Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 2, с. 90 – 95 

# Поиск сигнала от быстрых радиовсплесков в УФ диапазоне

*М. С. Пширков*[+*1)], *И. В. Тюрин*[×]

[+]*Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, 119234 Москва, Россия*

[*]*Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия*

[×]*Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 9 сентября 2025 г.
После переработки 18 ноября 2025 г.
Принята к публикации 24 ноября 2025 г.

В работе был проведен поиск УФ-сигналов, которые могут сопутствовать быстрым радиовсплескам. Для этого в данных телескопа GALEX, который наблюдал небо с 2003 по 2013 г., были проанализированы времена приходов фотонов из 29 областей локализации повторяющихся быстрых радиовсплесков. Не было найдено ни одного статистически значимого кандидата с характерной продолжительностью $\leq 10$ мс. Это позволило впервые поставить ограничения на отношение спектральных плотностей потоков в двух диапазонах: $F_{UV}/F_{\rm rad} < 4 \times 10^{-4}$, которые в несколько раз превосходят существующие аналогичные ограничения в оптическом диапазоне.

DOI: 10.7868/S3034576626010121

**1. Введение.** Быстрые радиовсплески (БРВ) (*fast radio bursts*, FRB) были впервые детектированы в 2007 году [1], и с тех пор этот феномен остается одной из главных загадок астрофизики. Несмотря на значительный прогресс в исследовании этого явления [2–4], до сих пор точно неизвестен механизм, ответственный за БРВ, и, собственно, источники всплесков. Наиболее популярными кандидатами являются молодые магнитары – нейтронные звезды со сверхсильными магнитными полями ($B > 10^{13}$ Гс). Эта идея впервые была предложена в работе [5], практически сразу после открытия первого всплеска. Сильным подтверждением данной модели послужило одновременное наблюдение радио- и рентгеновских всплесков от галактического магнитара SGR $1935 + 2154$, причем радиовсплеск представлял из себя почти полный аналог БРВ, отличающийся лишь мощностью. Скорее всего, магнитары являются источниками большинства, но, вероятно, не всех БРВ, так как наблюдались всплески в галактиках со старым звездным населением и с очень низким темпом звездообразования, где обычные каналы образования магнитаров не работают [6, 7]. Гораздо меньше ясности с механизмами излучения всплесков, который должен обеспечивать эффективное излучение громадного количества энергии в радиодиапазоне [8]. БРВ демонстрируют гигантскую яркостную температуру, $T_b > 10^{35}$ K, что однозначно указывает на когерентный механизм излучения. Всплески могут генерироваться в магнитосфере нейтронной звезды за счет излучения кривизны от сгустков заряженных частиц – этот механизм родственнен механизму излучения пульсаров [9, 10]. Частицы могут ускоряться, например, в бурных процессах пересоединения магнитного поля [11–13]. Альтернативой может служить излучение в более дальней зоне – при распространении возмущения от нейтронной звезды в туманности магнитарного ветра за счет мазерного синхротронного механизма [14–16]. Во всех этих моделях возможно и возникновение импульса на более высоких частотах, который совпадает по времени с радиовсплеском. Известно, что радиоизлучение пульсаров также имеет когерентную природу и отличается высокой яркостной температурой, но при этом на этот диапазон приходится очень малая доля полных энергетических потерь НЗ, $\eta_{\rm rad} < 10^{-5}$. Понятно, что наблюдения в других диапазонах критически важны для установления истинного механизма возникновения БРВ – детектирование в них позволит значительно ограничить круг допустимых кандидатов. Но, несмотря на громадные усилия в диапазонах от оптики до ТэВ [17–23], ни одного такого детектирования, за исключением магнитара SGR $1935 + 2154$, о котором шла речь выше, до сих пор не было. В оптическом диапазоне были достигнуты достаточно сильные ограничения на светимость $L_o < \mathcal{O}(10^3)\ L_{\rm rad}$, прежде всего для галактического источника SGR $1935 + 2154$ [24]. Ограничения для области высоких

1)e-mail: pshirkov@sai.msu.ru

энергий гораздо более слабые $L_{\gamma,x} < 10^7\ L_{\rm rad}$ [25–28], где $L_{\rm rad}, L_o, L_x, L_\gamma$ – это светимости в радио-, оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах соответственно. Обычно для получения ограничений в других диапазонах наблюдаются так называемые репитеры – источники повторных БРВ [29]. Среди них выделяется группа особенно активных репитеров, которые в пике активности могут производить до сотни всплесков в час [30]. До сих пор практически отсутствовали попытки детектировать БРВ в УФ-диапазоне, за единственным исключением, когда УФ-телескоп UVOT на борту спутника Swift наблюдал область возможного всплеска, начиная с 32-й минуты после БРВ [31]. Проблема заключается в отсутствии отдельного внеатмосферного телескопа, работающего в этом диапазоне в настоящее время.

В данной работе мы проанализировали данные наблюдений всех площадок, содержащих источники повторных БРВ, в поле обзора неба УФ-телескопа GALEX.

Мы искали короткие транзиенты продолжительностью менее 10 мс, которые могли быть проявлением вспышки в УФ-диапазоне. Отсутствие таких транзиентов позволяет сказать, что за значительное общее время экспозиции вспышек с флюэнсом в УФ выше $4.0 \times 10^{-14}$ эрг см$^{-2}$ не происходило, что соответствует отношению светимостей в УФ- и радиодиапазонах $L_{UV}/L_{\rm rad} < 10^3$ или отношению спектральных плотностей потока $F_{UV}/F_{\rm rad} < 4 \times 10^{-4}$.

**2. Данные и методы.** Телескоп GALEX наблюдал небо с 2003 по 2013 г. в двух полосах: ближний УФ (near UV, NUV, 1750–2800 Å) и дальний УФ (far UV, FUV, 1350–1750 Å). Угловое разрешение составляло величину $\sim 5''$ ($4''$ для FUV-фильтра, $5.6''$ для NUV). Апертура телескопа была равна 50 см. В работе были использованы данные этих наблюдений в обоих фильтрах. В дальнейшем был проведен анализ времени прихода индивидуальных фотонов, которые теоретически могли прийти от репитеров. Фотоны были отобраны из базы данных *gPhoton*, которая позволяет получить доступ к данным наблюдений GALEX на уровне отдельных событий – 1.1 триллиона событий с точностью определения времени прихода 5 мс [32].

В качестве кандидатов рассматривалось 47 репитеров из каталога CHIME [33], из них 29 попали в область покрытия наблюдениями GALEX (см. табл. 1).

Были отобраны фотоны из областей локализации положений репитеров. Точность определения положения источников сильно отличается – в тех случаях, когда источники дополнительно наблюдались методами радиоинтерферометрии, ошибка определения положения $\theta_{\rm err}$ была значительно меньше угловой секунды. В случаях же, когда всплески наблюдались только CHIME, величина ошибки была гораздо выше, превышая иногда угловую минуту. Мы отобрали все события, пришедшие из круга с центром в направлении на источник и радиусом $\max(15'', \theta_{\rm err})$, где первое значение примерно в три раза больше величины углового разрешения телескопа GALEX и соответствует случаю "точного" определения положения, а второе значение описывает ситуацию, в которой положение источника известно с низкой точностью и нужно анализировать значительно большую площадь и, соответственно, большее количество фотонов.

Среди отобранных событий был проведен поиск мультиплетов – нескольких событий, которые во временном окне продолжительности $\Delta t$ пришли с одного направления. Так как мы искали события, происходящие от одного источника, все события мультиплета должны были лежать внутри круга с радиусом, соответствующим угловому разрешению телескопа. Первое условие требовало существования круга радиусом, соответствующим угловому разрешению телескопа, $5''$. В качестве длины временного окна, $\Delta t$, была принята величина 10 мс, так как большая часть наблюдавшихся БРВ имела сравнимую или меньшую продолжительность, и мы ищем излучение на более высоких частотах, которое могло быть связано непосредственно с самим всплеском.

Важным вопросом является кратность искомого мультиплета, т.е. сколько событий должно наблюдаться в окне $\Delta t$, чтобы состоялось детектирование всплеска. Статистическая значимость была получена следующим образом – локальная вероятность случайного возникновения мультиплета кратности $k$ или больше из флуктуаций фона оценивалась в предположении пуассоновского распределения событий:

$$p_{lo}(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \qquad (1)$$

где $\lambda$ – это ожидаемое количество событий в круге радиусом $R_0 = 5''$, $\lambda = N_{\rm tot}\frac{A_0 \Delta t}{A_{\rm tot} t_{\rm tot}}$, $N_{\rm tot}$ – полное количество фотонов из области локализации, $A_0 = \pi R_0^2$ – площадь круга, в котором должен содержаться мультиплет, $A_{\rm tot}$ – полная площадь области локализации и $t_{\rm tot}$ – полная продолжительность наблюдений. Для получения глобальной значимости необходимо еще применить поправку Бонферрони, так как проверялось большое количество площадок $A_0$, интервалов $\Delta t$ и, собственно, областей локализации $N_{FRB}$:

$$p_{\rm glob}(k) = p_{\rm loc}(k) N_{FRB} \left(\frac{A_{\rm tot}}{A_0}\right)\left(\frac{t_{\rm tot}}{\Delta t}\right). \qquad (2)$$

**Таблица 1.** Список источников повторных БРВ, которые попадают в область наблюдений GALEX

| FRB | RA $\alpha,^\circ$ | Dec $\delta,^\circ$ | RA error, $\sigma_\alpha$, $''$ | Dec error $\sigma_\delta$, $''$ | GALEX-NUV exposure, s | Fluence, Jy ms |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20200120E | 149.47791 | 68.8169 | 0.1 | 0.1 | 14782.0 | – |
| 20240114A | 321.91598 | 4.32934 | 0.1 | 0.1 | 2823.0 | – |
| 20240209A | 289.8875 | 86.06444 | 0.1 | 0.1 | 208.0 | – |
| 20181030A | 158.58 | 73.751 | 450 | 47 | 109.0 | $8.2 \pm 5.9$ |
| 20180814A | 65.683 | 73.664 | 18 | 20 | 220.0 | $22.6 \pm 7.4$ |
| 20181119A | 190.467 | 65.117 | 25 | 29 | 105.0 | $5.4 \pm 1.5$ |
| 20190222A | 313.05 | 69.745 | 15 | 17 | 129.0 | $11.8 \pm 5.5$ |
| 20190208A | 283.529 | 46.922 | 12 | 13 | 284.0 | $2.3 \pm 0.96$ |
| 20190213B | 276.258 | 81.401 | 20 | 26 | 215.0 | $7.8 \pm 2.5$ |
| 20180908B | 188.2 | 74.173 | 38 | 51 | 3515.0 | $5.0 \pm 1.7$ |
| 20190117A | 331.658 | 17.368 | 13 | 13 | 182.0 | $9.9 \pm 4.6$ |
| 20190417A | 294.767 | 59.332 | 15 | 16 | 201.0 | $5.8 \pm 1.2$ |
| 20190907A | 122.446 | 46.379 | 40 | 36 | 142.0 | – |
| 20181226F | 95.9 | 83.8 | [828; −1116] | [1692; −576] | 622.0 | $11.3 \pm 6.1$ |
| 20190110C | 249.33 | 41.445 | 10 | 90 | 60558.0 | $2.78 \pm 0.59$ |
| 20190226B | 273.6 | 61.7 | [612; −1224] | [1476; −504] | 153.0 | $2.8 \pm 1.9$ |
| 20190915D | 11,780 | 46.86 | 30 | 20 | 194.0 | $32 \pm 10$ |
| 20191013D | 40.42 | 13.63 | 20 | 30 | 127.0 | $50 \pm 16$ |
| 20191106C | 199.58 | 43.002 | 10 | 90 | 227.0 | $2.06 \pm 0.4$ |
| 20200118D | 106.91 | 42.837 | 10 | 90 | 91.0 | $2.98 \pm 0.49$ |
| 20200127B | 119.2 | 86.609 | 10 | 80 | 303.0 | $7.7 \pm 2.8$ |
| 20200223B | 8.265 | 28.831 | 80 | 70 | 131.0 | $14.4 \pm 2.7$ |
| 20200420A | 7.57 | 37.26 | [114; −72] | [114; −216] | 1873.0 | $22 \pm 10$ |
| 20200619A | 272.6 | 55.56 | 10 | 60 | 178.0 | $3.1 \pm 1.3$ |
| 20200809E | 20 | 82.89 | 10 | 20 | 449.0 | $7 \pm 3.8$ |
| 20200913C | 269.03 | 65.8 | 60 | 30 | 180.0 | $1.6 \pm 0.36$ |
| 20200929C | 17.04 | 18.47 | 20 | 10 | 112.0 | $8.7 \pm 2.8$ |
| 20201114A | 221.59 | 71.79 | 80 | 30 | 106.0 | $4.7 \pm 2.2$ |
| 20201221B | 124.2 | 48.78 | 30 | 20 | 6765.0 | $6.4 \pm 1.6$ |

Оценки показывают, что для областей с хорошей локализацией, где ее радиус лишь в три раза превышает $R_0$, статистически значимыми являются уже триплеты. Для примера, из области локализации FRB20240114A наблюдались 1362 фотона за 2823 с, что даст оценки $\lambda = 5.3 \times 10^{-4}$, $p_{\rm loc}(3) = 2.4 \times 10^{-11}$ и $p_{\rm glob}(3) \sim 1.5 \times 10^{-3}$. Ситуация меняется для всплесков с худшей локализацией, например для FRB20181226F площадь области локализации достигает $A_{\rm tot} = 2.1 \times 10^6$ кв. угл. с, и за 2252 с наблюдалось более 6.5 миллионов фотонов. В этом случае $\lambda = 1.0 \times 10^{-3}$, $p_{\rm loc}(3) = 1.7 \times 10^{-10}$, но $p_{\rm glob}(3) \sim 20 \gg 1$. Квадруплет же остается статистически значимым, $p_{\rm loc}(4) = 4.2 \times 10^{-14}$, $p_{\rm glob}(4) = 6 \times 10^{-3}$.

**3. Результаты и обсуждение.** Ориентируясь на эти оценки, мы провели поиск квадруплетов длительностью менее 10 мс во всех наблюдавшихся областях. Все обнаруженные квадруплеты были отождествлены с известными УФ-источниками из каталога GALEX, например, парой звезд HD 91114/ HIP 51727 в области FRB20181030A. Не было обнаружено ни одного квадруплета, который мог бы быть отождествлен с сигналом от БРВ. Таким образом, мы можем поставить лишь верхние пределы на флюэнс возможных УФ-вспышек. Ненаблюдение квадруплетов позволяет утверждать, что с вероятностью 95 % не было вспышек с интегрированным потоком, который произвел бы в среднем 9 или более фотонов, пришедших на апертуру телескопа. Подставляя энергию одиночного фотона, соответствующую длине волны середины фильтра NUV (2275 Å $\leftrightarrow 8.7 \times 10^{-12}$ эрг) и апертуру $A = \pi d^2/4 \sim 2 \times 10^3$ см$^2$, можно оценить верхний предел на флюэнс.

$$E_{UV,obs} \lessapprox 4.0 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2}. \qquad (3)$$

УФ-кванты испытывают значительное поглощение в межзвездной среде, и это необходимо учесть для окончательной оценки чувствительности. Были использованы оценки поглощения на длине волны 2275 Å из [34] для 29 направлений с учетом соответствующих экспозиций. Поглощение составило $\sim 20\,\%$, т.е. отношение наблюдаемого потока $F_{obs}$ к исходному $F_0$ равно 0.8. К сожалению, это будет оценкой сверху, так как галактики, в которых происходят всплески, принадлежат к различным классам, а также неизвестно состояние непосредственных окрестностей источников всплесков. С учетом поглощения предел становится равным:

$$E_{UV,obs} \lessapprox 5.0 \times 10^{-14}\ \text{эрг}\,\text{см}^{-2}. \tag{4}$$

Эту величину нужно сравнить с величиной флюэнса в радиодиапазоне:

$$E_{\rm rad} = 6.0 \times 10^{-17}\ \text{эрг}\,\text{см}^{-2}, \tag{5}$$

принимая 10 Ян мс в качестве характерного значения интеграла плотности потока (см. табл. 1) и используя центральную частоту CHIME 600 МГц в качестве оценки спектральной ширины сигнала. Таким образом, если вспышки в УФ диапазоне с характерной продолжительностью в $\mathcal{O}(10)$ мс и происходили, то их энергия была не слишком большой, $E_{UV}/E_{\rm rad} \lessapprox 10^3$.

Отношение спектральных плотностей потока в этих диапазонах $F_{UV}/F_{\rm rad}$ ограничивается из зависимости $E_\nu \propto \nu F_\nu$:

$$F_{UV}/F_{\rm rad} < 4 \times 10^{-4}, \tag{6}$$

где за ширины полос брались центральные частоты соответствующих фильтров – $\nu_{\rm rad} = 600$ МГц, $\nu_{UV} = 1.3 \times 10^{15}$ Гц. Эти ограничения можно сравнить с аналогичными в оптическом диапазоне [20, 35–37]. Самые сильные из них были получены из совместных наблюдений репитера FRB 20180916B на телескопе Gemini-North и радиотелескопе CHIME: $F_{\rm opt}/F_{\rm rad} < 2 \times 10^{-3}$. С теоретической точки зрения, полученное отношение (6) значительно ограничивает пространство параметров моделей, где излучение на высоких частотах возникает в результате процесса обратного комптоновского рассеяния, но модели, где единый механизм ответственен за излучение во всех диапазонах, пока остаются слабо ограниченными, так как в них предсказывается очень низкий поток на частотах выше радио [38].

Очевидным слабым местом нашего подхода является неодновременность наблюдений – мы рассматриваем объекты, которые были впервые обнаружены в 2018–2024 гг., в то время как наблюдения GALEX проводились в 2003–2012. Однако пример первого обнаруженного репитера, FRB 20121102, активного до сих пор, указывает на то, что время существования на стадии репитера может составлять несколько десятков лет. Также важен вопрос о частоте всплесков – полная экспозиция GALEX в направлениях на БРВ составляла около 110 кс $\sim$ 30 ч. Эту величину можно сравнить с медианной экспозицией CHIME для всплесков из нашей выборки, $\sim 64$ ч, за которые наблюдались как минимум два всплеска.

Видно, что с современными уровнями темпа генерации БРВ, вероятность того, что за достаточно значительное время суммарной экспозиции произошел хотя бы один всплеск, велика. Также следует учесть, что темп генерации всплесков быстро растет с уменьшением их энергии: $R(>E) \sim E^{-\gamma}$, $\gamma \gtrsim 1$ [39]. Также возможно, что в прошлом темп генерации у этих источников был выше – из-за сравнительно короткой продолжительности стадии репитера [30] естественно ожидать, что темп генерации достаточно быстро спадает со временем, постепенно репитер “затухает”.

**4. Заключение.** В данной работе был впервые произведен поиск сигнала в УФ-диапазоне от быстрых радиовсплесков в данных наблюдений телескопа GALEX. Всего наблюдалось 29 областей локализации повторяющихся БРВ, полная длительность наблюдений составила 26 ч. Необнаружение сигнала позволило ограничить возможную светимость БРВ в УФ-диапазоне: $L_{UV}/L_{\rm rad} < 10^3$ и отношение спектральных плотностей потоков в двух диапазонах: $F_{UV}/F_{\rm rad} < 4 \times 10^{-4}$.

Авторы благодарны анонимным рецензентам за замечания, которые позволили значительно улучшить качество работы.

**Финансирование работы.** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука” (грант 075-15-2024-541).

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, and F. Crawford, “A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin”, Science **318**, 777 (2007).
2. J. M. Cordes and S. Chatterjee, “Fast Radio Bursts: An Extragalactic Enigma”, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **57**, 417 (2019).
3. S. B. Popov, K. A. Postnov, and M. S. Pshirkov, “Fast radio bursts”, Phys.-Uspekhi **61**, 965 (2018).
4. E. Petroff, J. W. T. Hessels, and D. R. Lorimer, “Fast radio bursts at the dawn of the 2020s”, Astron. Astrophys. Rev. **30**, 2 (2022).

5. S. B. Popov and K. A. Postnov, “Hyperflares of sgrs as an engine for millisecond extragalactic radio bursts”, arXiv e-prints, arXiv:0710.2006 (2007).
6. R. C. Zhang and B. Zhang, “The CHIME Fast Radio Burst Population Does Not Track the Star Formation History of the Universe”, ApJ **924**, L14 (2022).
7. V. Shah, K. Shin, and C. Leung, “A Repeating Fast Radio Burst Source in the Outskirts of a Quiescent Galaxy”, ApJ **979**, L21 (2025).
8. B. Zhang, “The physics of fast radio bursts”, Rev. Mod. Phys. **95**, 035005 (2023).
9. J. I. Katz, “Coherent emission in fast radio bursts”, Phys. Rev. D **89**, 103009 (2014).
10. W. Lu and P. Kumar, “On the radiation mechanism of repeating fast radio bursts”, MNRAS **477**, 2470 (2018).
11. Y. Lyubarsky, “Fast Radio Bursts from Reconnection in a Magnetar Magnetosphere”, ApJ **897**, 1 (2020).
12. M. Lyutikov and S. Popov, “Fast Radio Bursts from reconnection events in magnetar magnetospheres”, arXiv e-prints, arXiv:2005.05093 (2020).
13. P. Sharma, M. V. Barkov, and M. Lyutikov, “Relativistic coronal mass ejections from magnetars”, MNRAS **524**, 6024 (2023).
14. Y. Lyubarsky, “A model for fast extragalactic radio bursts”, MNRAS **442**, L9 (2014).
15. B. D. Metzger, B. Margalit, and L. Sironi, “Fast radio bursts as synchrotron maser emission from decelerating relativistic blast waves”, MNRAS **485**, 4091 (2019).
16. D. Khangulyan, M. V. Barkov, and S. B. Popov, “Fast Radio Bursts by High-frequency Synchrotron Maser Emission Generated at the Reverse Shock of a Powerful Magnetar Flare”, ApJ **927**, 2 (2022).
17. L. K. Hardy, V. S. Dhillon, and L. G. Spitler, “A search for optical bursts from the repeating fast radio burst FRB 121102”, MNRAS **472**, 2800 (2017).
18. MAGIC Collaboration, V. A. Acciari, and S. Ansoldi, “Constraining very-high-energy and optical emission from FRB 121102 with the MAGIC telescopes”, MNRAS **481**, 2479 (2018).
19. I. Andreoni, W. Lu, and R. M. Smith, “Zwicky Transient Facility Constraints on the Optical Emission from the Nearby Repeating FRB 180916.J0158+65”, ApJ **896**, L2 (2020).
20. C. D. Kilpatrick, J. N. Burchett, and D. O. Jones, “Deep Optical Observations Contemporaneous with Emission from the Periodic FRB 180916.J0158+65”. ApJ **907**, L3 (2021).
21. H. Abdalla, F. Aharonian, and F. Ait Benkhali, “Searching for TeV Gamma-Ray Emission from SGR 1935+2154 during Its 2020 X-Ray and Radio Bursting Phase”, ApJ **919**, 106 (2021).
22. G. Principe, L. Di Venere, and M. Negro, “Hunting for gamma-ray emission from fast radio bursts”, A&A **675**, A99 (2023).
23. L. Nicastro, C. Guidorzi, and E. Palazzi, “Multiwavelength Observations of Fast Radio Bursts”, Universe **7**, 76(2021).
24. L. Lin, C. F. Zhang, P. Wang et al. (Collaboration), “No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar”, Nature **587**, 63 (2020).
25. G. Chen, V. Ravi, and W. Lu, “The Multiwavelength Counterparts of Fast Radio Bursts”, ApJ **897**, 46 (2020).
26. B. Zhang, “Multiwavelength and Multimessenger Counterparts of Fast Radio Bursts”, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **74**, 89 (2024).
27. G. Waratkar, M. Dixit, S. P. Tendulkar, V. Bhalerao, D. Bhattacharya, and S. Vadawale, “AstroSat-CZTI searches for hard X-ray prompt emission from fast radio bursts”, Astrophys. Astron. **46**, 59 (2025).
28. S. Tyul’bashev, V. Samodurov, A. Pozanenko, E. Brylyakova, S. Grebenev, I. Chelovekov, P. Minaev, E. Isaev, and M. Barkov, “Pushchino multibeam pulsar search – V. The bright FRB 20190203 detected at 111 MHz”, Publications of the Astronomical Society of Australia **42**, e059 (2025).
29. C.-R. Hu and Y.-F. Huang, “A Comprehensive Analysis of Repeating Fast Radio Bursts”, ApJS **269**, 17 (2023).
30. S. B. Popov, “FRBs and magnetar activity statistics”, arXiv e-prints, arXiv:2308.03207 (2023).
31. A. Tohuvavohu, C. J. Law, and J. A. Kennea, “A Demonstration of Extremely Low Latency $\gamma$-ray, X-ray & UV Follow-Up of a Millisecond Radio Transient”, arXiv e-prints, arXiv:2006.04550 (2020).
32. C. Million, S. W. Fleming, and B. Shiao, “gPhoton: The GALEX Photon Data Archive”, ApJ **833**, 292 (2016).
33. CHIME/FRB Collaboration, M. Amiri, and B. C. Andersen, “The First CHIME/FRB Fast Radio Burst Catalog”, ApJS **257**, 59 (2021).
34. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, “Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD”, ApJ **737**, 103 (2011).
35. Y. Niino, M. Doi, S. Sako et al. (Collaboration), “Deep Simultaneous Limits on Optical Emission from FRB 20190520B by 24.4 fps Observations with Tomo-e Gozen”, ApJ **931**, 109 (2022).
36. D. Hiramatsu, E. Berger, B. D. Metzger, S. Gomez, A. Bieryla, I. Arcavi, D. A. Howell, R. Mckinven, and N. Tominaga, “Limits on Simultaneous and Delayed Optical Emission from Well-localized Fast Radio Bursts”, ApJ **947**, L28 (2023).
37. C. D. Kilpatrick, N. Tejos, B. C. Andersen, J. X. Prochaska, C. Nú nez, E. Fonseca, Z. Hartman, S. B. Howell, T. Seccull, and S. P. Tendulkar, “Limits on Optical Counterparts to the Repeating Fast Radio Burst 20180916B from High-speed Imaging with Gemini-North/’Alopeke”, ApJ **964**, 121 (2024).

38. Y.-P. Yang and B. Zhang, "Fast Radio Bursts and Their High-energy Counterparts from Magnetar Magnetospheres", ApJ **919**, 89 (2021).
39. F. Kirsten, O. S. Ould-Boukattine, W. Herrmann, M. P. Gawroński, J. W. T. Hessels, W. Lu, M. P. Snelders, P. Chawla, J. Yang, R. Blaauw, K. Nimmo, W. Puchalska, P. Wolak, and R. van Ruiten, "A link between repeating and non-repeating fast radio bursts through their energy distributions", Nat. Astron. **8**, 337 (2024).