое увеличение количества событий с поставленными для испытаний новыми частотными фильтрами, которые плохо вырезают частотные помехи.

Для дальнейшего анализа были выбраны данные с 16.12.2020 по 15.04.2021, т.е. 121 день наблюдений. Учитывая остановки аппаратуры для плановой профилактики и аппаратные сбои, окончательный анализ проводился для 2739 часовых файлов или 114.125 сут.

На указанном интервале было детектировано 247881 импульсов. Типичное количество детектируемых импульсов 10–11 тысяч в каждом из

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 99 № 4 2022

24 лучей, т.е. в среднем около 4 событий в час на луч. При этом импульсы зачастую происходили в один и тот же момент времени (с точностью до долей секунды), на разных лучах диаграммы БСА. Такие импульсы мы объединяли в одно событие. В результате указанные импульсы (247 881) объединены нами в 26 011 событий. Для найденных диспергированных импульсов распределение одновременных событий по лучам представлено на рис. 1. Из гистограммы видно двугорбое распределение событий, где максимумы приходятся на события, видимые лишь в одном луче, и на события, наблюдаемые во всех 24 лучах. Левый горб должен содержать все события, связанные с детектированием реальных импульсов плюс, возможно, часть помех. Правый горб должен содержать все помеховые случаи (техногенные помехи) плюс, возможно, самые мощные импульсы пульсаров могут наблюдаться во многих лучах, появляясь в боковых лепестках БСА ФИАН (см., напр., [15]).

Всего на рис. 1 представлено 26 011 событий, т.е. 9.5 событий (одномоментных импульсов в разных лучах) в час. Из них 4750, т.е. около 18.3% событий похожи на импульсы пульсаров, поскольку были видны не более чем в 2 лучах и показали при этом заметный дисперсионный сдвиг. Объединяя одновременные наблюдения импульса в двух лучах как одно событие, получим 4750 уникальных событий. Все эти импульсы бы-



Рис. 2. На левой и правой частях рисунка представлены динамические спектры пульсаров J1115+5030 ($P_0 = 1.6564$ с; DM = 9.18 пк/см³) и J2113+4644 ($P_0 = 1.0146$ с; DM = 141.26 пк/см³). По горизонтали отражено время. Каждый динамический спектр – это 10 с одной и той же записи в 6 (вверху) и 32 (внизу) частотных каналах. Частотные каналы отражены по вертикали. Две параллельные линии из светлых квадратов на правом верхнем динамическом спектре хорошо визуализируют все шесть частотных каналов, где верхний пиксель на вертикальной оси динамического спектра соответствует центральной частоте канала 111.29 МГц, нижний пиксель соответствует частоте 109.21 МГц с шагом 415 кГц. В нижнем ряду рисунков верхний из 32 каналов соответствует центральной частоте канала 111.461 МГц, нижний 109.039 МГц с шагом 78 кГц.

ли выделены в отдельный текстовый файл для более детального анализа.

Готовый текстовый файл строк с описаниями импульсов анализировался программой. позволяющей проверять скопления импульсов по разным наборам признаков. При работе программы использовались следующие признаки: координата по прямому восхождению, координата по склонению, число зарегистрированных импульсов за все время наблюдений, средняя мера дисперсии в наборе импульсов с близкими координатами. Размер анализируемого временного интервала был две минуты по прямому восхождению для луча. То есть, луч делится на 30 (интервалов в час) $\times 24$ (часа), всего 720 отрезков. Для 24 лучей, соответственно, создается 17280 уникальных временных отрезков, внутри которых и скапливаются импульсы для их дальнейшего анализа.

Всего программа обработки выделила 470 временны́х отрезков из 17 280 возможных отрезков, в которых обнаруживался хотя бы один пульсарный (диспергированный) импульс. Каждый из отрезков проверялся по каталогу ATNF¹. Все сомнительные случаи были проверены визуально и отброшены из массива анализируемых импульсов. В частности, поскольку внутри автоматически анализируемых 10-секундных отрезков данных могло произойти более одного импульсного события (например, могли пройти два последовательных импульса пульсара), возникали артефакты обработки, когда на одной частоте время импульса бралось с одного такого события внутри 10 с, а на второй – с другого события. Такие случаи приводят к ложно обнаруживаемым событиям с аномально высокими либо, напротив, отрицательными дисперсионными задержками (до $DM = \pm 1900$ пк/см³). Все подобные случаи были удалены из выборки импульсов и не анализировались. В результате из 4750 пульсароподобных событий (не более чем в двух лучах БСА и имеющих дисперсионный сдвиг) было оставлено 3650 импульсов, визуально похожих на реальные пульсары, т.е. 76.8% от автоматически выделенных программой импульсов, отмеченных как кандидаты в импульсы пульсаров.

В первом столбце гистограммы (рис. 1) находится почти 8000 точек, связанных с импульсами, имеющими или не имеющими дисперсионных задержек. Примерно половина из них оказалась связана с импульсами известных пульсаров: B0011+47 (J0014+4746), B1112+50 (J1115+5030), J1955+5059, B2021+51 (J2022+5154), B2111+46 (J2113+4644), B2217+47 (J2219+4754). В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены динамические спектры пульсаров J1115+5030 и J2113+4644.

Очевидно, что в 6-канальных данных чувствительность ниже, чем в 32-канальных данных из-за дисперсионного размывания (сглаживания) сигнала внутри одного частотного канала и из-за того, что время опроса в записываемых данных больше, чем ширина импульса. Тем не менее, несмотря на это уменьшение чувствительности, у пульсара J1115+5030 на динамическом спектре видны без пропусков все импульсы. Отметим также, что в слепом поиске обнаружены импульсы пульсара J2113+4644. Большая мера дисперсии и, вследствие этого, сильное дисперсионное сглаживание импульса в частотном канале, а также рассеяние в межзвездной среде должны сильно

¹ https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/ [16].

339

 Таблица 1. Статистика обнаружений импульсов известных пульсаров

 Имя
 DM.

Имя пульсара	<i>P</i> ₀ , c	<i>DM</i> , пк/см ³	<i>N</i> ₁ , имп.	N_2 , дней
J0014+4746	1.2406	30.4	30	21
J1115+5030	1.6564	9.18	1245	108
J1955+5059	0.5189	31.9	6	6
J2022+5154	0.5291	22.5	102	58
J2113+4644	1.0146	141.2	63	44
J2219+4754	0.5384	43.4	2191	107

Примечание. Пульсары J2113+4644, J2219+4754 наблюдаются также и в боковых лепестках диаграммы направленности БСА ФИАН.

уменьшить наблюдаемую пиковую плотность потока. Тем не менее два последовательных импульса J2113+4644 отчетливо видны на рис. 2. В табл. 1 отражена статистика обнаружения импульсов пульсаров за 121 обработанный день, либо за 114.125 сут с учетом профилактики и сбоев наблюдений. В первом столбце дано имя пульсара, в столбцах 2 и 3 приведены P_0 и DM из ATNF, в столбцах 4 и 5 – общее количество зарегистрированных импульсов (N_1) и за сколько дней они были детектированы (N_2).

Помимо известных пульсаров в записях были обнаружены импульсы, принадлежащие 4 вращающимся радиотранзиентам (RRAT). Для этих транзиентов изначально в 6-канальных данных было обнаружено от 1 до 5 импульсов. Напомним, что в первоначальном поиске источники отбирались, если импульс обнаруживался как минимум в половине (в случае 6-канальных данных трех) частотных каналах с S/N > 5. Каталог ATNF позволяет извлечь медианное значение ширины импульса секундных пульсаров, попадающее, примерно на 30-40 мс. Следовательно, для типичного секундного пульсара потеря чувствительности в 6-канальных данных из-за слишком большого времени опроса одной точки будет равна $(100/35)^{1/2} = 1.7$ раза. Если самый слабый импульс наблюдался на S/N = 5 во всех шести каналах. то при обработке 32-канальных данных самые слабые импульсы будут иметь $S/N = 5 \times 6^{0.5} \times$

 $\times 1.7 \approx 21$. Это означает, что в 32-канальных данных, перебирая меры дисперсии вблизи ожидаемой, можно попытаться найти новые импульсы, которые были пропущены в 6-канальных данных.

Мы обработали 32-канальные данные за те дни, когда регистрировались импульсы новых RRAT для того, чтобы попытаться обнаружить возможные слабые импульсы, потерянные при обработке 6-канальных данных и, по возможности, получить верхние оценки периодов RRAT. После переобработки дней, в которых ранее обнаруживались импульсы новых RRAT, количество детектированных импульсов увеличилось. Появилась возможность сделать верхнюю оценку периода для RRAT, у которых за данный сеанс наблюдается несколько импульсов. Оценка периода может быть получена как наибольший общий делитель для всех временных интервалов между индивидуальными импульсами. Настоящий период может быть в целое число раз меньше. С использованием 32-частотных данных по сильным импульсам была сделана переоценка DM исследуемых RRAT. Для этого перебирались сдвиги в частотных каналах с шагом единица по DM и в этом переборе считалось. что абсолютный максимум в импульсе, сложенном по всем частотным каналам, соответствует корректной DM.

В табл. 2 приведена информация по найденным RRAT. В первом столбце приведено имя транзиента. Во втором – его прямое восхождение. Прямое восхождение определялось как среднее прямых восхождений всех импульсов. Так как общее количество найденных импульсов невелико, ошибку определяем как ±1.5^m, т.е. по половине мощности диаграммы направленности БСА. В третьем столбце даны склонения. Найденные импульсы видны в одном луче и не видны в лучах выше и ниже, поэтому координата по склонению определялась как склонение луча, а точность как половина расстояния по склонению между лучами ($\pm 15'$). В четвертом столбце приведена галактическая широта. В столбцах 5-8 даны оценки периода, мера дисперсии, полуширина профиля самого узкого и, в скобках, самого широкого детектированного импульса, пиковые плотности потока сильнейшего (S_{peak1}) и слабейшего (S_{peak2}) из найденных импульсов. Пиковая плотность по-

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	b	<i>P</i> ₀ , c	<i>DM</i> , пк/см ³	<i>W</i> _{0.5} , мс	<i>S</i> _{peak1,2} , Ян	N_{1}/N_{2}	п, 1/час
J0939+45	$09^{h}39^{m}31^{s}$	45°15′	48°00'	_	17.5 ± 1	23.5 (49.5)	16.4, 4.9	5(6)/5	1
J1218+47	12 18 56	47 14	68 54	_	19.4 ± 1	21.0 (30.4)	31.3, 9.9	4(4)/4	0.67
J1929+42	19 29 11	42 40	11 38	3.6375	51.25 ± 2	36.9 (52.5)	11.9, 8.3	3(5)/3	0.83
J2214+45	22 14 01	45 25	-9 06	2.725	19.15 ± 1	18.0 (20.8)	12.7, 4.3	1(3)/1	0.5

Таблица 2. Характеристики найденных RRAT



Рис. 3. Профили сильнейших импульсов обнаруженных транзиентов. Отметим, что у RRAT J0939+45 наблюдаются как одиночные, так и двойные профили импульсов. По горизонтали приведен временной масштаб, по вертикали плотность потока в условных единицах (у.е.).

тока импульса оценивалась исходя из наблюдаемого S/N импульса и ожидаемой чувствительности БСА ФИАН в направлении транзиента. 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 несовпадение координаты луча БСА и координаты транзиента по склонению. Вследствие этого оценка пиковой плотности потока может быть занижена в 1.5-2 раза. В девятом столбце указано, сколько импульсов обнаружено (N_1) по данным с низким и (в скобках) с высоким частотно-временным разрешением. Через знак "/" дана информация, в скольких днях детектированы импульсы (N_2). В десятом столбце приведена частота появления импульсов (n), имеющих S/N > 10в 32-канальных данных за час наблюдений. При получении оценки *п* предполагалось, что вероятнее всего импульсы появляются в центральной части диаграммы направленности БСАЗ, которая по половинной мощности примерно равна 3 мин. За 120 дней накопилось $(120 \times 3)/60 = 6$ ч наблюдений в направлении каждого транзиента.

При отождествлении найденных RRAT в каталоге ATNF оказалось, что обнаруженный нами источник J1929+42 вероятно совпадает с источником, открытым по отдельным импульсам на радиотелескопе CHIME [17]. В этой работе говорится об обнаружении 63 импульсов, но на пульсарной установке открыто только 4 из них и оценку периода авторам работы получить не удалось. У найденного в CHIME вращающегося радиотранзиента $\alpha_{2000} = 19^{h}31^{m} \pm 7^{m}$, $\delta_{2000} = 42^{\circ}30' \pm 5'$, $DM = 50.9 \text{ пк/см}^{3}$, $W_{0.5} = 32 \text{ мс}$, пиковая плотность потока наблюдалась у четырех импульсов на 600 МГц в промежутке от 25 до 150 мЯн. В среднем регистрировалось 8 импульсов в час. Спектральный индекс $\alpha = 2-2.5(S \sim v^{\alpha})$ согласуется с оценками плотностей потока на 111 и

600 МГц. Таким образом, наши данные из табл. 2 по источнику J1929+42 для координат, полуширины импульса и плотности потока для БСА и данные для CHIME указывают на однозначное отождествление источников.

Помимо спорадического импульсного излучения у многих RRAT, открытых по отдельным импульсам на высоких частотах, в метровом диапазоне обнаруживается и регулярное (периодическое) излучение (см., напр., [18]). Мы попытались найти периодическое излучение для открытых RRAT. используя спектры мошности и их последующее суммирование за все дни наблюдений. Данный способ позволяет поднять чувствительность примерно в корень из количества сложенных спектров мощности [19, 20]. Ожидаемое увеличение чувствительности при поиске регулярного излучения было, примерно, 10 раз. Гармоник с S/N > 5, указывающих на периодический сигнал, в спектрах мощности не обнаружено. Предполагая наихудший случай расположения пульсара между лучами БСА и учитывая чувствительность наблюдений в плоскости и вне плоскости Галактики [9], мы исключаем регулярное (пульсарное) излучение исследованных RRAT на уровне: J0941+45 ($S_{int} < 2$ мЯн), J1218+47 ($S_{int} < 2 \text{ M}\text{H}$), J1929+42 ($S_{int} < 4 \text{ M}\text{H}$), J2214+45 (S_{int} < 4 мЯн). Образцы профилей импульсов указанных RRAT приведены на рис. 3.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа контроля 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. Относительно небольшое количество регистрируемых импульсов, имеющих помеховую природу, на один час наблюдений показывает, что в целом качество наблюдений высокое. За 121-дневный период наблюдений в шестиканальных данных, с шириной канала 415 кГц и временем чтения одной точки 0.1 с, детектировано больше 4750 событий, имеющих признаки "пульсарности". Для каждого из этих событий импульс на высокой частоте приходит раньше, чем на низкой частоте, и регистрируется не более чем в двух соседних лучах. Среди указанных событий 3650, т.е. 76.8% оказались реальными пульсарными событиями. Оставшиеся пульсаро-подобные события оказались связанными либо с редкими сбоями данных, либо с артефактами предложенного алгоритма обработки данных.

В слепом поиске обнаружено 6 известных пульсаров, у которых наблюдается от 6 до 2191 импульса в данных с низким частотно-временным разрешением за 121 наблюдательный день. Помимо известных пульсаров обнаружено 4 RRAT. Один из обнаруженных RRAT совпадает, по-видимому, с ранее открытым на радиотелескопе CHIME источником.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В.В. Орешко за оперативное введение в строй новых лучей и антенную группу за обеспечение наблюдений, а также Л.Б. Потапову за помощь при оформлении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, and R. A. Collins, Nature 217, 709 (1968).
- 2. R. V. E. Lovelace and J. M. Sutton, Nature 222, 231 (1969).
- D. H. Staelin, Proc. of the IEEE (Natl. Radio Astron. Obs., Green Bank, Repr. Ser A, No. 111) 57, 724 (1969).
- 4. *W. R. Burns and B. G. Clark*, Astron. and Astrophys. 2, 280 (1969).

- 5. D. R. Lorimer and M. Kramer, Handbook of pulsar astronomy (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004).
- 6. J. M. Cordes and M. A. McLaughlin, Astrophys. J. 596, 1142 (2003).
- 7. M. A. McLaughlin, A. G. Lyne, D. R. Lorimer, M. Kramer, et al., Nature 439, 817. (2006).
- 8. D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, and F. Crawford, Science, **318**, 777 (2007).
- 9. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. V. Oreshko, and S. V. Logvinenko, Astron. Rep. 60, 220 (2016).
- S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, S. V. Logvinenko, et al., Astron. Rep. 62, 63 (2018).
- 11. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, and G. E. Tyul'basheva, in press (2022).
- 12. V. I. Shishov, I. V. Chashei, V. V. Oreshko, S. V. Logvinenko, et al., Astron. Rep. 60, 1067 (2016).
- 13. S. A. Tyul'bashev, P. Y. Golysheva, V. S. Tyul'bashev, and I. A. Subaev, Astron. Rep. 63, 920 (2019).
- 14. V. A. Samodurov, A. S. Pozanenko, A. E. Rodin, D. D. Churakov, et al., in Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, XVIII Intern. Conference, DAMDID/RCDL 2016, Ershovo, Moscow, Russia, October 11–14, 2016, Revised Selected Papers; edited by L. Kalinichenko, S. Kuznetsov, Y. Manolopoulos (Cham: Springer, 2017), p. 130.
- 15. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, S. V. Logvinenko, and G. E. Tyul'basheva, Astron. Rep. 65, 1246 (2021).
- 16. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, Astron. J. **129**, 1993 (2005).
- 17. D. C. Good, B. C. Andersen, P. Chawla, K. Crowter, et al., arXiv:2012.02320 [astro-ph.HE] (2020).
- 18. *B. Y. Losovsky and D. V. Dumsky*, Astron. Rep. **58**, 537 (2014).
- 19. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, A. I. Chernyshova, et al., Astron. Rep. 61, 848 (2017).
- S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, and G. E. Tyul'basheva, Astron. Rep. 64, 526 (2020).