

О ПРОБЛЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ БЫСТРЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ НА БСА ФИАН

© 2023 г. Е. А. Брылякова¹, *, С. А. Тюльбашев¹, **

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева, Астрокосмический центр,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Пушино, Россия

*E-mail: elinx@bk.ru

**E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 03.11.2022 г.

Принята к публикации 08.12.2022 г.

В работе представлена проверка ранее опубликованных быстрых радиовсплесков (FRB) из работы В.А. Федоровой и А.Е. Родина, найденных в мониторинговых данных радиотелескопа Большая Синфазная Антенна (БСА) при помощи алгоритма поиска, основанного на свертке данных с шаблоном рассеянного импульса. Для проверки использовались те же самые 6-канальные данные (ширина канала 415 кГц), в которых были обнаружены FRB, имеющие меры дисперсии 247, 570 и 1767 пк/см³. Дополнительная проверка опубликованных FRB проводилась также в 32-канальных данных (ширина канала 78 кГц). Нам не удалось подтвердить ни одного опубликованного FRB на заявленных в оригинальной работе отношениях сигнала к шуму. Основные ошибки вызваны неправильным определением базовой линии и неправильной оценкой среднеквадратичных отклонений шума.

Ключевые слова: быстрые радиовсплески, природа радиовспышек

DOI: 10.31857/S0004629923020044, EDN: CJOIYX

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2007 г. была опубликована работа, в которой говорилось об обнаружении диспергированного импульса в архивных данных, полученных в наблюдениях на 64-метровом радиотелескопе Паркса на частоте 1.4 ГГц. Это был первый найденный быстрый радиовсплеск (радиовспышка) (FRB – Fast Radio Burst) [1]. Он представлял собой короткий, длительностью меньше 5 мс, импульс, похожий на импульс обычного пульсара. Наблюдаемая мера дисперсии (DM) этого импульса была 375 пк/см³. Исходя из направления, в котором была определена вспышка, и наблюдаемой DM, можно было предположить ее внегалактическое происхождение. Расстояние до источника вспышки было оценено как 600 Мпк. Оценка расстояния и наблюдаемая плотность потока 30 Ян на частоте 1.4 ГГц показали, что светимость вспышки на порядки превышает светимость импульсов обычных пульсаров. Это значение оценки светимости говорит, что механизм излучения отличается от механизма излучения обычных импульсов пульсаров.

В каталоге FRB¹ [2] числится 118 источников, последний FRB был занесен в каталог в январе 2020 г. С учетом работы канадского радиотелескопа CHIME² [3], на текущий момент число детектированных FRB больше шестисот. Согласно каталогам FRB и CHIME, вспышки наблюдались на частотах от 0.1 до 1.4 ГГц, и на мерах дисперсии от 103.5 до 3038 пк/см³.

Существует множество разнообразных гипотез, пытающихся объяснить природу FRB: слияние пары нейтронных звезд (NS) [4], слияние пары белых карликов (WD) [5], слияние NS и черной дыры (BH) [6], слияние заряженных BH [7], коллапс NS в BH [8], наличие планеты, вращающейся вокруг радиопульсара [9], гигантские импульсы молодых пульсаров [10], гигантские всплески/вспышки магнетаров [11, 12], столкновение квантовых струн [13] и другие. Наблюдаемые свойства FRB и некоторые из гипотез об их происхождении можно посмотреть также в обзорах [14, 15]. Столь большое разнообразие гипотез

¹ <https://www.frbcat.org/>

² <https://www.chime-frb.ca/home>

о природе FRB указывает на то, что природа радиовсплесков не ясна, и имеющиеся наблюдения все еще не достаточны для выбора однозначной гипотезы о происхождении FRB.

Все обнаруженные на данный момент FRB можно разделить на две группы – повторяющиеся и неповторяющиеся. Считается, что природа неповторяющихся FRB связана с какими-то катаклизмическими событиями, тогда как повторяющиеся FRB могут быть, например, проявлением активности магнетаров.

Так как основная часть найденных FRB – это не повторяющиеся события, перед наблюдателями всегда возникает вопрос о достоверности “одноразового” обнаружения. Казалось бы, выбирая события, имеющие высокое отношение сигнала к шуму (СШ), можно избавиться от недостоверных обнаружений. Однако в работе [16] было показано, как обычная микроволновая печь может массово генерировать “новые FRB”, имеющие разные DM. Стараясь избежать подобных случаев, авторы оригинальных методик очень тщательно разрабатывают методику обработки наблюдений в приложении к наблюдениям на конкретных телескопах.

Согласно каталогу FRB медианное значение DM обнаруженных всплесков приходится на диапазон 500–600 пк/см³. На частотах выше одного гигагерца, где и были обнаружены первые вспышки, рассеяние (τ) импульса в межзвездной среде мало уширяет импульс по сравнению с низкими частотами. Уширение импульса из-за рассеяния приводит к уменьшению наблюдаемой пиковой плотности потока (уменьшению СШ). Так, на частотах 100–150 МГц рассеяние настолько велико, что обнаружения пульсаров, имеющих DM > 200 пк/см³, практически отсутствуют. Пульсары – это объекты с периодическим излучением и, в отличие от FRB, для них можно накапливать сигнал, увеличивая наблюдаемый СШ. Отсутствие обнаружений пульсаров с большими DM в метровом диапазоне длин волн, несмотря на накопление сигнала, говорит о более низких, по сравнению с высокочастотными наблюдениями, шансах найти в низкочастотных наблюдениях одиночные импульсы на больших DM. Несмотря на низкие шансы, попытки обнаружить FRB в метровом диапазоне делались. Например, в работе [17] направленный поиск проводился на частоте 145 МГц на радиотелескопе LOFAR. В работе [18] поиск шел на частоте 182 МГц на телескопе MWA. Результатом проведенных работ являлись верхние оценки на ожидаемое количество FRB на небе, но ни одного реального FRB так и не было обнаружено.

В 2019 г. была опубликована работа Федоровой и Родина [19], согласно которой на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физиче-

ского института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), являющимся основным инструментом Пушинской Радиоастрономической Обсерватории (ПРАО), на частоте 111 МГц были найдены 3 всплеска, имеющие меры дисперсии 247, 570, 1767 пк/см³. На семинаре ПРАО работа вызвала большое количество критических замечаний, касающихся обработки наблюдений и достоверности полученных результатов. В настоящей работе мы провели проверку обнаруженных источников, используя те же данные, что были использованы авторами, и повторяя предложенную методику поиска.

2. ПРОВЕРКА НАЙДЕННЫХ FRB

Поиск импульсного излучения проводился в данных, полученных на радиотелескопе БСА ФИАН. БСА ФИАН – радиотелескоп меридианного типа с заполненной апертурой, представляющий собой плоскую эквидистантную решетку из 16 384 волновых диполей. Размер диаграммы направленности составляет примерно $0.5^\circ \times 1^\circ$, время прохождения источника через меридиан $3.5 \text{ мин}/\cos \delta$ (δ – склонение) по половинной мощности. Центральная частота наблюдений 110.3 МГц, полоса приема 2.5 МГц. Ежедневный и круглосуточный мониторинг в 96 лучах телескопа начат в августе 2014 г., но частично (не по всем лучам и не по всем датам) мониторинг велся с 2012 г.

Данные синхронно записываются в двух режимах: шесть каналов при ширине канала 415 кГц и времени опроса одной точки $\Delta t = 100$ мс; 32 канала при ширине канала 78 кГц и времени опроса $\Delta t = 12.5$ мс. Для поиска FRB Федорова и Родина [19] использовали данные с низким частотно-временным разрешением.

Поиск новых FRB в работе [19] осуществлялся по следующей схеме:

– из исходного часового файла с данными вычиталась базовая линия (фон Галактики), представляющая собой исходные данные, которые согласно [19] сглаживались медианным фильтром. Медианный фильтр в работе не описан, и мы использовали обычное определение. Берется массив из файла с данными. Точки выстраиваются в порядке возрастания или убывания. Выходным значением после работы медианного фильтра является точка, находящаяся на среднем месте. Делается сдвиг в исходном массиве на длину, равную длине массива, в котором искомое медианное значение, и процедура повторяется. В результате мы имеем набор точек, которые можно соединить отрезками. Предполагается, что каждый отрезок описывает базовую линию на длине отрезка;

Таблица 1. Проверяемые события

Дата	Координаты (J2000)		DM, пк/см ³	СШ	S_{peak} , Ян	τ_s , с	τ_{s1} , с	Δt_{6ch} , с	Δt_{32ch} , с
	α	δ , °							
06.06.2017	05 ^h 34 ^m	+41.7	247 ± 4	8.3	0.54	0.275	0.63	0.62	0.11
18.10.2015	05 21	+33.1	570 ± 5	6.2	1.4	0.275	2.8	1.44	0.26
20.09.2016	05 34	+41.7	1767 ± 4	9.1	0.22	4.33	33.3	4.48	0.82

– для поиска брался двадцатиминутный интервал, координата центра которого по прямому восхождению была 5^h32^m (координата повторяющегося FRB 121102);

– перебирались DM с шагом 50 пак/см³ в диапазоне $0 \leq DM \leq 3000$ пак/см³ и после сложения частотных каналов с предполагаемой DM делалась свертка с шаблоном. Шаблон представляет собой модельный уширенный в полосе приемника импульс в соответствии с пробной DM = 360 пак/см³ и свернутый с экспоненциальной функцией (предположение тонкого экрана) с масштабом рассеяния $\tau_s = 1$ с, в предположении $\tau_s \sim DM^{2.2}$;

– при обнаружении кандидата в FRB проводилась свертка с импульсами, соответствующими разным DM, и считалось, что DM определена правильно, когда получаемое отношение СШ максимальное. Здесь и далее мы определяли СШ как отношение величины проверяемого максимума в массиве точек на ожидаемой мере дисперсии кандидата в FRB к среднеквадратичным отклонениям шума в этом массиве на DM = 0 пак/см³. Передаточная функция для учета рассеяния для шаблона считалась по формуле:

$$F(t) = \frac{1}{t_s} \int_0^t \exp\left(-\frac{t}{t_s}\right) \delta(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где t_s – уширение импульса из-за рассеяния согласно модели [20] для проверяемой DM.

Обрабатывались данные, взятые на интервале от июля 2012 г. и до мая 2018 г., для двух направлений на небе. Для каждого направления за 6 лет набралось 355 часов записи. Мы частично воспроизводим табл. 1 из статьи [19] с данными по найденным FRB. Из оригинальной таблицы удалены два столбца с ожидаемыми красными смещениями FRB и энергиями импульсов. В оставленных столбцах таблицы последовательно представлены: даты обнаружения FRB, координаты, их оценки DM и СШ, оценка пиковой плотности потока импульса (S_{peak}), оценка характерного времени рассеяния (τ_s) по наблюдениям Федоровой и Родина [19]. В соседнем столбце дана наша оценка ожидаемого рассеяния (τ_{s1}) для предполагаемых DM кандидатов в

FRB, вычисленных по эмпирической модели Кузьмина и др. [20]. В этой модели рассматривались пульсары с DM < 200 пак/см³ и было получено, что $\tau_s(DM) = 60 \times (DM/100)^{2.2 \pm 0.1}$. Федорова и Родина [19] предположили, что и на более высоких значениях DM наклон в зависимости величины рассеяния от DM не меняется. Заметим, что для пульсаров зависимость может быть и более крутой (см. работы [21, 22]), но для внегалактических источников формальное применение рассеяния из работы [20] может быть оправдано [23]. В столбцах 9 и 10 мы приводим внутриканальное уширение импульса, то есть его дисперсионное сглаживание, в частотных каналах для 6 (Δt_{6ch}) и 32 (Δt_{32ch}) канальных наблюдений, при значении DM, указанном в столбце 4, и определяемом по формуле:

$$\Delta t = 4.15 \times 10^6 \left(\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2} \right) DM, \quad (2)$$

где Δt – временная задержка сигнала вследствие прохождения через среду в миллисекундах, v_1 и v_2 – середины частотных каналов, выраженные в МГц.

Ниже рассмотрена обработка события 06.06.2017, в котором обнаружен кандидат в FRB, имеющий наименьшую меру дисперсии (DM = 247 пак/см³), и, следовательно, минимальные рассеяние на луче зрения и внутриканальное уширение импульса. Координаты найденных FRB у авторов оригинальной работы Федоровой и Родина [19] даны по прямому восхождению с точностью до одной временной минуты, поэтому ожидаемое расположение может быть ±1 мин от координаты события. Визуальный поиск проводился нами на всем отрезке данных, т.е. ±10 мин от координаты события. После компенсации усиления в частотных каналах по калибровочному сигналу (см. детали в работе [24]) был проведен сдвиг записи в отдельных каналах с учетом DM, затем выполнены сложение каналов и последующая кросс-корреляция с шаблоном τ_{s1} , значение которого приведено в табл. 1.

На рис. 1a–1в представлены этапы обработки. На рис. 1a показаны сырые данные, центр соответствует координате 5^h32^m. Согласно работе [19],

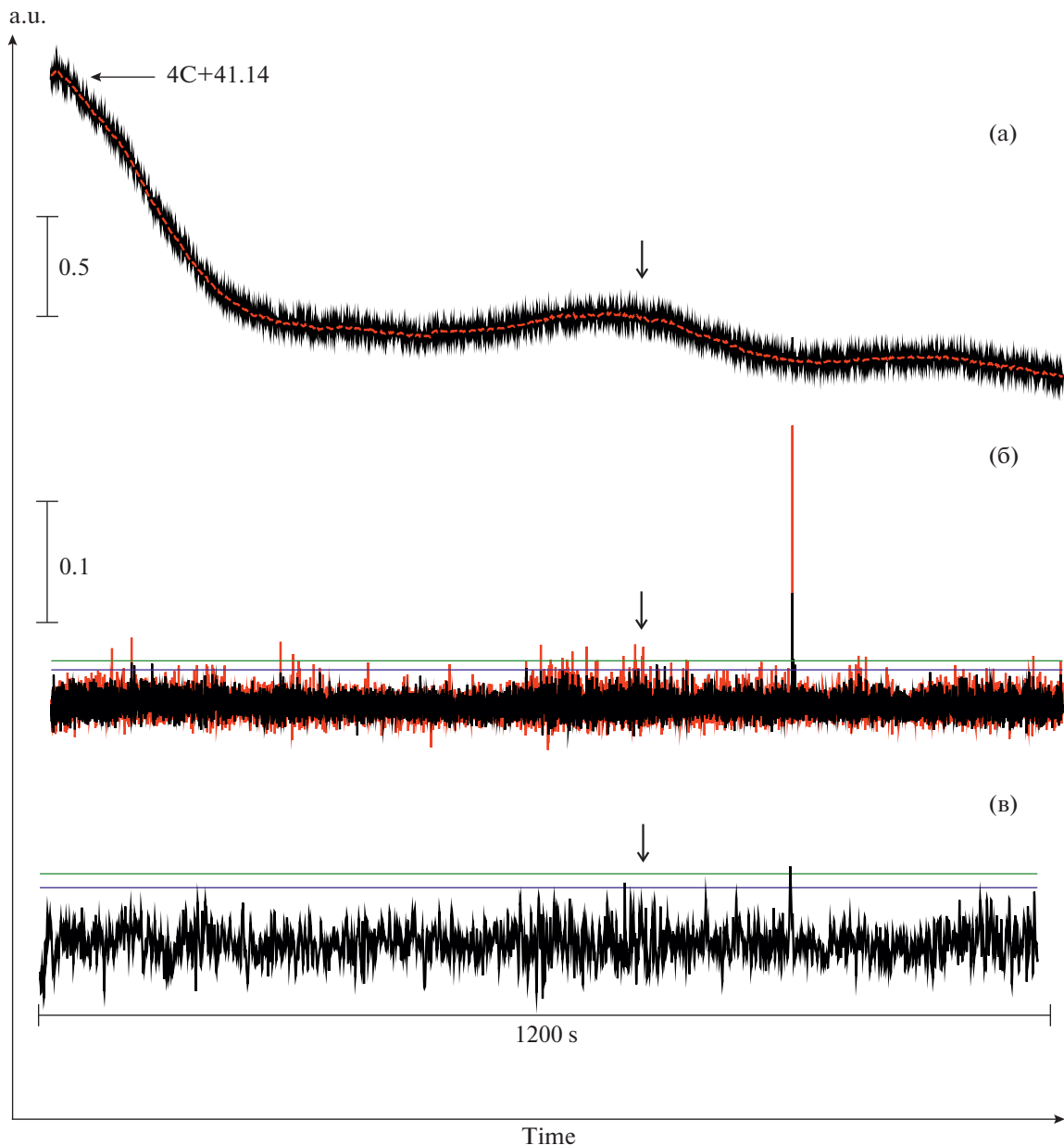


Рис. 1. На рис. (а) представлена двадцатиминутная запись сырых данных 06.06.2017 без компенсации DM (черный цвет). Красным цветом показан вычитаемый фоновый сигнал. В начале записи видна вершина источника 4C+41.14 с плотностью потока 16.1 Ян на частоте 102.5 МГц согласно каталогу <http://astro.prao.ru/db/>; (б) – данные после вычитания базовой линии до (красный цвет) и после (черный цвет) компенсации с $DM = 247$ пк/см³; (в) – данные после прохождения процедуры свертки с функцией рассеяния по Кузьмину и др. [20] в 6-канальных данных.

базовая линия представляет собой исходные данные, сглаженные медианой. Шаг медианы в оригинальной работе не приведен. При выборе шага медианы мы руководствовались теми соображениями, что если шаг медианы выбрать меньше, чем время рассеяния импульса, то импульс в обработанной записи можно сильно сгладить или вообще уничтожить. Если шаг медианы выбрать во много раз больше, чем время рассеяния, то по-

сле вычитания базовой линии в оставшейся записи могут остаться плохо вычтенные дискретные источники и детали фона Галактики. Так, согласно табл. 1, ожидаемое рассеяние FRB, имеющего $DM = 1767$ пк/см³, составляет почти полминуты, а размер диаграммы направленности БСА по половинной мощности равен ~ 3.5 мин. Выбор шага медианы в 3 мин (в шесть раз больше τ_{s1}) приведет к тому, что в записи будут видны дискретные ис-

точники. Очевидно, что шаг медианы нужно выбирать в зависимости от предполагаемой величины рассеяния. При поиске FRB *a priori* неизвестно рассеяние, величина которого зависит от DM. Поэтому нужно перебирать все возможные значения шага медианы, соответствующего разным рассеяниям. В настоящей работе проверяются кандидаты, у которых известна их DM и есть оценка величины рассеяния. Шагом медианы нами был выбран удвоенный размер оценки τ_{s1} по модели Кузьмина и др. [20]. Для проверяемого FRB с $DM = 247$ пк/см³ шаг медианы был выбран 1.2 с (12 точек). На всех рисунках по горизонтальной оси отложено время, а по вертикальной оси — плотность потока в условных единицах. Синяя и зеленая линии на рисунках показывают уровни $4\sigma_n$ и $5\sigma_n$. Вертикальные отрезки показывают значения высот в условных единицах. Стрелка указывает на ожидаемое расположение источника из табл. 1.

На рис. 1б представлены данные рис. 1а после вычитания базовой линии до (красный цвет) и после (черный цвет) компенсации DM. Видны отдельные пиковые сигналы, максимумы которых выше до, а не после компенсации дисперсии. То есть эти пиковые сигналы — это обычные импульсные помехи, имеющие $DM = 0$ пк/см³. На рис. 1в показаны данные после проведения свертки. Видно, что часть импульсных сигналов после компенсации дисперсии и сложения частотных каналов имеют уровни выше $4\sigma_n$, но меньше, чем $5\sigma_n$ (синяя (нижняя) и зеленая (верхняя) линии на рисунке). Однако проверка показывает, что все эти сигналы связаны с импульсными помехами, высота которых на $DM = 0$ пк/см³ выше, чем их высота после сложения каналов с учетом $DM = 247$ пк/см³. Остальные видимые после свертки с рассеянным сигналом пиковые сигналы меньше $4\sigma_n$.

Мы также провели параллельную обработку с 32-канальными данными. Конечные рисунки после свертки для 6- и 32-канальных данных не совпадают. Если в записях есть реальные источники, чувствительность в данных с высоким частотно-временным разрешением почти всегда должна быть выше, чем в данных с низким частотно-временным разрешением. В данных с шириной канала 415 кГц (6-канальные данные) уширение внутри частотного канала из-за дисперсионного запаздывания для исследуемого случая, примерно в 5.4 раза больше, чем в 32-канальных данных (ширина канала 78 кГц), и, следовательно, СШ в 32-канальных данных может вырасти до $\sqrt{5.4} \approx 2.5$ раз. Другими словами, если исходный сигнал был узкий, а его рассеяние было меньше дисперсионного размытия в частотном канале, то чем уже канал, тем больше может быть выигрыш

в чувствительности для 32-канальных данных при прочих равных условиях. Если ширина рассеянного импульса была больше дисперсионного размытия в канале, то выигрыша в чувствительности не будет, но при одинаковом усреднении данных по времени профили импульсов должны повторить друг друга. Однако сравнение обработки 6- и 32-канальных данных показывает, что никакого увеличения СШ, и вообще какого-либо выраженного сигнала на уровнях $СШ > 4$, в записях не видно. Сигналы для 6- и 32-канальных данных не повторяют друг друга, и можно сказать, что в рассмотренном случае речь идет о чисто шумовом процессе.

При проверке события за 18.10.2015, где авторы обнаруживают сигнал, имеющий $DM = 570$ пк/см³, возникла проблема, связанная с используемыми Федоровой и Родиным [19] координатами события по прямому восхождению. В этой работе исследовалось 20 мин записи с центром в $5^h 32^m$, и поэтому крайние точки записи должны иметь координаты $5^h 22^m$ и $5^h 42^m$. При этом авторами указана координата найденного события $5^h 21^m$. Возможно, что это опечатка, возможно, что исследовалась область слегка больше, чем указанные в статье 20 мин. Мы проверяли как область $5^h 22^m - 5^h 42^m$, так и область вокруг $5^h 21^m$. На рис. 2а–2е приведено событие за 18.10.2015, где нам удалось обнаружить сигнал, максимально приближенный к сигналу, полученному у авторов.

Он находится на координатах близких к $5^h 21^m$. Вычитание базовой линии проводилось отрезками прямой линии, длина которых (5.6 с, 56 точек) определялась удвоенным значением ожидаемой длительности времени рассеяния (см. табл. 1).

Рисунки 2г–2е похожи по расположению максимумов и общей форме. В левой части показаны 6-канальные данные, в средней — 32-канальные данные, в правой — фрагмент оригинального рисунка с предполагаемым обнаружением FRB в работе [19]. Однако из рис. 2в (см. стрелку) также видно, что СШ этих пиков намного меньше, чем $4\sigma_n$, что говорит об отсутствии значимых сигналов.

Для события за 20.09.16 (рис. 3) с $DM = 1767$ пк/см³ импульс в канале из-за рассеяния должен расплываться до 33 с. Вычитание данных, сглаженных медианой с шагом 1 мин, приводит к появлению трендов в записи (рис. 3а). На рис. 3б показана запись после свертки с рассеянным сигналом. Нам не удалось найти сигнал, похожий на сигнал, приведенный в работе [19].

Таким образом, наши оценки дают $СШ < 4$ для всех событий из работы [19]. Мы полагаем, что это говорит об отсутствии реальных обнаружений.

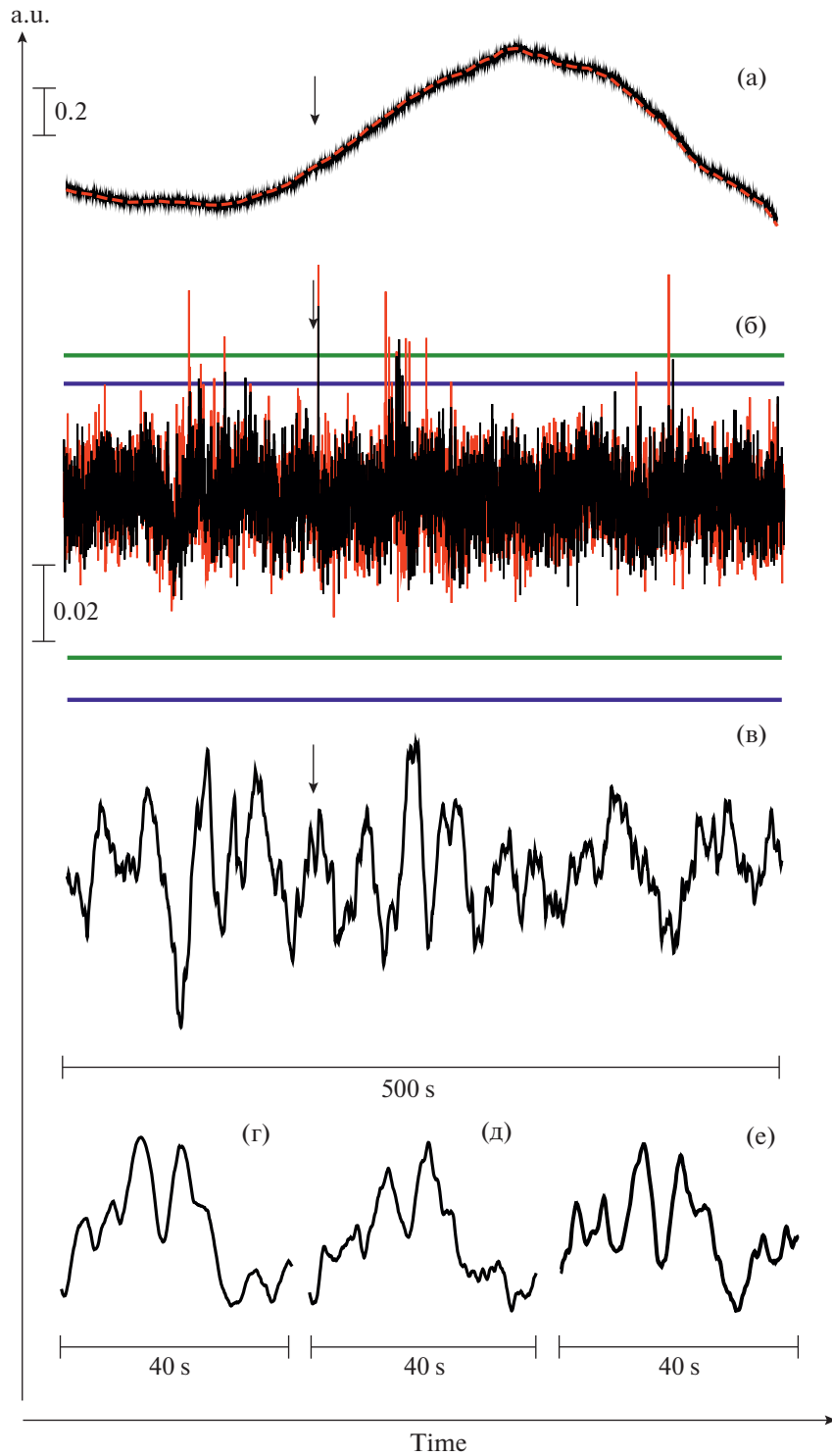


Рис. 2. На рис. (а) черным цветом показаны примерно 8 мин сырых данных 18.10.2015 с центром $05^{\text{h}}21^{\text{m}}$. Красным цветом показана вычитаемая базовая линия; (б) – сигнал после вычета базовой линии и компенсации $DM = 570 \text{ пк/см}^3$; (в) – сигнал после свертки с рассеянным импульсом и сложением всех частотных каналов. Стрелка указывает на обнаруженный сигнал, совпадающий с сигналом из работы [19]; (г) и (д) – сигналы после обработки 6- и 32-канальных данных, наиболее похожие на сигнал из работы [19], фрагмент которого показан на рис. (е).

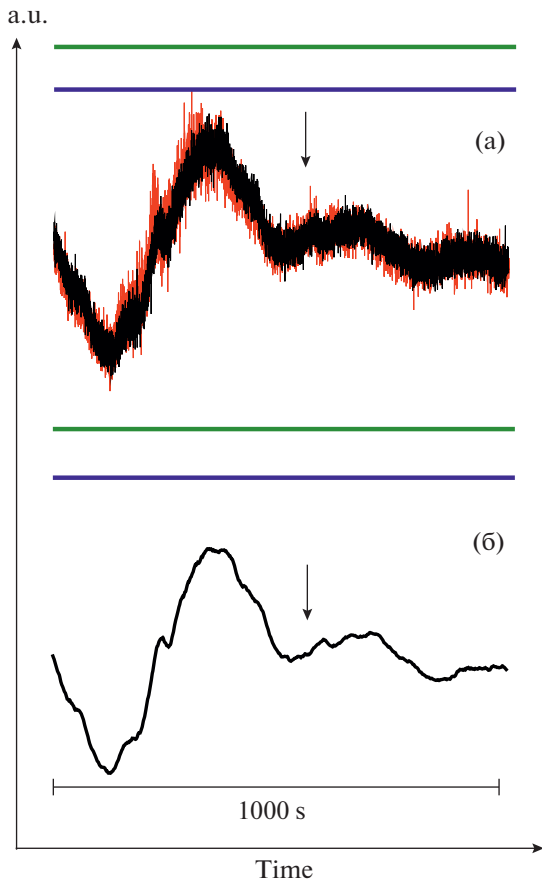


Рис. 3. На рис. (а) показаны результаты вычитания базовой линии до (красный цвет) и после (черный цвет) учета размазывания в полосе с $DM = 1767$ пк/см³ кандидата в FRB 20.09.2016; (б) – сигнал после свертки с рассеянным импульсом.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предыдущем параграфе мы рассмотрели главный, на наш взгляд, признак обнаружения нового FRB – это его СШ. Уровень СШ, на котором вероятность ложного обнаружения становится пренебрежимо малой, зависит от количества рассматриваемых случаев. В радиоастрономической практике принят критерий $S/N = 6-7$, когда вероятность ложного обнаружения становится пренебрежимо низкой. Важным условием при определении СШ является корректное вычитание среднего уровня (базовой линии). Было показано, что на координатах, соответствующих обнаруженному FRB, нет сигналов с уровнем $S/N > 4$, что противоречит заявленным значениям СШ от 6.1 до 9.2 [19]. Найденные нами уровни сигналов однозначно говорят о низкой достоверности обнаружения новых FRB.

Мы не рассматриваем в нашей статье все замечания, высказанные на семинарах ПРАО, но отмечаем некоторые из них.

– Линии дисперсионной задержки на рисунках гладкие, и создается ощущение большого количества использованных частотных каналов. С чем это связано?

– На приводимых свертках исходного сигнала с рассеянным профилем не указана базовая линия (средний уровень сигнала), что не позволяет визуально оценить значимость события. Например, для кандидата с $DM = 247$ пк/см³ (см. [19], рис. 8) перед максимумом, попадающим на отсчет 80, есть минимум того же масштаба, попадающий на отсчет 50. Возникает ощущение, что проведенная свертка шума с рассеянным модельным сигналом просто перераспределила энергию шумовой дорожки и дала минимум и максимум с одинаковой энергией.

– При поиске диспергированных импульсов для каждого исследуемого направления делается много переборов на разных DM , и при каждом переборе получаются случайные шумовые массивы. Эти переборы делались для наблюдений, идущих ежедневно на интервале 6 лет. Сколько переборов в ходе поиска было реально сделано, и какова вероятность статистически значимого обнаружения ложного (шумового) сигнала на разных СШ?

– Почему для всех кандидатов в FRB приведенные оценки рассеяния намного меньше ожидаемых из эмпирической связи величины рассеяния от DM по работе [20], которая и была взята авторами за основу при оценках рассеяния? Почему для найденных источников длительность (полуширина) импульсов не соответствует эмпирическим моделям рассеяния импульсов в межзвездной среде?

– Почему в данных с высоким частотно-временным разрешением (32-канала), которые записываются параллельно с данными с низким частотно-временным разрешением (6-каналов), СШ найденных источников меньше при одинаковом временном усреднении? Вопрос был вызван тем, что в 32-канальных данных внутриканальное дисперсионное сглаживание в 5 раз меньше, что должно приводить к большим значениям наблюдаемого СШ всплеска, по крайней мере, для источника с $DM = 247$ пк/см³.

– Кажется странным, что два события с $DM = 247$ и 1767 пк/см³ полностью совпали по координатам.

– Согласно работе [19] FRB 121102 ($DM = 570$ пк/см³) мог быть обнаружен в боковом лепестке БСА ФИАН. Максимум первого бокового лепестка составляет примерно 4% от энергии в главном лепестке. Следовательно, если бы этот импульс наблюдался в главном лепестке, его отношение сигнала к шуму было бы $S/N > 6.2 \times 25 > 150$. На 2021 г. для FRB 121102 за-

регистрировано больше 1600 импульсов [25]. Какова вероятность того, что в боковом лепестке, где наблюдается ничтожная часть от полной энергии импульса, был зарегистрирован импульс, и при этом в главном лепестке за 6 лет не обнаружено ни одного импульса? Альтернативное объяснение авторов говорит о возможном обнаружении какого-то другого FRB. В этом случае удивительно, что его DM с большой точностью совпадает с DM известного повторяющегося FRB.

Как выяснилось на семинарах, рисунки, называемые в работе [19] динамическими спектрами, не являются ими в общепринятом понимании. В качестве плотности потока в частотном канале выступает свертка исходных данных с шаблоном рассеяния. Для получения “красивой” картинки авторы использовали не описанные в статье цифровые фильтры, которые сгладили изображение, давая ложное ощущение большого количества наблюдаемых частотных каналов и непрерывности линии дисперсионной задержки. Вероятнее всего, это нелинейные фильтры. При получении очень похожего профиля в 6-канальных данных для импульса с $DM = 570$ пк/см³ нам так и не удалось получить похожей картинке динамического спектра.

Дадим ответ на один из вопросов, заданных на семинарах, а именно, на вопрос о вероятности ложного обнаружения сигнала. К счастью, в статье [19] достаточно данных для получения ответа. Предположим, что шумы распределены по нормальному закону. Количество переборов при поиске транзиента для каждого луча БСА ФИАН можно определить, как $355 \text{ ч} \times 3600$ (секунд в часе) $\times 10$ (отсчетов в секунду) $\times 60$ (перебираемых DM) = 766.8 млн. независимых и проверяемых событий, в которых авторы пытались найти диспергированные импульсы. Даже на уровне выше $4\sigma_n$ будет обнаружено 48 571 ложное событие, на уровне выше $5\sigma_n$ – 439 событий, на уровне выше $6\sigma_n$ – 1 событие. Мы дали оценки вероятности ложного обнаружения импульсного сигнала для идеального белого шума. С учетом помех, регистрируемых на БСА ФИАН как в частотной, так и во временной области, и имеющих в том числе и явно выраженные дисперсионные задержки сигналов [26, 27], полученные оценки количества ожидаемых ложных событий нужно воспринимать как нижние оценки. Согласно предыдущему параграфу, оценки $CШ < 4$ для всех проверяемых событий. Поэтому мы полагаем, что все три “найденных” события – это ложные обнаружения.

Одним из неприятных моментов, появившимся при попытке повтора методики [19] на данных БСА ФИАН, оказался выбор шага медианы, используемой для получения сглаженных данных и последующего вычитания базовой линии. В работе [19] ничего не сказано о шаге медианы для вы-

читания фона, а также и о методе определения отношения СШ. Выше мы написали, что использовалось удвоенное значение величины рассеяния на проверяемой мере дисперсии. Однако наблюдения [20–22] показывают, что рассеяние может быть на порядок больше, чем в модели [20]. В этом случае и шаг медианы должен измениться соответствующим образом. Если его не изменить (не увеличить), можно потерять импульс. Так, при проведении поиска FRB, имеющего $DM = 1767$ пк/см³, шаг медианы может быть до $33 \text{ с} \times 10 = 5.5$ мин. Шаг медианы в 5.5 мин почти равен времени прохождения источника через диаграмму направленности антенны. Поэтому при таком выбранном шаге медианы дискретные источники не будут вычтены и останутся в записи. Это означает, что при поиске FRB кандидатов в данных радиотелескопа БСА необходимо ограничиться такими мерами дисперсии, шаг медианы которых таков, что после вычитания базовой линии исчезают дискретные источники.

Для кандидата с $DM = 247$ пк/см³ мы повторили обработку с шагом медианы, составившим 12 с (120 точек), что в 20 раз больше ожидаемого времени рассеяния. FRB не обнаружен. Для кандидата с $DM = 570$ пк/см³ повторной обработки с шагом медианы, соответствующим большему ожидаемому времени рассеяния, не проводилось, т.к. полученная картинка (см. рис. 2) практически полностью совпала с картинкой из работы [19]. Для кандидата с $DM = 1767$ пк/см³ повторной обработки не производилось по причинам, указанным в предыдущем абзаце.

Критические замечания по достоверности обнаружения новых FRB, без рассмотрения методики обработки, были высказаны к двум статьям Федоровой и Родина в работе [28], где на низких частотах был обнаружен повторяющийся FRB 20180916B.

В 2021 г. была опубликована работа [29], где были изменены СШ рассмотренных нами случаев. В частности, для случая с $DM = 570$ пк/см³ вместо $CШ = 6.2$ новое значение $CШ = 5.9$. Однако, как показано выше, для этого случая $CШ < 4$. Попыток исправить методику поиска не предпринималось. Отношение СШ для почти половины из 60 “новых FRB” меньше 6, а у пяти кандидатов меньше 4. В некоторых из приведенных динамических спектров наблюдаются изломы. Конечно, среди 60 опубликованных случаев могут быть и реальные FRB. Нужно проводить полную ревизию всех кандидатов. Это выходит за рамки настоящей работы, которая посвящена лишь проверке методики поиска и трех первых обнаруженных кандидатов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При поиске диспергированных импульсов обычно доказательством обнаружения нового источника является оценка СШ = 6–7 и больше. СШ определяется как амплитуда пикового сигнала, деленная на среднеквадратичное отклонение шума. Среднеквадратичное отклонение шума при прочих равных условиях тем меньше, чем лучше вычтена базовая линия. Базовая линия представляет собой набор отрезков. Длина этих отрезков определяется величиной рассеяния импульса в межзвездной и межгалактической среде. Если мера дисперсии большая, то длина отрезков, используемых при вычитании фона, может быть сопоставима с длительностью прохождения дискретного источника через диаграмму направленности транзитного радиотелескопа БСА ФИАН. Таким образом, поиск FRB на больших DM на радиотелескопе БСА ФИАН автоматически ограничен. После обнаружения сигналов с СШ > 6–7 необходимо проверить источник по косвенным признакам. Он должен обнаруживаться в одном или двух лучах БСА. Динамический спектр должен показывать явно выраженную линию дисперсионной задержки.

При проверке кандидатов FRB, обнаруженных в работе [19], сигналов с СШ > 4 не найдено, что говорит о том, что все эти обнаружения ложные. Возможно, что авторы для оценки среднеквадратичных отклонений взяли короткий отрезок обработанной записи, на котором они видят что-то похожее на импульс, и посчитали среднеквадратичные отклонения на небольшом куске записи вне импульса. Обработанная запись с большим количеством значащих точек показывает, что среднеквадратичные отклонения шумов значительно больше, а определяемое значение СШ значительно меньше.

К сожалению, методика Федоровой и Родина [19] в части выбора шага для медианного фильтра и выбора точек для оценки среднеквадратичных отклонений написана настолько неоднозначно, что нам пришлось руководствоваться здравым смыслом при попытке повторить методику обработки. Нам удалось “обнаружить” лишь один из трех “FRB”, представленных в работе. Судя по шумовой дорожке на рис. 2в и величине СШ = 1, равному расстоянию между линиями, проведенным на СШ = 4 и 5, для этого “FRB” СШ < 2.

В настоящей работе остался неосвещенным вопрос о принципиальной возможности или невозможности обнаружений FRB на БСА ФИАН. Приведем некоторые соображения, говорящие в пользу возможных обнаружений FRB. Главным фактором, мешающим обнаружению FRB, является рассеяние импульсов на межзвездной среде. Известно, что рассеяние для любой выбранной DM по наблюдениям в метровом диапазоне длин

волн может изменяться больше, чем на порядок величины, как в большую, так и в меньшую сторону от среднего значения [20]. Средние значения, извлекаемые из рис. 2 этой работы, показывают, что рассеяние $\tau_s = 10, 30, 200$ мс на мерах дисперсии $DM = 50, 100, 200$ пк/см³, но может быть меньше, чем 1, 10, 100 мс на тех же мерах дисперсии. Согласно каталогу FRB [2], после исключения “пушинских” FRB, ширины найденных импульсов находятся в пределах от 0.08 до 34 мс, а медианное значение приходится на 1.9 мс. Напомним, что время опроса в мониторинговом обзоре, проводимом на БСА ФИАН, равно 12.5 мс. В этом же каталоге у 11 FRB (примерно 10% от списка всех источников FRB каталога) наблюдаемая $DM < 200$ пк/см³, а минимальная – 103.5 пк/см³. На радиотелескопе CHIME найдена FRB, имеющая $DM = 81.82$ пк/см³ [30], не включенная пока в каталог FRB. Таким образом, уже найдены FRB, ширины импульсов и меры дисперсии которых говорят о возможности их обнаружения в наблюдениях на БСА ФИАН, если, конечно, хватит чувствительности инструмента.

В работе по поиску вращающихся транзиентов, проведенной в ПРАО [31], табл. 1, приведена чувствительность БСА при поиске одиночных импульсов в сравнении с чувствительностью других крупных инструментов, на которых FRB уже обнаружены. Пересчет пороговой чувствительности на частоту 111 МГц делался в предположении спектрального индекса $\alpha = -1.5$ ($S \sim \nu^\alpha$). Согласно этой таблице, пороговые чувствительности при поиске импульсных сигналов, имеющих СШ = 7 для телескопов с диаметром зеркала 64, 100, 300 м (Паркс, Эффельсберг, Аресибо), и антенны БСА равны соответственно 4, 0.55, 0.5 и 2.1 Ян. Чувствительность 2.1 Ян при поиске импульсного излучения на БСА подтверждена практическими обнаружениями новых RRAT и импульсов известных пульсаров [31]. Самые слабые обнаруженные импульсы имеют плотность потока примерно 2 Ян. Импульсы обнаружены у 115 известных пульсаров и 46 новых RRAT³. Таким образом, подтвержденная чувствительность БСА при поиске FRB находится на уровне, сопоставимом с уровнями чувствительности одних из лучших в мире радиотелескопов. Наконец, обнаружение повторяющегося FRB 20180916В в диапазоне частот 110–190 МГц на радиотелескопе LOFAR [32] еще раз указывает, что обнаружения FRB, имеющих $DM < 200$ –300 пк/см³ на БСА ФИАН – это вопрос времени и грамотной обработки наблюдений.

³ <https://bsa-analytics.prao.ru/transients/rrat/>

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено за счет гранта Российского Научного Фонда (РНФ) № 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою признательность сотрудникам обсерватории В.М. Малофееву, Т.В. Смирновой, В.А. Потапову за предварительное чтение работы и ряд замечаний, позволивших улучшить текст, а также Л.Б. Потаповой за помощь в оформлении рисунков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, and F. Crawford*, *Science* **318**, 777 (2007).
2. *E. Petroff, E. D. Barr, A. Jameson, E. F. Keane, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Australia* **33**, id. e045 (2016).
3. *M. Amiri, B. C. Andersen, K. Bandura, S. Berger, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **257**, id. 59 (2021).
4. *J. Abadie, B. P. Abbott, R. Abbott, M. Abernathy, et al.*, *Classical and Quantum Gravity* **27** (17), id. 173001 (2010).
5. *K. Kashiyama, K. Ioka, and P. Mészáros*, *Astrophys. J. Suppl.* **776** (2), id. L39 (2013).
6. *C. M. F. Mingarelli, J. Levin, and T. J. W. Lazio*, *Astrophys. J. Letters* **814**, id. L20 (2015).
7. *B. Zhang*, *Astrophys. J. Letters* **827**, id. L31 (2016).
8. *H. Falcke and L. Rezzolla*, *Astron. and Astrophys.* **562**, id. A137 (2014).
9. *F. Mottez and P. Zarka*, *Astron. and Astrophys.* **569**, id. A86 (2014).
10. *L. Connor, J. Sievers, and U.-L. Pen*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **458**, L19 (2016).
11. *S. B. Popov*, in *Evolution of Cosmic Objects through their Physical Activity*, Proc. of the Conference dedicated to Viktor Ambartsumian's 100th anniversary, held 15–18 September 2008 in Yerevan and Byurakan, Armenia, edited by H.A. Harutyunian, A.M. Mickaelian, and Y. Terzian (Yerevan: "Gitutyun" Publ. House of NAS RA), p. 105 (2010).
12. *S. R. Kulkarni, E. O. Ofek, J. D. Neill, Z. Zheng, and M. Juric*, **797** (1), id. 70 (2014).
13. *L. V. Zadorozhna*, *Adv. Astronomy and Space Phys.* **5** (1), 43 (2015).
14. *S. B. Popov, K. A. Postnov, and M. S. Pshirkov*, *Physics Uspekhi* **61** (10), 965 (2018).
15. *J. M. Cordes and S. Chatterjee*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **57**, 417 (2019).
16. *E. Petroff, E. F. Keane, E. D. Barr, J. E. Reynolds, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **451**, 3933 (2015).
17. *A. Karastergiou, J. Chennamangalam, W. Armour, C. Williams, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **452**, 1254 (2015).
18. *A. Rowlinson, M. E. Bell, T. Murphy, C. M. Trott, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **458**, 3506 (2016).
19. *V. A. Fedorova and A. E. Rodin*, *Astron. Rep.* **63**, 39 (2019).
20. *A. D. Kuz'min, B. Y. Losovskii, and K. A. Lapaev*, *Astron. Rep.* **51**, 615 (2007).
21. *N. D. R. Bhat, J. M. Cordes, F. Camilo, D. J. Nice, and D. R. Lorimer*, **605**, 759 (2004).
22. *A. V. Pynzar' and V. I. Shishov*, *Astron. Rep.* **52**, 623 (2008).
23. *M. Amiri, K. Bandura, M. Bhardwaj, P. Boubel, et al.*, *Nature* **566**, 230 (2019).
24. *S. A. Tyul'bashev, P. Yu. Golyseva, V. S. Tyul'bashev, and I. A. Subaev*, *Astron. Rep.* **63**, 920 (2019).
25. *D. Li, P. Wang, W. W. Zhu, B. Zhang, et al.*, *Nature* **598**, 267 (2021).
26. *V. A. Samodurov, S. A. Tyul'bashev, M. O. Toropov, and S. V. Logvinenko*, *Astron. Rep.* **66**, 341 (2022).
27. *S. A. Tyul'bashev, D. V. Pervukhin, M. A. Kitaeva, G. E. Tyul'basheva, E. A. Brylyakova, and A. V. Chernosov*, arXiv:2204.02025 [astro-ph.HE] (2022).
28. *Z. Pleunis, D. Michilli, C. G. Bassa, J. W. T. Hessels, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **911** (1), id. L3 (2021).
29. *V. A. Fedorova and A. E. Rodin*, *Astron. Rep.* **65**, 776 (2021).
30. *M. Bhardwaj, B. M. Gaensler, V. M. Kaspi, T. L. Landecker, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **910**, id. L18 (2021).
31. *S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, and V. M. Malofeev*, *Astron. and Astrophys.* **618**, id. A70 (2018).
32. *I. Pastor-Marazuela, L. Connor, J. van Leeuwen, Y. Maan, et al.*, *Nature* **596**, 505 (2021).