

## ОБНАРУЖЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ МАГНЕТАРА SGR 1935+2154

© 2022 г. А. Е. Родин<sup>1, \*</sup>, В. А. Федорова<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,  
Пушино, Россия

\*E-mail: rodin@prao.ru

\*\*E-mail: fedorova-astrofis@mail.ru

Поступила в редакцию 13.05.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

В работе представлены результаты наблюдений магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц на радиотелескопе БСА ФИАН. Для поиска единичных непериодических импульсов использовались данные, записанные в режиме шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с и в полосе приема  $110.25 \pm 1.25$  МГц. В результате анализа данных в период с 1 сентября 2019 г. по 1 марта 2021 г. был обнаружен импульс с мерой дисперсии  $DM = 320 \pm 10$  пк/см<sup>3</sup>, величиной рассеяния  $\tau \sim 340$  мс и флюэнсом  $f \sim 300$  Ян мс. Для поиска периодических импульсов использовались данные, записанные в режиме 32 каналов в полосе приема 109–111.5 МГц в январе–феврале и октябре–декабре 2020 г. В результате в двух сеансах было найдено периодическое излучение с периодом 3.247 с, амплитудой 40 мЯн и мерой дисперсии  $DM = 320$  пк/см<sup>3</sup>.

*Ключевые слова:* пульсары, магнетары, рассеяние радиоимпульсов, фазированные решетки

DOI: 10.31857/S0004629922010066

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнетар представляет собой нейтронную звезду с мощным магнитным полем  $\sim 10^{13}$ – $10^{14}$  Гс, теоретическое предсказание которой было сделано еще в 1992 г. [1, 2]. В 1979 г. в гамма- и рентгеновском диапазонах был зарегистрирован яркий сигнал, предположительно испущенный источником в Большом Магеллановом Облаке, и по свойствам напоминающий позже открытые магнетары [3]. Первый галактический магнетар, SGR 1900+14, был открыт в 1998 г. при наблюдении мощной вспышки также в гамма- и рентгеновском диапазонах [4].

Предполагалось, что магнетары являются объектами, излучающими только в двух диапазонах — гамма и рентгеновском. Но в 1997 г. Кузьминым впервые был зарегистрирован сигнал в радиодиапазоне на частоте 102 МГц от известного источника PSR J0633+1746 (Геминга) [5]. На данный момент ученым известен 31 магнетар [6].

Впервые вспышка от источника SGR 1935+2154 была зарегистрирована в 2014 г. [7]. На космической обсерватории “Chandra” наблюдались пульсации SGR 1935+2154 на уровне  $10\sigma$ , что позволило определить источник как кандидат в

магнетары. Объект также наблюдался с помощью аппарата Konus-Wind [8]. Оценка продолжительности импульса, равная 1.7 с, и измерение флюэнса  $\sim 2.5 \times 10^{-5}$  эрг см<sup>-2</sup> позволили отнести источник к объектам, имеющим редкие промежуточные вспышки в мягком гамма-диапазоне. В результате наблюдений остатка галактической сверхновой G57.2+0.8 на частотах 1420 и 408 МГц Козес и др. отождествили его с SGR 1935+2154, поскольку оценка возраста, расстояния, поляризации и спектрального индекса остатка показала, что объекты физически связаны [9]. В ноябре 2019 г. аппарат Konus-Wind зарегистрировал повышенную активность объекта [10]. Пиковая энергия импульсов в гамма-диапазоне достигала  $29.4 \pm 1.9$  кэВ. Вплоть до конца апреля 2020 г. иная вспышечная активность не была зарегистрирована.

27 апреля 2020 г. телескопами Swift и Fermi/GMB были вновь зарегистрированы вспышки от SGR 1935+2154 [11]. Уникальность события состояла в том, что за первые 24 мин наблюдений было зарегистрировано около 35 отдельных импульсов. При более ранних наблюдениях в пик активности регистрировалось всего несколько вспышек. Менее чем через сутки, 28 апреля, от

**Таблица 1.** Параметры импульса от магнетара SGR 1935+2154

Параметр	Величина
UTC	2020-09-02 18:14:59
Мера дисперсии, пк/см <sup>3</sup>	320 ± 10
Плотность потока на 111 МГц, мЯн	140
Отношение С/Ш	6.6
Ширина импульса, с	2.2
Величина рассеяния, мс	340
Флюэнс, Ян · мс	300

источника на частоте 400–800 МГц радиотелескопом CHIME/FRB впервые было зарегистрировано мощное импульсное радиоизлучение [12]. Оценка меры дисперсии импульса составила  $DM = 332.8$  пк/см<sup>3</sup>, что согласуется с ранее полученными оценками модели плотности электронов на луче зрения в Галактике NE 2001 [13]. Сигнал имел структуру, состоящую из двух импульсов шириной около 5 мс, разделенных временным интервалом около 30 мс. Благодаря дальнейшим наблюдениям SGR 1935+2154 на STARE2 на частоте 1.4 ГГц была зарегистрирована вспышка, флюэнс которой составил >1.5 МЯн мс [14]. Этот факт позволил утверждать, что явления подобного рода хорошо вписываются в модели, описывающие быстрые радиовсплески (FRBs), впервые открытые в 2007 г. и связанные с внегалактическими объектами [15, 16].

Впервые периодическое излучение от SGR 1935+2154 в радиодиапазоне было зарегистрировано радиотелескопом MNC (Medicina Northern Cross) на частоте  $408 \pm 16$  МГц [17]. По этим наблюдательным данным периодический сигнал с мерой дисперсии  $DM = 316 \pm 18$  пк/см<sup>3</sup> и рассеянием порядка 100 мс имеет период  $P = 3.24760$  с. Кроме того, периодическое излучение было обнаружено радиотелескопом FAST на частоте  $1.25 \pm 0.46$  ГГц [18].

Поскольку магнетар SGR 1935+2154 попадает в поле зрения радиотелескопа БСА ФИАН, было принято решение провести мониторинг источника, начиная с сентября 2019 г., по февраль 2021 г. В результате 2 сентября 2020 г. была обнаружена вспышка на частоте 111 МГц, полные характеристики которой приведены в табл. 1.

## 2. АППАРАТУРА

Радиотелескоп БСА ФИАН представляет собой инструмент меридианного типа. Это антенна метрового диапазона волн, имеющая самую высокую мгновенную чувствительность. Рабочий диапазон инструмента 109–111.5 МГц. Флюктуа-

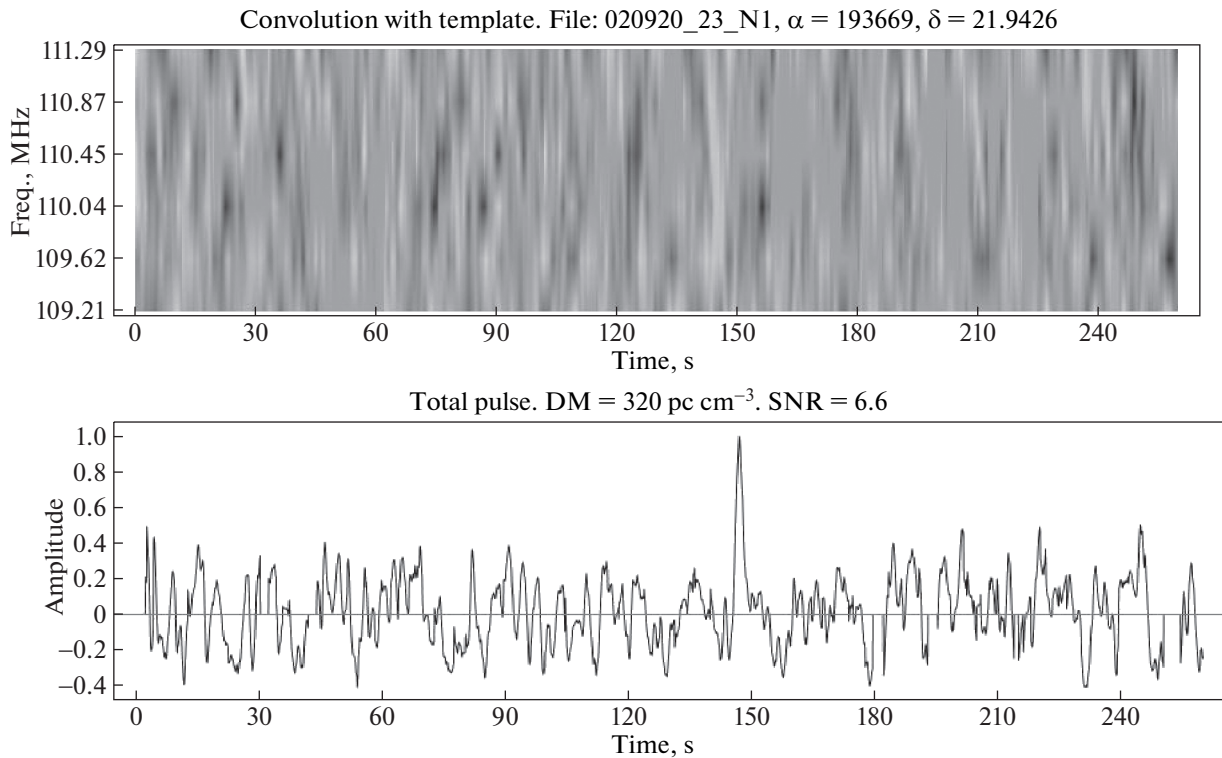
ционная чувствительность радиотелескопа в полосе приема составляет 140 мЯн с учетом временного разрешения 0.1 с [19]. В качестве регистрирующего устройства используется многоканальный цифровой приемник, благодаря которому запись сигнала ведется в двух режимах. Первый режим записи производится с низким частотным разрешением в шести частотных каналах и полосой приема 415 кГц каждый. В данном режиме временной интервал между отсчетами составляет 100 мс. При регистрации сигнала во втором режиме используются 32 частотных канала с полосой приема 78 кГц и временным разрешением 12.5 мс. Оба режима формируются цифровым методом процессором БПФ на 512 каналов.

Радиотелескоп БСА ФИАН имеет две диаграммы направленности: стационарную (ДН-3) и управляемую (ДН-1). ДН-3 перекрывает область неба от  $-9^\circ$  до  $55^\circ$  по склонению и используется для наблюдения большого числа межпланетных мерцаний компактных радиоисточников. Ширина луча этой диаграммы направленности по половинному уровню зависит от склонения, на котором находится наблюдаемый источник, и расположена в пределах от  $24'$  до  $48'$ . Время прохождения источника через диаграмму направленности составляет 3.3–5.8 мин. ДН-1 используется для наблюдения пульсаров.

Отдельно следует отметить большое поле зрения БСА ФИАН, ~50 кв. гр. Максимальная эффективная площадь антенны составляет 47000 м<sup>2</sup> в зените и уменьшается к горизонту пропорционально  $\cos z$ , где  $z$  – зенитное расстояние. Температура собственных шумов системы колеблется в пределах 550–3500 К и зависит от фона неба и сезона наблюдений. Для учета наклона антенны БСА к горизонту и несовпадения нормали к антенне с зенитом вводилась поправка, которая определялась из прохождения мощного радиоисточника 3С241, находящегося в том же луче диаграммы, что и магнетар.

## 3. НАБЛЮДЕНИЯ МАГНЕТАРА SGR 1935+2154

Для поиска единичных импульсов от магнетара SGR 1935+2154 были использованы данные, записанные в режиме шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с. Поиск импульсов осуществлялся в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН с сентября 2019 г. до марта 2021 г. Всего было проанализировано около 32 ч наблюдений. Из часовой записи выбирался участок, соответствующий прохождению источника через диаграмму направленности БСА. Для наилучшего выделения сигнала на фоне шумов при обработке данных к участку записи применялась методика, при которой данные сворачиваются с



**Рис. 1.** Вверху представлен динамический спектр импульса от магнетара SGR 1935+2154. Внизу — его суммарный профиль. На динамическом спектре на оси ординат приведены значения центральных частот шести частотных каналов, в которых наблюдался источник, более светлые области соответствуют большей амплитуде сигнала, на суммарном профиле импульса — амплитуда, приведенная к единичному значению. На оси абсцисс приведено время в секундах.

шаблоном, по форме соответствующим искомому сигналу, т.е. импульсу с экспоненциальным передним и задним фронтами [20, 21]. Далее проводился визуальный анализ, при котором на динамическом спектре выделялся искомый импульс. Ежедневно источник находился 3.5 мин в поле зрения радиотелескопа.

Для поиска периодического излучения использовались 32-канальные данные с выборкой 12.5 мс. Из записи выделялся участок длиной 16384 отсчета, соответствующий времени прохождения магнетара через диаграмму направленности телескопа. Данные поканально сворачивались с двойным периодом  $2 \times 3.247$  с, в результате чего для дальнейшего анализа формировался динамический спектр. Критерием обнаружения являлось наличие двух импульсов в суммарном профиле, а также характерная колоколообразная форма кривой  $SNR(DM)$ , максимум которой совпадал с измеренной ранее мерой дисперсии.

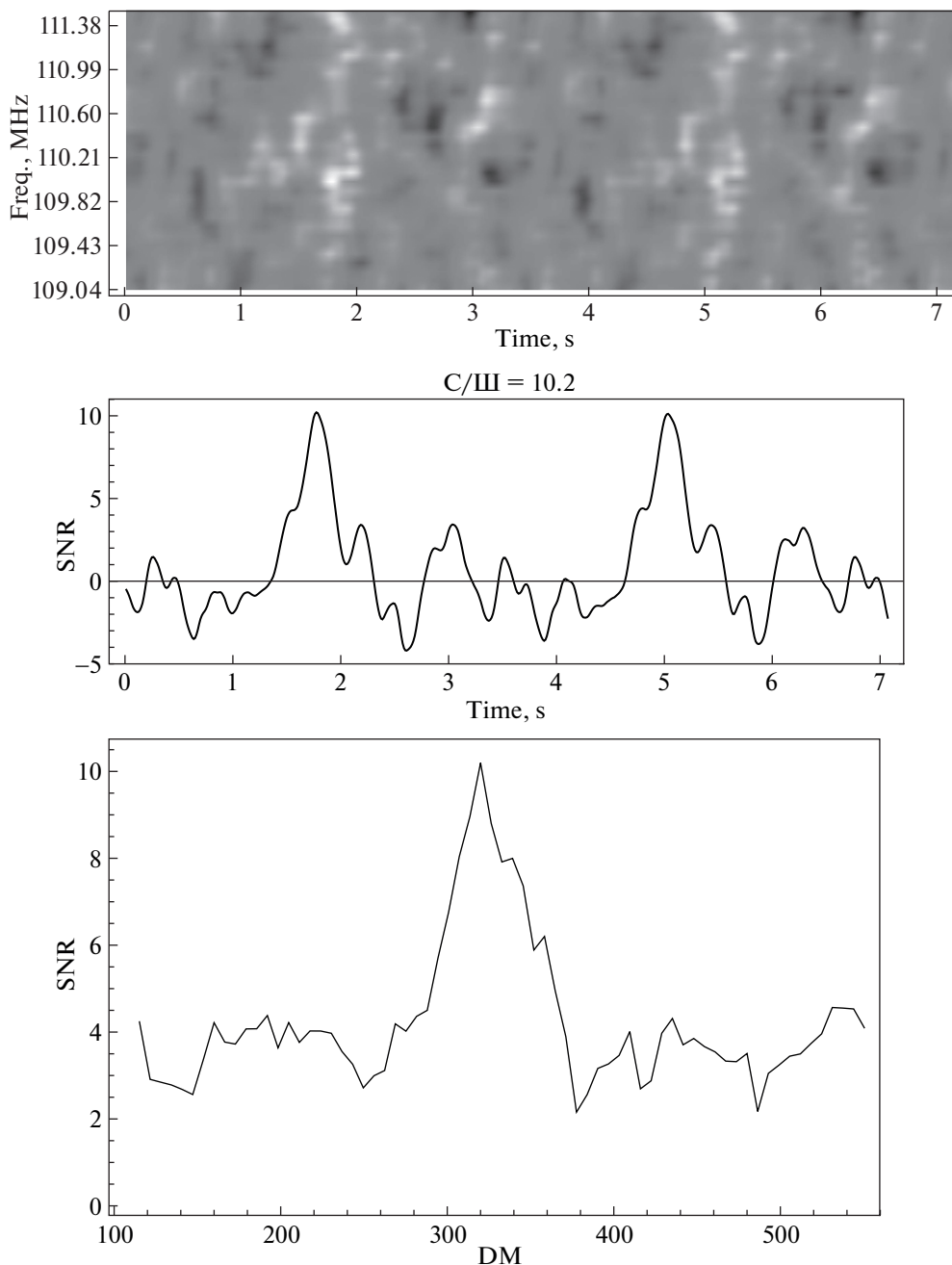
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

За указанный период от магнетара SGR 1935+2154 была зарегистрирована вспышка 2.09.2020 г. [22]. На сегодняшний день диапазон

109–111.5 МГц является самым низкочастотным, на котором обнаружен сигнал от SGR 1935+2154. Измеренная пиковая плотность потока импульса составляет 140 мЯн. Мера дисперсии  $DM$  равна  $320 \pm 10 \text{ пк/см}^3$  и в пределах погрешности совпадает со значениями, измеренными ранее [12, 14]. Динамический спектр и профиль импульса приведены на рис. 1. Параметры импульса приведены в табл. 1.

Плотность потока в 140 мЯн является нижним пределом оценки плотности потока, поскольку, как видно из координат, импульс был зарегистрирован на выходе из главного лепестка диаграммы направленности БСА ФИАН. После введения поправок по  $\alpha$  и  $\delta$  и приведения к максимуму диаграммы радиотелескопа значение пиковой плотности потока импульса стало равным  $\sim 14.6$  Ян.

Еще одним важным результатом является впервые обнаруженное периодическое излучение от магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц. На рис. 2 (вверху) показан динамический спектр при сложении записи с двойным периодом, скомпенсированный за меру дисперсии. Применялось сглаживание с шаблоном шириной 0.22 с. Далее ширина всех импульсов приводится на высоте  $1/e$ . На рис. 2 (центр) показан суммарный



**Рис. 2.** Вверху – динамический спектр периодических импульсов магнетара SGR 1934+2154 на 111 МГц, исправленный за меру дисперсии. Более светлые участки соответствуют большей амплитуде сигнала. В центре – суммарный профиль периодических импульсов магнетара. Внизу – зависимость величины “сигнал/помеха” от пробной меры дисперсии.

профиль. Также использовалось сложение с двойным периодом. Интересной особенностью периодического излучения, хорошо видимой на динамическом спектре (рис. 2 (вверху)), является наличие интеримпульса. Он наблюдается в частотных каналах, в которых отсутствует главный импульс.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружение периодического излучения от магнетара SGR 1935+2154 в радиодиапазоне 109–111.5 МГц дает дополнительную возможность сравнения свойств этого объекта с оными в других диапазонах. До этого периодическое излуче-

ние от SGR 1935+2154 было обнаружено на радиотелескопе Medicina Norther Cross [17] на частоте 408 МГц. Наблюдатели сообщают, что измеренный период равен 3.24760(3) с, пиковая плотность потока 4 мЯн, мера дисперсии  $DM = 316(18)$  пк/см<sup>3</sup>, рассеяние импульса 72(5) мс. Рассеяние импульса было измерено нами заново из оцифровки приведенного в телеграмме суммарного профиля. Согласно измерениям на 111 МГц пиковая плотность потока периодических импульсов магнетара SGR 1935+2154 за 09–10.12.2020 г. равна ~40 мЯн, что в комбинации с величиной 4 мЯн на частоте 411 МГц дает спектральный индекс  $\alpha = -1.25$ .

После того как периодическое радиоизлучение было зарегистрировано на радиотелескопе MNC, наблюдатели на телескопе FAST [23] также обнаружили его на частоте 1250 МГц. Но никаких параметров импульса, кроме факта обнаружения периодичности и периода 3.24781(1) с, сообщено не было. В связи с этим мы проанализировали приведенный в телеграмме график, получили средний профиль и измерили ширину импульса, которая оказалась равной 106(5) мс. Так как до настоящего времени полноценного фазового анализа моментов прихода импульсов SGR 1935+2154 не сделано, то определенно следует продолжать наблюдения периодического излучения для последующего определения точных величин периода и его производной.

Величина рассеяния импульсов была измерена многими наблюдателями [17, 24, 25], и, как и предполагается, демонстрирует систематическое увеличение с понижением наблюдательной частоты. Стоит, однако, заметить, что зависимость от частоты сильно отличается от закона  $\tau_{sc} \propto f^{-4}$ , характерного для пульсаров. В табл. 2 приведена ширина импульсов в зависимости от частоты на высоте  $1/e$  относительно максимума по наблюдениям в обсерватории Онсала (OSO) в Швеции и 32 м радиотелескопе в Торуня (Польша). Измерения на 1250, 411 и 111 МГц относятся к периодическим импульсам. Очевидно, что, так как отдельные радиовсплески и периодические импульсы генерируются разными механизмами, то напрямую их сравнивать нельзя. Если описать рассеяние единичных импульсов на 600, 1000, 1324 МГц единым законом, то получим зависимость

$$\log_{10}(\tau_{sc} [\text{ms}]) = (3.03 \pm 0.29) - (1.14 \pm 0.10) \log_{10}(f [\text{MHz}]), \quad (1)$$

т.е. заведомо более слабую, чем 4-я степень зависимости от частоты. Причин этому может быть несколько. Первое — это, конечно же, отличие от колмогоровского закона турбулентности и модели тонкого экрана. Вторая причина, как предлагают Кирстен и др. [26], это собственная форма

**Таблица 2.** Ширина импульсов магнетара SGR 1935+2154 на разных частотах

Частота, МГц	Ширина, мс	Ссылка
111	120(13)	БСА, настоящая статья
411	72(5)	MNC [17]
600	0.759(8)	CHIME [24]
1000	0.4(1)	STARE2 [25]
1250	106(5)	FAST [23]
1324	0.313(31)	[26]

Примечание. Ширины импульсов исправлены за дисперсионное уширение в каналах. Приведены ширины как периодических (111, 411, 1250 МГц), так и единичных импульсов (600, 1000, 1324 МГц).

импульса, которая имеет ширину больше, чем величина рассеяния на соответствующей частоте. И, наконец, третья причина, частично пересекающаяся с первой, это наличие оболочки остатка сверхновой, в которой с большой вероятностью находится магнетар.

Попутно отметим, что ширина периодических импульсов равна ~0.03 периода, т.е. лежит в характерном для пульсаров диапазоне и не показывает какой-либо зависимости от частоты. При этом ширина периодических импульсов на 2–2.5 порядка больше ширины одиночных импульсов. Если принять, что наряду с рассеянием импульс имеет собственную ширину, которая определяется размером излучающей области, то получается, что излучение единичных импульсов происходит в областях, размер которых более чем на 2–2.5 порядка меньше области излучения в классическом конусе излучения на той же частоте. Это, по нашему мнению, является убедительным подтверждением различных механизмов генерации.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы:

1. В период с 1 сентября 2019 г. по март 2021 г. была обнаружена вспышка от магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц.
2. В работе получены динамический спектр и суммарный профиль импульса, а также определены параметры сигнала, которые представлены в табл. 1.
3. В период наблюдений с января по февраль и с сентября по декабрь 2020 г. обнаружено периодическое излучение от указанного магнетара также на частоте 111 МГц, которая является самой низкой частотой наблюдения периодических сигналов от SGR 1935+2154.

4. В комбинации с измерениями пиковой плотности потока на 406 МГц [17] вычислен спектральный индекс  $\alpha = -1.25$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. C. Duncan and C. Thompson*, *Astrophys. J.* **392**, L9 (1992).
2. *B. Paczynski*, *Acta Astronomica* **42**, 1 (1992).
3. *T. L. Cline, U. D. Desai, G. Pizzichini, B. J. Teegarden, et al.*, *Astrophys. J.* **237**, L1 (1980).
4. *K. Hurley, T. Cline, E. Mazets, S. Barthelmy, et al.*, *Nature* **397** (6714), 41 (1999).
5. *A. D. Kuz'min and B. Ya. Losovskii*, *Astron. Letters* **25** (2), 108 (1999).
6. *S. A. Olausen and V. M. Kaspi*, *Astrophys. J. Suppl.* **212** (1), id. 6 (2014).
7. *R. Nanda*, Chandra proposal ID 15508481 (2014).
8. *A. V. Kozlova, G. L. Israel, D. S. Svinkin, D. D. Frederiks, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **460** (2), 2008 (2016).
9. *R. Kothes, X. Sun, B. Gaensler, and W. Reich*, *Astrophys. J.* **852** (1), id. 54 (2018).
10. *A. Ridnaia, S. Golenetskii, R. Aptekar, D. Frederiks, et al.*, GRB Coordinates Network, Circular Service № 26242 (2019).
11. *D. M. Palmer*, *Astron. Telegram* № 13675 (2020).
12. *P. Scholz*, *Astron. Telegram* № 13681 (2020).
13. *J. M. Cordes and T. J. W. Lazio*, arXiv:astro-ph/0207156 (2002).
14. *C. Bochenek, S. Kulkarni, V. Ravi, D. McKenna, G. Hallinan, and K. Belov*, *Astron. Telegram* № 13684 (2020).
15. *Ya. N. Istomin*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **478** (4), 4348 (2018).
16. *D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, and F. Crawford*, *Science*, **318** (5851), 777 (2007).
17. *M. Burgay, M. Pilia, G. Bernardi, G. Naldi, et al.*, *Astron. Telegram* № 13783 (2020).
18. *C. Zhang, J. C. Jiang, Y. P. Men, B. J. Wang, et al.*, *Astron. Telegram* № 13699 (2020).
19. *В. В. Орешко, Г. А. Латышев, И. А. Алексеев, Ю. И. Азаренков, Б. И. Иванов, В. М. Карпов, В. И. Костромин*, *Труды ИПА* **24**, 80 (2012).
20. *V. A. Fedorova and A. E. Rodin*, *Astron. Rep.* **63** (1), 39 (2019).
21. *V. A. Fedorova and A. E. Rodin*, *Astron. Rep.* **63** (11), 877 (2019).
22. *A. Rodin and V. Fedorova*, *Astron. Telegram* № 14186 (2020).
23. *W. Zhu, B. Wang, D. Zhou, X. Dejiang, et al.*, *Astron. Telegram* № 14084 (2020).
24. *B. C. Andersen, K. M. Bandura, M. Bhardwaj, A. Bij, et al.*, *Nature* **587** (7832), 54 (2020).
25. *C. D. Bochenek, V. Ravi, K. V. Belov, G. Hallinan, J. Kocz, S. R. Kulkarni, and D. L. McKenna*, *Nature* **587** (7832), 59 (2020).
26. *F. Kirsten, M. Snelders, M. Jenkins, K. Nimmo, J. van den Eijnden, J. W. T. Hessels, M. P. Gawronski, and J. Yang*, *Nature Astron.* **5**, 414 (2021).