

О поиске импульсного излучения от магнетара SGR1935+2154 на БСА ФИАН

© Е. А. Брылякова, С. А. Тюльбашев

ФИАН, Астрокосмический центр, ПРАО, Моск. обл., г. Пушчино, Россия

Реферат

Магнетар известен как источник мягкого гамма-излучения. Впервые радиоизлучение в виде гипервспышки от магнетара SGR1935+2154 было обнаружено на частоте 1.25 ГГц на радиотелескопе FAST в мае 2020 г. Авторами работы проведена проверка опубликованного ранее (Федорова, Родин, 2020) импульса от магнетара SGR1935+2154.

Магнетар попадает в обзор, проводящийся на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) на частоте 111 МГц. Данные, получаемые на БСА, записываются параллельно в двух режимах, имеющих низкое и высокое частотно-временное разрешение: 6 каналов — при ширине канала 415 кГц и временном разрешении $\Delta t = 100$ мс; 32 канала — при ширине канала 78 кГц и временном разрешении $\Delta t = 12.5$ мс. Оригинальный поиск проводился с использованием данных с низким частотно-временным разрешением. По сравнению с поиском в дециметровом диапазоне поиск диспергированных сигналов в метровом диапазоне длин волн затруднен из-за рассеяния, пропорционального четвертой степени частоты, и дисперсионного сглаживания импульса в частотных каналах, пропорционального второй степени частоты. Для того чтобы собрать уширенный импульсный сигнал и получить наилучшее значение соотношения сигнал/шум (СШ), поиск проводился при помощи алгоритма, основанного на свертке многоканальных данных с шаблоном рассеянного импульса. Форма шаблона соответствует форме рассеянного импульса с мерой дисперсии (DM) 375 пк/см³. Для повторной проверки использовались те же самые данные, в которых был обнаружен импульс от магнетара. Дополнительная проверка опубликованного импульса была также проведена с использованием данных, имеющих более высокое частотно-временное разрешение.

Так как дисперсионное сглаживание в частотном канале в 32-канальных данных в 5 раз меньше, чем в 6-канальных данных, можно было ожидать увеличение импульса СШ примерно в 2 раза. Однако импульсного излучения с СШ > 4 , имеющего сдвиг пика импульса в зависимости от DM, от SGR1935+2154 не обнаружено ни в 32-канальных, ни в 6-канальных данных.

Ключевые слова: быстрые радиовсплески, мера дисперсии, SGR1935+2154.

Контакты для связи: Брылякова Елена Андреевна (elinxt@bk.ru).

Для цитирования: Брылякова Е. А., Тюльбашев С. А. О поиске импульсного излучения от магнетара SGR1935+2154 на БСА ФИАН // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 63. С. 3–7.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.63.3-7>

About Search of Pulse Emission from Magnetar SGR1935+2154 at LPA LPI

E. A. Brylyakova, S. A. Tyul'bashev

Lebedev Physics Institute, Astro Space Center, Pushchino Radio Astronomy Observatory,
Moscow reg., Pushchino, PRAO, Russia

Abstract

The magnetar is known as a source of soft gamma radiation. For the first time, radio emission from SGR1935+2154 in the form of a hyperflare was detected at a frequency of 1.25 GHz using the FAST radio telescope in May 2020. A check of the previously published (Fedorova, Rodin, 2020) pulse from the magnetar SGR1935+2154 was carried out.

The magnetar enters the survey conducted on the Large Phased Array (LPA) radio telescope at a frequency of 111 MHz. The data received on the LPA is recorded in parallel in two modes having low and high frequency-time resolution: 6 channels with a channel width of 415 kHz and a time resolution of $\Delta t = 100$ ms; 32 channels with a channel width of 78 kHz and a time resolution of $\Delta t = 12.5$ ms. The original search was carried out using data with low time-frequency resolution. The search for dispersed signals in the meter wavelength range is difficult, compared with the search in the decimeter range, due to scattering proportional to the fourth power of frequency and dispersion smoothing of the pulse in frequency channels proportional to the second power of frequency. In order to collect a broadened pulse signal and obtain the best value of the signal-to-noise ratio (S/N), the search was carried out using an algorithm based on the convolution of multichannel data with a scattered pulse pattern. The shape of the template corresponds to the shape of a scattered pulse with a dispersion measure (DM) of 375 pc/cm³. For repeated verification, the same data was used in which the pulse from the magnetar was detected. An additional check of the published pulse was also carried out using data with a higher frequency-time resolution.

Since the dispersion smoothing in the frequency channel in the 32-channel data is 5 times less than in the 6-channel data, an increase approximately 2 times in the S/N pulse could be expected. Pulse radiation with S/N > 4 having a pulse peak shift depending on DM from SGR1935+2154 was not detected in either 32-channel or 6-channel data.

Keywords: fast radio bursts, dispersion measure, SGR1935+2154.

Contacts: Elena A. Brylyakova (elinxt@bk.ru).

For citation: Brylyakova E. A., Tyul'bashev S. A. About search of pulse emission from magnetar SGR1935+2154 at LPA LPI // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 63. P. 3–7. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.63.3-7>

Введение

В 2007 г. были открыты быстрые радиовсплески (FRB — Fast Radio Bursts) ([Lorimer et al., 2007](#)), природа которых остается неясной, и есть много гипотез об их происхождении ([Petroff et al., 2022](#)). FRB представляют собой мощные одиночные радиоимпульсы с длительностью от долей до нескольких миллисекунд, с мерой дисперсии, указывающей на внеземное происхождение всплесков. Мера дисперсии (DM) — характеристика среды, определяющая разное время прихода импульсов на разных частотах (в силу зависимости показателя преломления плазмы от частоты). К настоящему моменту в дециметровом диапазоне обнаружен ряд внегалактических FRB, в том числе повторяющихся ([Spitler et al., 2016](#); [Andersen et al., 2019](#); [Fonseca et al., 2020](#)). Одним из предположений о природе FRB являются магнетарные гипервспышки ([Popov, Postnov, 2010](#)). Первое обнаружение гипервспышки магнетара в радиодиапазоне было зарегистрировано в апреле 2020 г., когда быстрый радиовсплеск был обнаружен со стороны галактического магнетара SGR1935+2154, который был известен как источник мягкого гамма-излучения ([Zhang et al., 2020](#)). Зарегистрированной FRB-вспышке предшествовал ряд мягких гамма-всплесков, наблюдаемых спутником Swift ([An et al., 2020](#)).

В 2020 г. была опубликована работа ([Федорова, Родин, 2020](#)), согласно которой на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) на частоте 111 МГц был найден быстрый радиовсплеск, имеющий DM 320 пк/см³ и ассоциирующийся у авторов с источником SGR1935+2154. В настоящей работе мы провели проверку обнаруженного импульса, используя те же данные, что были использованы авторами, и повторяя предложенную методику поиска. Отметим, что ранее авторами уже проводилась проверка найденных ими быстрых радиовсплесков ([Брылякова, Тюльбашев, 2023](#)), которая показала отсутствие достоверных сигналов в обозначенной области.

Проверка найденного FRB

Поиск FRB проводился в данных ежедневного круглосуточного мониторинга, проводимого на радиотелескопе БСА ФИАН в 96 пространственных лучах. Мониторинг идет в рамках обзора PUMPS

(Pushchino Multibeam Pulsar Search, ([Tyul'bashev et al., 2022](#))) и начал в августе 2014 г. БСА ФИАН — радиотелескоп меридианного типа, состоящий из 16384 волновых диполей. Размер диаграммы направленности составляет примерно 0.5°×1°, время прохождения источника через меридиан составляет примерно 3.5 мин по половинной мощности. Центральная частота наблюдений 110.3 МГц, полоса 2.5 МГц.

Согласно работе ([Федорова, Родин, 2020](#)) и ссылкам в ней поиск быстрых радиовсплесков производился следующим образом: из часовой записи выбирался участок, соответствующий прохождению источника через диаграмму направленности БСА, далее проводилась свертка данных с шаблоном, соответствующим предполагаемой форме сигнала от SGR1935+2154, согласно модели рассеяния Кузьмина ([Кузьмин и др., 2007](#)). Далее проводился визуальный поиск импульсов на периоде 01.09.2019–12.02.2021. В результате был обнаружен импульс 02.09.2020.

Данные мониторинга пишутся параллельно в двух режимах, имеющих низкое и высокое частотно-временное разрешение: 6 каналов — при ширине канала 415 кГц и временным разрешением $\Delta t = 100$ мс; 32 канала — при ширине канала 78 кГц и временным разрешением $\Delta t = 12.5$ мс. Данные с низким частотно-временным разрешением используются в программе «Космическая Погода» ([Shishov et al., 2016](#)), а также для контроля качества идущих наблюдений. Данные с высоким частотно-временным разрешением используются для поиска пульсаров и транзиентов. Для поиска FRB авторы ([Федорова, Родин, 2020](#)) использовали данные с низким частотно-временным разрешением. Используя те же самые данные, мы попытались обнаружить всплеск в данных за 02.09.2020.

Согласно ранее опубликованной работе ([Deneva et al., 2016](#)), чувствительность радиотелескопа при поиске одиночных диспергированных импульсов можно оценить по формуле:

$$S_{\min} = \left(\frac{W_{\text{obs}}}{W_{\text{int}}} \right) \frac{kT_{\text{sys}}}{A_{\text{eff}} \sqrt{N_{\text{pol}} \Delta\nu W_{\text{obs}}}}, \quad (1)$$

здесь W_{obs} , W_{int} — это наблюдаемая и внутренняя ширина импульса, k — постоянная Больцмана, T_{sys} — это температура системы (для оценок 1000 К), A_{eff} — эффективная площадь БСА (для оценок 47000 кв. м), N_{pol} — число поляризаций

(одна), $\Delta\nu$ — полная полоса наблюдений (2.5 МГц). В свою очередь наблюдаемая ширина импульса определяется временем опроса точки, дисперсионным рассеянием сигнала в частотном канале, рассеянием и внутренней шириной импульса:

$$W_{obs} = \sqrt{\Delta t^2 + t_{ch}^2 + t_{kuz}^2 + W_{int}^2}. \quad (2)$$

Из формул (1, 2) видно, что чувствительность зависит от видимой ширины наблюдаемого импульса. Чем меньше влияние рассеяния и дисперсионного сглаживания в частотном канале, тем выше чувствительность наблюдений. Чем ниже частота наблюдений, тем выше влияние рассеяния и дисперсионного сглаживания. В метровом диапазоне это влияние особенно велико. DM увеличивает ширину импульса из-за дисперсионного сглаживания в частотных каналах как $t_{ch} \sim \sim DM (\Delta\nu/v^3)$, рассеяние увеличивает ширину импульса как $t_{kuz} \sim (DM/100)^{2.2}$. Чем больше ширина канала, тем сильнее сказывается дисперсионное сглаживание, и поэтому (если исходный сигнал был узким) чем уже канал и чем меньше DM, тем его конечная ширина будет ближе к исходной. Это означает, что для узких импульсов, для которых влияние дисперсионного сглаживания и рассеяния невелико, чувствительность будет выше. Очевидно также, что для рассмотренного случая узкого импульса, длительность которого меньше Δt , чувствительность будет выше для данных с высоким частотно-временным разрешением.

По формуле (1) оценена теоретическая чувствительность для данных с высоким и низким

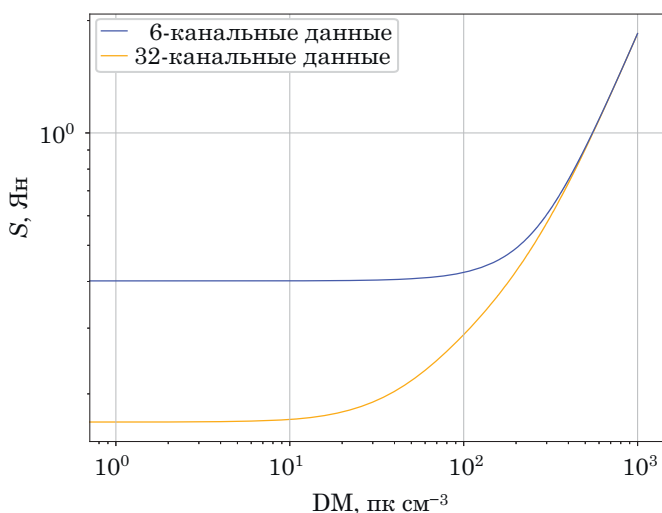


Рис. 1. Чувствительность радиотелескопа БСА ФИАН, посчитанная по формуле (1) для 6- и 32-канальных данных

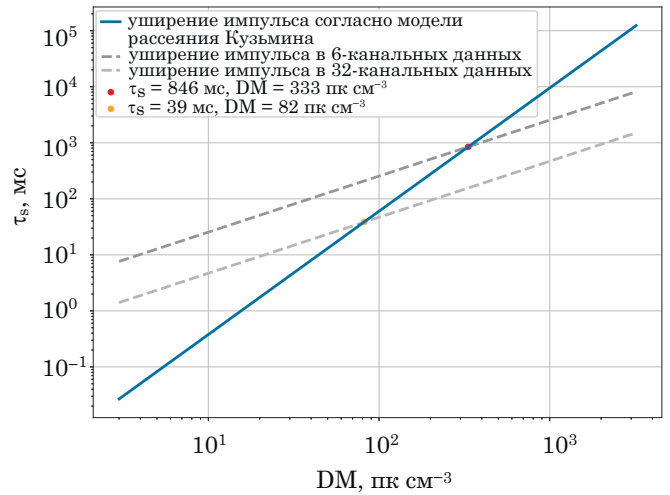


Рис. 2. Величина уширения импульса из-за дисперсионного сглаживания (для 6- и 32-канальных данных зеленый и красный штрих) и из-за рассеяния согласно модели Кузьмина (Кузьмин и др., 2007)

частотно-временным разрешением, которые получены в мониторинге на БСА в зависимости от DM. На рис. 1–2 представлены графики зависимости чувствительности и уширения импульса для 6- и 32-канальных данных. Из рис. 1 видно, что до $DM \approx 300$ пк/см³ чувствительность в 32-канальных данных заметно выше, чем в 6-канальных данных. На $DM \approx 600$ пк/см³ разница в чувствительности между 32- и 6-канальными данными становится незначительной. Это связано с тем, что на $DM > 330$ пк/см³ рассеяние импульса становится настолько велико (см. формулу (1)), что ширина импульса в большей мере определяется рассеянием. Поэтому в конечном итоге чувствительности выравниваются. Однако на $DM = 320$ пк/см³ (мера дисперсии магнетара) чувствительность в 32-канальных данных примерно в 2 раза выше, чем в 6-канальных данных.

Повторяя методику авторов (Федорова, Родин, 2020), мы обработали как 6-канальные, так и 32-канальные данные, предполагая, что отношение СШ окажется выше в 32-канальных данных. Чтобы посмотреть окрестности источника, для обработки взята 20-минутная запись. К сожалению, нам не удалось обнаружить диспергированный сигнал выше 4σ шумов в направлении магнетара. На рис. 3 показана обработанная запись по предложенной авторами методике. В обработанных 6-канальных данных присутствует сигнал на уровне $\sim 5\sigma_n$, но расстояние до этого сигнала 8 временных минут, что больше размера диаграммы направленности БСА ФИАН.

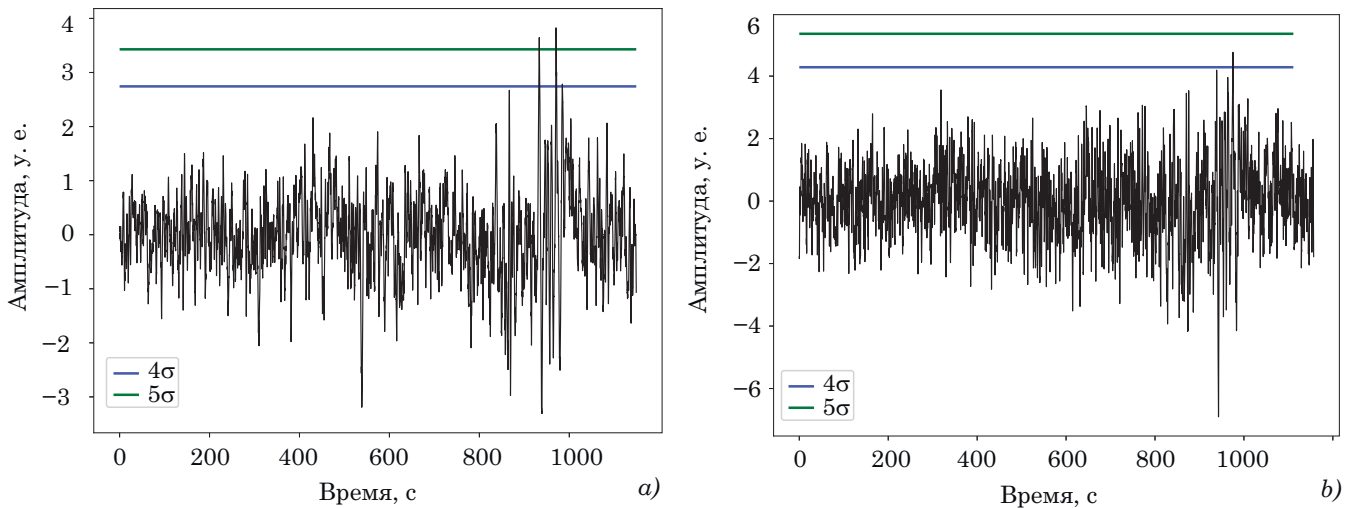


Рис. 3. 20 мин обработанной записи после свертки с шаблоном по Кузьмину: *a* — 6-канальные данные, *b* — 32-канальные данные. Центр рисунка соответствует координате магнетара

Обсуждение результатов

Поиск FRB в метровом диапазоне представляет собой сложную техническую проблему. Во-первых, чем больше DM, тем больше дисперсионное сглаживание в частотных каналах. Для того чтобы избежать потери чувствительности из-за дисперсионного сглаживания, западные коллеги, работающие в метровом диапазоне длин волн на радиотелескопе LOFAR, используют узкие частотные каналы ([Pastor-Marazuela et al., 2021](#)). Во-вторых, использование сколь угодно узких частотных каналов все же не позволяет компенсировать уширение сигнала из-за рассеяния. Рассеяние уширяет сигнал и ухудшает чувствительность. При обработке мониторинговых данных БСА ФИАН мы сталкиваемся с обоими факторами. Так как подавляющая часть известных FRB имеет $DM > 300\text{--}400$ пс/см³, именно рассеяние и будет определять конечную чувствительность при их поиске. Авторы ([Федорова, Родин, 2020](#)) полагают, что свертка с шаблоном рассеянного импульса позволяет собрать сигнал без потери отношения СШ. Однако собрать сигнал без потерь возможно только для случая, когда длительность импульса больше, чем характерное время рассеяния. Про магнетар J1935+2154 известно, что начиная с 2020 г. от него зарегистрировано множество вспышек в радиодиапазоне. Согласно опубликованным данным ([Bochenek et al., 2020](#); [Andersen et al., 2020](#); [Kristen et al., 2021](#)), типичная длительность импульсов составляет доли миллисекунды. Таким образом, найденные другими исследователями импульсы этого магнетара заведомо уже, чем время рассеяния на частоте наблюдений БСА, и в 10–100 раз меньше, чем время считывания одной точки в данных БСА, имеющих высокое и низкое частотно-временное разрешение, соответственно. Нет никаких оснований предполагать, что у этого магнетара есть им-

пульсы шириной больше секунды, а именно такая ширина импульса (см. рис. 2) нужна для того, чтобы получить одинаковое отношение сигнала к шуму для обработанных данных БСА. Таким образом, если импульс действительно существует, то в данных с высоким частотно-временным разрешением он должен иметь соотношения СШ в два раза больше, чем в данных с низким разрешением. На рис. 3 этого не наблюдается. Поэтому мы считаем, что обнаружение ложное. Ранее мы уже пытались обнаружить сигналы от опубликованных авторами FRB и тоже безуспешно ([Брылякова, Тюльбашев, 2023](#)). Из трех переобработанных кандидатов, мы получили похожую запись лишь для одного случая, но СШ = 3 был в два раза меньше опубликованного в работе ([Федорова, Родин, 2020](#)) значения. В том случае при проверке FRB оказалось, что авторы неправильно определяют СШ у проверяемых событий и, как мы ожидаем, неправильно вычитают базовую линию. С нашей точки зрения, необходима очень тщательная перепроверка всех опубликованных событий.

Благодарность

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

Литература

- Брылякова Е. А., Тюльбашев С. А. О проблемах обнаружения быстрых радиовсплесков на БСА ФИАН // *Астрон. журн.* 2023, в печати.
- Кузьмин А. Д., Лосовский Б. Ю., Лапаев К. А. Измерения рассеяния радиоизлучения пульсаров // *Астрон. журн.* 2007. Т. 84, № 8. С. 685–694.
- Федорова В. А., Родин А. Е. Поиск импульсного излучения от магнетара SGR1935+2154 // *Краткие сообщения по физике.* 2020. № 10.

An Tao, Hong Xiaoyu, Lao Baoqiang, et al. MWA low-frequency radio imaging of SGR 1935+2154 // *Astronomer's Telegram*. 2020. no. 13816.

Bochenek C. D., Ravi V., Belov K. V., et al. A fast radio burst associated with a Galactic magnetar // *Nature*. 2020. Vol. 587. P. 59.

The CHIME/FRB Collaboration, Andersen B. C., Bandura K., et al. CHIME/FRB discovery of eight new repeating fast radio burst sources // *The Astrophysical Journal Letters*. 2019. Vol. 885, no. 1. P. L24.

CHIME/FRB Collaboration, Andersen B. C., Bandura K. M., et al. A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar // *Nature*. 2020. Vol. 587. P. 54.

Deneva J. S., Stovall K., McLaughlin M. A., et al. New discoveries from the Arecibo 327 MHz drift pulsar survey radio transient search // *The Astrophysical Journal*. 2016. no. 1. P. 10.

Fonseca E., Andersen B. C., Bhardwaj M., et al. Nine new repeating fast radio burst sources from CHIME/FRB // *The Astrophysical Journal*. 2020. Vol. 891, no. 1. P. L6.

Kirsten F., Snelders M. P., Jenkins M., et al. Detection of two bright radio bursts from magnetar SGR 1935+2154 // *Nature Astronomy*. 2021. Vol. 5. P. 414.

Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A., et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin // *Science*. 2007. Vol. 318, N. 5851. P. 777.

Pastor-Marazuela I., Connor L., van Leeuwen J., et al. Chromatic periodic activity down to 120 megahertz in a fast radio burst // *Nature*. 2021. Vol. 596. P. 505.

Petroff E., Hessels J. W. T., Lorimer D. R. Fast radio bursts at the dawn of the 2020s // *Astron. Astrophys. Rev.*, 2022. Vol. 30.

Popov S. B., Postnov K. A. Hyperflares of SGRs as an engine for millisecond extragalactic radio bursts // *MNRAS*. 2010. P. 129–132.

Spitler L. G., Scholz P., Hessels J. W. T., et al. A repeating fast radio burst // *Nature*. 2016. Vol. 531, no. 7593. P. 202–205.

Shishov V. I., Chashei I. V., Oreshko V. V., et al. Monitoring of the turbulent solar wind with the upgraded Large Phased Array of the Lebedev Institute of Physics: First results // *Astronomy Reports*. 2016. Vol. 60. P. 1067.

Tyul'bashev S. A., Kitaeva M. A., Tyul'basheva G. E. Pushchino multibeam pulsar search — I. Targeted search of weak pulsars // *MNRAS*. 2022. Vol. 517. P. 1112.

Zhang C. F., Jiang J. C., Men Y. P., et al. A highly polarised radio burst detected from SGR 1935+2154 by FAST // *Astronomer's Telegram*. 2020. no. 13699.