

На правах рукописи



Федорова Виктория Александровна

**ОБНАРУЖЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОРАДИЧЕСКИХ
ВСПЛЕСКОВ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия
(физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Филиале «Пушкинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича ФИАН» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Академии наук РФ (ПРАО ФИАН)

Научный руководитель:

РОДИН Александр Евгеньевич
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Филиала «Пушкинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича ФИАН» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Академии наук РФ (ПРАО ФИАН)

Официальные оппоненты:

МИНГАЛИЕВ Марат Габдуллович
доктор физико-математических наук,
руководитель научно-исследовательской лаборатории, заместитель директора САО РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук» (ФГБУН САО РАН)

ПОЗАНЕНКО Алексей Степанович
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук» (ФГБУН ИКИ РАН)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук» (ФГБУН КрАО РАН)

Защита состоится «27» октября 2023 г. в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.021.01 Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, ГАО РАН, Пулковское шоссе 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН

http://www.gaoran.ru/wpcontent/uploads/2023/08/Dissertatsia_Fyodorova_V_A.pdf

Автореферат разослан «27 » сентября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.021.01
кандидат физико-математических наук

А. А. Осипова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В данный момент исследование быстрых радиовсплесков (FRB - fast radio burst) является одной из наиболее актуальных тем в астрофизике. Со времени открытия быстрых радиовсплесков в 2007 году прошло уже много лет, но до сих пор нет достаточно полной статистики по их свойствам, не проводилось детальное сравнение их характеристик на разных частотах. Данная работа призвана частично восполнить этот пробел.

После обнаружения галактического радиовсплеска в виде мощнейшей вспышки от магнетара SGR 1935+2154 механизм их возникновения более-менее определился, но, тем не менее, остаются и другие теории возникновения радиовсплесков, количество которых на момент написания диссертации составляет несколько десятков. Целый ряд моделей генерации быстрых радиовсплесков показывает, что наблюдения импульсов возможны как на низких, так и на высоких частотах (например взаимодействие компактных объектов в тесной двойной системе или при наблюдении мощных вспышек от магнетара). Другие модели напротив описывают возможность наблюдения импульсов либо на высоких частотах (если, например, предположить, что FRB представляет собой послесвечение при слиянии массивных компактных объектов), либо только на низких (например, при радиальном излучении темной материи от молодой черной дыры).

Возможность исследовать импульсы на низких частотах трудно переоценить, поскольку это дает возможность более полно представить картину данного явления. Наблюдения одного и того же события на разных частотах позволяют вычислить спектральный индекс между этими частотами. Также возможность наблюдений импульсов как на высоких, так и на низких частотах позволяет сузить диапазон моделей, описывающих механизмы возникновения быстрых радиовсплесков. Ежедневный мониторинг большого участка неба с помощью высокочувствительного радиотелескопа БСА ФИАН позволяет накапливать огромную статистику по быстрым радиовсплескам, а также позволяет анализировать свойства межгалактической среды и распределение в ней вещества. Кроме того, существует мнение, что быстрые радиовсплески не имеют выделенных направлений. Обзор доступной для БСА части неба поможет частично дать более точный ответ в этом вопросе.

Цели и задачи исследования

Основной задачей работы являлось обнаружение с помощью специально разработанного метода быстрых радиовсплесков и измерение их характеристик.

Измеренные характеристики сравнивались с характеристиками на частоте 1400 МГц. На основании сравнительного анализа параметров обнаруженных быстрых радиовсплесков на различных частотах делаются выводы о свойствах межгалактической среды в широком диапазоне красных смещений z и мер дисперсий DM.

Также целью настоящей работы являлось регистрация радиоизлучения от магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц и измерение его характеристик.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 134 страницы, включая список литературы из 156 библиографических ссылок, 43 рисунка и 5 таблиц.

Содержание работы

Введение содержит описание и современное состояние проблемы наблюдений спорадических всплесков космического радиоизлучения в различных диапазонах. Дано определение быстрых радиовсплесков и описана проблема их наблюдения. Описаны этапы развития наблюдений и исследований быстрых радиовсплесков на различных радиотелескопах. Сделан обзор литературы по данной тематике.

Начало исследованиям импульсного излучения космических радиоисточников впервые было положено после открытия Э. Хьюишем пульсаров в 1967 году [1]. В настоящее время в пульсарный каталог занесено почти 3 000 пульсаров, которые обладают уникальными характеристиками и делятся на два больших класса: различают пульсары секундные, период которых 0.1 с и более, и миллисекундные. Существует отдельная категория объектов с мощным магнитным полем $10^{13} - 10^{15}$ Гс – магнетары, которых в данный момент в Галактике открыто более 30. Пульсары и магнетары широко используются в различных астрофизических и астрометрических исследованиях: для построения высокоточной пульсарной шкалы времени и космической навигации, в качестве космических зондов для исследования межзвездной среды [2 – 5].

Для наблюдений пульсаров и магнетаров необходимы очень чувствительные инструменты, к которым относится Большая Синфазная антенна Физического института им. П.Н. Лебедева (БСА ФИАН) Пушинской радиоастрономической обсерватории. Это фазированная решетка, состоящая из 16 384 волновых диполей, равномерно расположенных на участке 200 x 400 м. Радиотелескоп является самым чувствительным в мире на частоте 111 МГц. Его мгновенная чувствительность составляет 140 мЯн при постоянной интеграции $\tau = 0.1$ с

и полосой 2.5 МГц. Инструмент обладает широким полем зрения, благодаря которому производится ежедневный мониторинг большого участка неба. Рабочий диапазон частот 109 – 111.5 МГц. Отличительной особенностью телескопа является наличие стационарной (ДН-3), имеющей 128 лучей, и нестационарной (ДН-1) диаграмм направленности. ДН-3 используется для ежедневного непрерывного мониторинга источников, ориентирована в плоскости меридиана и перекрывает участок неба в полосе от -8.20° до $+55.5^\circ$ по склонению. Вторая нестационарная диаграмма используется в основном для наблюдений пульсаров [6].

В 2007 году в радиоастрономии выделился новый отдельный класс импульсных источников – это быстрые радиовсплески – внегалактические импульсы миллисекундной длительности [7]. К низким частотам яркость радиовсплесков падает, но чувствительность БСА ФИАН позволяет регистрировать даже такие слабые импульсы.

Первый радиовсплеск был зарегистрирован в ходе пульсарного обзора неба. Длительность импульса не превышала 5 мс, пиковая плотность потока составила 30 Ян на частоте 1.4 ГГц, оценка меры дисперсии 375 ± 1 пк/см⁻³. Яркостная температура импульса оценивается как $\sim 10^{34} (D_{500}/W_5)^2$ К. При этом энергосодержание $\sim 10^{33} W_5 D_{500}^2$ Дж, где расстояние $D_{500} = D/500$ Мпк, ширина импульса $W_5 = W_{int}/5$ мс. С учетом отсутствия события одновременно в оптическом диапазоне, было показано, что источник явления, при котором возник импульс, находился на расстоянии от 600 Мпк до 1 Гпк. После 90 часов дополнительных наблюдений не было получено ни одного импульса. Этот факт, а также оценка энергосодержания, позволили сделать вывод о том, что новое явление возникло в результате единичного катастрофического события. Первый импульс получил название FRB010724 (FRB YYMMDD). В дальнейшем такая аббревиатура стала использоваться для всех быстрых радиовсплесков.

Работа по поиску быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН ведется с конца 2017 года. На данный момент с помощью этого инструмента в результате анализа более 50 000 часов наблюдений было обнаружено 62 события FRB, что является абсолютным рекордом среди низкочастотных наблюдений [8, 9]. Анализ архивных данных продолжается и по сей день.

К 2020 году была накоплена достаточная статистика по событиям как на низкой, так и на высокой частоте. В результате этого был проведен сравнительный анализ быстрых радиовсплесков, обнаруженных на частоте 111 и 1400 МГц. Результатом анализа стал тот факт, что свойства импульсов, зарегистрированных на низких частотах, аналогичны свойствам импульсов, обнаруженных на частоте 1400 МГц [10].

По сей день остается актуальной проблема механизма возникновения быстрых радиовсплесков. Частично этот вопрос удалось снять после регистрации мощной вспышки от галактического магнетара SGR1935+2154 в конце апреля 2020 года с помощью инструмента STARE2 [11]. Флюэнс вспышки составил $> 1.5 \text{ МЯн} \cdot \text{мс}$. Этот факт позволил утверждать, что явления подобного рода хорошо вписываются в модели, описывающие быстрые радиовсплески [7, 12].

Дальнейшие наблюдения магнетара SGR1935+2154 в период активности на различных частотах позволили составить наиболее полную картину об этом объекте. Следует отметить, что импульсы от SGR1935+2154 были зарегистрированы и на БСА ФИАН. Результаты наблюдений приводятся в Главе 4 данной диссертации [13, 14].

Отдельно хочется выделить, что в работе приводятся и анализируются только наблюдательные результаты, которые, в данном случае, не связываются с теоретическими моделями, предложенными различными авторами.

Первая глава посвящена математическому моделированию и методике обработки данных.

Выделение слабых сигналов типа FRB на фоне шумов – это отдельная сложная задача. Применение имеющихся методик при более ранних анализах данных радиотелескопа БСА ФИАН не дало положительных результатов. Поэтому необходимо было создать новый метод поиска крайне слабых импульсов. Трудностей добавляет и тот факт, что основной задачей работы являлся поиск быстрых радиовсплесков в широком диапазоне мер дисперсий. Следовательно, в ходе обработки данных необходимо делать перебор этих значений в заданном диапазоне, что сказывается на времени обработки данных. Кроме того, необходимо учитывать все эффекты, сказывающиеся на импульсном сигнале в ходе его регистрации антенной. К таким эффектам можно отнести рассеяние в межзвездной и межгалактической среде, уширение в частотных каналах. Поэтому на начальном этапе работы было принято решение найти оптимальный вариант анализа данных с радиотелескопа БСА ФИАН с временным разрешением 0.1 с.

Таким образом, с учетом всех особенностей слабых сигналов и наблюдения их в метровом диапазоне в ходе работы было проделано моделирование обнаружения искомого импульса с дальнейшей проверкой алгоритма поиска быстрых радиовсплесков на известных объектах.

Математическое моделирование обнаружения импульсного сигнала включало в себя несколько этапов. Так как импульсный сигнал при распространении в межзвездной среде испытывает рассеяние на неоднородностях среды. В данном случае, параметры модели рассеяния

импульсного сигнала зависят от меры дисперсии DM , центральной частоты приема и ширины канала. Зависимость величины рассеяния импульса пульсара от меры дисперсии DM на частоте 110 МГц $t_s = 0.06(DM)(100)^{2.2}$ [15]. Для моделирования сигнала была сгенерирована последовательность из 3000 точек, что с учетом интервала выборки $\Delta t = 0.1$ с в среднем соответствует 5 минутам прохождения наблюдаемого источника через диаграмму направленности БСА.

Если принять модель тонкого экрана, то импульсная характеристика рассеивающей среды описывается затухающей экспонентой

$$h = \frac{1}{t_s} e^{-\frac{t}{t_s}}, \quad (1)$$

где t_s – характерная ширина импульса на высоте $1/e$.

Принимаемый импульс определяется сверткой излученного импульса, который можно представить в виде дельта-функции, с передаточной функцией среды.

$$F(t) = \frac{1}{t_s} \int e^{-\frac{t}{t_s}} \delta(t - \tau) d\tau = \frac{1}{t_s} e^{-\frac{t}{t_s}}, \quad (2)$$

где t – время прихода сигнала на отдельный частотный канал. Для моделирования была использована величина $DM = 360$ пк/см³, которая дает значение $t_s = 1$ с.

Принимаемый импульс, который в дополнение к рассеянию испытывает дисперсионное запаздывание в среде распространения, принимается в конечной полосе частот, что приводит к его уширению, которое также можно записать в виде свертки принятого импульса $F(t)$ с Π -образной функцией, которая представлена в виде произведения двух функций $\sigma(t)$ – функций Хевисайда (функция единичного скачка):

$$\Pi(t) = \sigma(t - \tau_{i-1}) \sigma(\tau_{i-t}) \quad (3)$$

где τ_i – время прихода на граничной частоте i -го частотного канала. Величина $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$, ($i = 1, 2, 3, \dots, 6$) – уширение импульса в полосе.

Величины уширения импульсов пульсаров в полосе $\Delta\tau$ и рассеяния t_s по-разному зависят от DM : $\sim DM$ и $\sim DM^{2.2}$, соответственно, $\Delta\tau = t_s$ при $DM \approx 320$ пк/см³. Поэтому для $DM \leq 320$ пк/см³ главный вклад в размывание импульса вносит уширение в полосе, а для $DM \geq 320$ пк/см³ – рассеяние в среде.

В качестве проверки корректной работы программы для определения событий FRB весь разработанный алгоритм был протестирован на двух вариантах предполагаемых импульсов: на часовую запись БСА ФИАН накладывались модели искомым сигналов с $DM = 360$ пк/см³ и $DM = 2000$

пк/см³. Также проверка была проведена и на реальном объекте – пульсаре B2154+40 с периодом 1.5253 с и мерой дисперсии 78 ПК/см³. Во всех случаях используемый метод позволил уверенно выделить импульсный сигнал.

Методика поисков событий FRB заключалась в анализе ежедневных записей шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с в лучах, направление которых совпадает с тем или иным интересующим участком неба. Затем вносились поправки, учитывающие отклонение лучей диаграммы направленности БСА ФИАН от плоскости небесного меридиана и прецессию. Далее из часовой записи выбирался пятиминутный участок с интересующими координатами. Следующим шагом была свертка записи в каждом луче с шаблоном, полученным в рамках моделирования, и свертка с пробной мерой дисперсии в диапазоне от 0 ПК/см³ до 3000 ПК/см³ с шагом 60. Значение меры дисперсии DM определялось вписыванием полинома в максимум зависимости $SNR(DM)$.

Так как быстрые радиовсплески из-за значительного рассеяния и уширения на частоте 111 МГц представляют собой слабые одиночные импульсы, то без использования дополнительной методики выделения сигнала напрямую их регистрация не представляется возможной. Используемый метод свертки с шаблоном согласованной формы позволяет выделить импульс на фоне шумов.

Глава вторая описывает поиск быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц с помощью разработанной методики.

Поиск быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц на радиотелескопе БСА ФИАН осуществлялся в несколько этапов. На этапе отладки программы обработки данных был проанализирован участок записи во втором луче диаграммы БСА. На следующем этапе был проанализирован участок неба с повторяющимся FRB 121102, $\alpha = 05^{\text{h}}32^{\text{m}} \pm 10^{\text{m}}$; $\delta = +33.25^\circ$, $DM = 557$ ПК/см³. В общей сложности в период с июль 2012 г. по май 2018 г. (355 часов наблюдений в каждом луче) зарегистрировано три кандидата в быстрые радиовсплески с мерами дисперсии 247 ПК/см³, 570 ПК/см³, 1767 ПК/см³ [8].

Далее был проведен поиск импульсов в направлении галактик M31 и M33 в период с июля 2012 года по август 2018 года. Всего проанализировано 6 930 часов наблюдений. В архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН в период с июля 2012 г. по август 2018 г. обнаружено три быстрых радиовсплеска в направлении галактики M33, два из которых, предположительно возникли в одной и той же области неба и, таким образом, являются повторяющимися. В этот же период в направлении галактики M31 обнаружено пять быстрых радиовсплесков с различной мерой дисперсии. Оценка меры дисперсии обнаруженных показывает, что источники всех зарегистрированных событий находятся гораздо дальше, чем галактики M31 и M33 [9].

На последнем этапе проводился поиск быстрых радиовсплесков по всей доступной области неба для наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН. Поскольку большой объем данных требует значительных технических и временных ресурсов, работа в рамках этого этапа будет проводиться еще продолжительное время. Первые результаты были получены при обработке участка неба в площадке $\delta = 21.38^\circ - 41.72^\circ$ и $\alpha = 11^{\text{h}}45^{\text{m}} - 12^{\text{h}}45^{\text{m}}$. В период с января по июнь 2018 года было обработано более 50 000 часов наблюдений. На данном этапе работы было обнаружено 51 событие в широком диапазоне мер дисперсии DM [10].

Таким образом, за весь период поиска быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН было обнаружено 62 новых быстрых радиовсплеска, один из которых повторяющийся.

Кроме того, в данной главе приведена оценка вероятности случайного выстраивания шумов в динамический спектр, аналогичный динамическому спектру быстрых радиовсплесков. Вероятность случайного появления диспергированного сигнала равна $P < 1.92 \cdot 10^{-12}$. Если учитывать отношение сигнал/помеха, то это снизит вероятность P еще на несколько порядков.

Если рассмотреть случай одноканального приемника и классическое пороговое обнаружение, то окажется, что верхней оценке вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}} = 10^{-12}$ соответствует отношение сигнал/шум $C/\text{Ш} \approx 7$ и 25 для распределений шума по Гауссу и по Лапласу соответственно, и с точки зрения самих величин они являются достоверными.

Глава три посвящена сравнительному анализу быстрых радиовсплесков, обнаруженных на частоте 111 и 1400 МГц.

Сравнение двух распределений DM на 111 и 1400 МГц показало, что оба они описываются логнормальным распределением с параметрами $\mu = 6.1 - 6.2$, $\sigma = 0.7$ и, таким образом, на статистически значимом уровне совпадают и соответствуют диапазону характерных величин $DM = 252 - 954$ пк/см³ [10].

$$P(x) = \frac{\exp\left(-\frac{(\mu + \ln x)^2}{2\sigma^2}\right)}{x\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (4)$$

Рассеяние импульсов на неоднородностях среды представляет собой важный инструмент для исследования свойств как межзвездной, так и межгалактической среды, а на роль источников импульсного излучения наиболее подходят пульсары.

Достаточно подробно изучен вопрос, связанный с механизмом рассеяния излучения. На данный момент подробно описаны все факторы, приводящие к многолучевому распространению сигнала, а также показана теоретическая

зависимость между уширением импульса, частотой декорреляции и мерой дисперсии.

Некоторые авторы в своих работах рассматривают рассеяние быстрых радиовсплесков на межгалактической среде на больших космологических расстояниях, поскольку среднее расстояние до области возникновения импульса 400 – 500 Мпк. Оценка вклада вещества нашей Галактики примерно в два раза выше, чем давалась в более ранних работах, за счет вклада гало Галактики на уровне $DM_{\text{halo}} \approx 30$ пк/см³.

В диссертации сделаны минимально необходимые допущения, что хотя межгалактическое вещество является неоднородным, но в сравнении с вкладом в рассеяние импульсов от вещества нашей и, возможно, родительской галактики вкладом межгалактического вещества в рассеяние можно пренебречь и считать его в первом приближении однородным.

Данный раздел диссертации направлен на исследование эффектов, возникающих в межгалактической среде. Для этих целей в полной мере подходят такие импульсные источники как радиовсплески, которые в настоящее время являются единственным средством для изучения межгалактических эффектов распространения.

В работе построен график зависимости ширины импульсов τ_{sc} от меры дисперсии DM вместе с зависимостью для пульсаров, приведенной в статье Кузьмина и соавторов 2007 года [15].

Для быстрых радиовсплесков степенная зависимость является более слабой в сравнении с зависимостью для пульсаров: если для пульсаров, наблюдаемых на частоте 111 МГц, авторы статьи, указанной выше, определяют показатель степени $k = 2.2 \pm 0.1$, то для быстрых радиовсплесков, зарегистрированных также на частоте 111 МГц, приводится формула $\tau_{\text{sc}}(DM) = 20.2 DM^{0.49 \pm 0.18}$ мс.

Зависимость $\tau_{\text{sc}}(DM)$ была построена и для быстрых радиовсплесков на частоте 1.4 ГГц из каталога FRB [16]. Показатель степени $k = 0.43 \pm 0.15$ в зависимости $\tau_{\text{sc}}(DM)^k$ в пределах погрешности совпадает с показателем k в зависимости $\tau_{\text{sc}}(DM)$ для импульсов на 111 МГц.

Основное рассеяние происходит в родительской и нашей галактике, а межгалактическая среда на пути распространения является разреженной и не оказывает существенного влияния на величину рассеяния импульсов, несмотря на большие величины DM . Следует подчеркнуть, что рассеяние в межгалактической среде не отменяется и им можно пренебречь. Величина показателя степени k в экспериментальной зависимости $\tau_{\text{sc}}(DM)$ определяется положением рассеивающего экрана вдоль линии "источник-наблюдатель". Положение рассеивающего экрана ассоциируется с границей нашей или родительской галактики, где направление распространения импульса

отклоняется от первоначального. При таком подходе, так как при исследовании зависимости $\tau_{sc}(DM)$ мы имеем дело с веществом на луче зрения, расстояние

удобно измерять в единицах $DM = \int_0^L n_e dl$. Очевидно, что так как концентрация

вещества n_e в галактической и межгалактической среде существенно различается, то зависимость $DM(L)$ не будет линейной.

Разделим измеренную меру дисперсии радиовсплеска DM на следующие компоненты:

$$DM = DM_{MW} + DM_{halo} + DM_{EG} + \frac{DM_{host}}{1+z}, \quad (5)$$

где DM_{MW} – вклад вещества Галактики, который моделируется на основании

наблюдений пульсаров. Оставшаяся сумма $DM_{halo} + DM_{EG} + \frac{DM_{host}}{1+z}$ – это

вклад вещества гало DM_{halo} нашей Галактики, DM_{EG} – вклад внегалактического

вещества, $\frac{DM_{host}}{1+z}$ – вклад вещества родительской галактики, z – её красное

смещение. Из всех этих величин хорошо известны только DM и DM_{MW} . Для гало, как уже упоминалось ранее, известна оценка $DM_{halo} \approx 30$ пк/см³.

Для характерной величины $DM_{MW} \sim 45$ пк/см³, соответствующей максимуму логнормального распределения, получаем, что суммарный вклад вещества родительской и гало нашей Галактики в меру дисперсии составляет величину

$DM_{halo} + \frac{DM_{host}}{1+z} \sim 60$ пк/см³, что соответствует принятой в настоящее время

величине $DM_{halo} \sim 30$ пк/см³ при условии равенства вклада вещества гало нашей и вещества родительской галактики.

В работе приведен график зависимости $\text{Log } N - \text{Log } F$, построенный по наблюдениям на разных частотах. Анализ зависимостей $\text{Log } N - \text{Log } F$ на двух частотах показывает, что в целом эти зависимости соответствуют друг другу и ни одна из них не следует в точности закону $F^{-3/2}$. Если предположить, что наблюдаемые выборки импульсов статистически эквивалентны, то можно вывести их среднестатистический спектральный индекс, который равен $\alpha = -0.63 \pm 0.20$.

В главе четыре приводятся результаты поиска импульсов от галактического магнетара SGR 1935+2154.

В радиодиапазоне магетары проявляют себя крайне слабо или просто не видны. На БСА ФИАН неоднократно принимались попытки отнаблюдать те или иные источники. После проявления активности SGR 1935+2154 было

принято решение просмотреть архивные данные радиотелескопа БСА ФИАН на предмет поиска импульсного излучения этого источника.

28 апреля 2020 года команда канадских исследователей сообщает о том, что на радиотелескопе CHIME/FRB на частоте 400 МГц впервые в радиодиапазоне зарегистрировано излучение от магнетара SGR 1935+2154 [17]. Всплеск был зарегистрирован в нескольких лучах антенны. В результате анализа сигнала было установлено, что он имел двухкомпонентную структуру по 5 мс, разделенную временным интервалом в 30 мс. Впервые была дана оценка меры дисперсии всплесков $DM = 332.8$ пк/см³. Независимо от CHIME/FRB системой радиотелескопов STARE2 был зарегистрирован сигнал от магнетара на частоте 1.4 ГГц [11]. Оценка меры дисперсии сигнала DM в пределах погрешности совпала с ранее опубликованной, но оценка флюэнса оказалась более 1.5 МЯн · мс. Этот факт позволил сделать предположение о том, что подобная вспышка является галактическим радиовсплеском.

После этих событий были продолжены наблюдения на различных радиотелескопах в диапазоне частот от 109 МГц до 22 ГГц.

Магнетар SGR 2135+1954 имеет координаты $\alpha_{2000} = 19:34:55.68$ и $\delta_{2000} = +21:53:48.2$. Чувствительность антенны БСА ФИАН позволяет наблюдать такие слабые источники. Поэтому было принято решение провести мониторинг магнетара, а также просмотреть архивные данные БСА ФИАН с 1 сентября 2019 года по 12 февраля 2021 года. Из часовой записи выбирался участок, соответствующий прохождению источника через диаграмму направленности БСА. Ежедневно источник находился ~3.5 мин в поле зрения радиотелескопа. Всего проанализировано около 32 часов наблюдений. За этот период был зарегистрирован импульс 2.09.2020 г [14, 18].

Для наилучшего выделения сигнала на фоне шумов, при обработке данных к участку записи применялась методика, описанная в Главе 2. Параметры импульса: мера дисперсии $DM = 320 \pm 10$ пк/см³, плотность потока на частоте 111 МГц 140 мЯн, отношение сигнал/шум ~ 6.6, значение флюэнса 300 Ян · мс.

Полученная мера дисперсии $DM = 320 \pm 10$ пк/см³ согласуется с ранее полученными результатами и попадает в диапазон значений измерений на других инструментах от 316 пк/см³ до 380.1 пк/см³.

Таким образом, в ходе ежедневного анализа архивных данных галактического магнетара SGR 1935+2154 на радиотелескопе БСА ФИАН за 32 часа наблюдений 2.09.2019 был обнаружен единичный импульс. Все параметры в пределах погрешности соответствуют параметрам, полученным в ходе наблюдения источника на других инструментах в широком диапазоне частот. Полученные характеристики импульса от галактического магнетара SGR

1935+2154 хорошо вписываются в рамки теоретических моделей, рассматривающих механизмы генерации быстрых радиовсплесков.

Заключение содержит основные результаты, полученные в рамках данной работы.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Разработан метод на основе согласованных фильтров для обнаружения импульсных сигналов.
2. Впервые обнаружено 62 быстрых радиовсплеска на частоте 111 МГц. Определены их параметры.
3. Показано, что по ряду свойств спорадические импульсы на 111 МГц не отличаются от быстрых радиовсплесков на более высоких частотах.
4. Измерен средний спектральный индекс по радиовсплескам, обнаруженным на 111 МГц, в сравнении с импульсами на 1400 МГц.
5. Путем сравнения ширины импульсов на 111 и 1400 МГц показано, что зависимость ширины от частоты подчиняется закону $\tau \sim f^2$, и, таким образом, если интерпретировать ширину импульсов как рассеяние в среде, то свойства межгалактической среды принципиально отличаются от свойств межзвездной среды.
6. Обнаружено импульсное излучение от магнетара SGR 1935+2154, измерены его параметры на 111 МГц.

Личный вклад

Во всех основных результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным или равным вкладу соавторов. А именно:

1. В работах [A1 – A6] вклад диссертанта в написание текста статей является определяющим или равным вкладу соавторов.
2. В работе [A1] вклад диссертанта по моделированию различных методов обнаружения одиночных импульсных сигналов является равным вкладу соавтора.
3. В работах [A1 – A6] вклад диссертанта в обработку большого массива данных радиотелескопа БСА ФИАН (около 600 000 отдельных сканов) и поиск в них импульсных радиоисточников является определяющим.
4. В работах [A1 – A6] вклад диссертанта в измерение характеристик обнаруженных импульсов является определяющим.
5. В работе [A4] вклад диссертанта в построение экспериментальных зависимостей: распределение по мере дисперсии, зависимость рассеяния от меры дисперсии, зависимость $\text{Log } N - \text{Log } F$ является равным вкладу соавтора.

6. В работах [A1 – A6] вклад диссертанта в обнаружение магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц и измерение его параметров является определяющим.

Апробация результатов

1. Фёдорова В.А., «FRBs: поиск вариаций низкочастотного радиоизлучения из соответствующих участков неба», Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA — 2016) (Москва, 20 — 23 декабря 2016 г.).
2. Фёдорова В.А., Родин А.Е., Дагкесаманский Р.Д., Самодуров В.А., Логвиненко С.В., «Обнаружение быстрых радиовсплесков (FRB) на радиотелескопе БСА ФИАН», XXXV Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», (Пушино, 24 — 27 апреля 2018г.).
3. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Метод поиска и обнаружение FRBs на радиотелескопе БСА ФИАН», Всероссийская Радиоастрономическая конференция (ВРК — 2018), (Санкт-Петербург, 17 — 21 сентября 2018г.);
4. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Поиск быстрых радиовсплесков в галактиках М 31 и М33», Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2018 (HEA — 2018), (Москва, 18 — 21 декабря 2018).
5. Родин А.Е., Фёдорова В.А., «Обнаружение быстрых радиовсплесков на БСА ФИАН», Сессия АКЦ, (Пушино, 6 марта 2019).
6. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33», XVI Конференция молодых ученых (Москва, 15 — 17 апреля 2019г.).
7. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН», XXXVI Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии» (Пушино, 24 — 26 апреля 2019).
8. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Измерение рассеяния быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц», Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2019 (HEA — 2019), (Москва, 17 — 20 декабря, 2019г.).
9. Fedorova V.A., Rodin A.E., «Comparative analysis of observational properties of fast radio bursts at frequencies 111 and 1400 MHz», FRB2021, (online conference, July 28 — August 5, 2021).
10. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Исследование быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА/ФИАН», Всероссийская Астрономическая конференция (ВАК-2021), (online, 23 — 28 августа, 2021г.).

11. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Исследование быстрых радиовсплесков на 111 и 1400 МГц», Конференция, посвященная 90-летию Николая Семёновича Кардашёва «Вселенная: от большого взрыва до наших дней» (Москва, 25-26 апреля 2022 г.).
12. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение и исследование быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц», Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2022), (Санкт-Петербург, 19 — 23 сентября 2022 г.).

Научная новизна

В диссертации получен ряд принципиально новых результатов. Во-первых, разработан алгоритм для поиска быстрых радиовсплесков на низких частотах, с помощью которого слабые импульсы выделяются на фоне шумов. Во-вторых, в несколько этапов проведен поиск быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц. В результате работы было зарегистрировано более 60 импульсов и составлен каталог импульсов на 111 МГц. Обнаружение импульсов на столь низкой частоте также является результатом, полученным впервые. В-третьих, впервые проведен сравнительный анализ радиовсплесков, зарегистрированных на частоте 111 и 1400 МГц, в ходе которого были получены новые результаты о свойствах межгалактической среды. В-четвертых, по измерениям флюэнса на частотах 111 и 1400 МГц впервые измерен средний по популяции спектральный индекс быстрых радиовсплесков.

В-пятых, впервые на частоте 111 МГц было зарегистрировано импульсное излучение от магнетара SGR 1935+2154, в период активности которого были зарегистрированы сигналы, по мощности аналогичные быстрым радиовсплескам.

Достоверность результатов

Представленные в работе результаты получены с использованием как ранее разработанных методов, так и с помощью новых алгоритмов. Кроме того, для всех оценок параметров быстрых радиовсплесков на 111 МГц даны оценки погрешностей, которые приведены в Главе 3. В качестве независимого подтверждения достоверности результатов посчитана вероятность случайного выстраивания шумовых вариаций в динамический спектр, которая для отдельно анализируемого скана даже без учета отношения «сигнал/помеха» оказалась равной $P \sim 10^{-12}$, что на практике является исчезающе малой величиной. Таким образом, все приведенные в работе спорадические импульсы являются не случайными.

Практическая значимость

В настоящее время на опубликованные по результатам работы статьи имеется 37 ссылок (с учетом Астрономических телеграмм 41), в том числе в ведущих зарубежных журналах. Часть обнаруженных импульсов уже внесена в каталог FRB (FRBSTATS: Catalogue). Полученные результаты при анализе быстрых радиовсплесков, зарегистрированных на 111 МГц, в первую очередь применимы к исследованиям свойств межгалактической среды. Также как уже отмечалось выше, сам факт обнаружения быстрых радиовсплесков на столь низкой частоте позволяет отбросить часть моделей, которые запрещают появление импульсного излучения на 111 МГц, например, таких как слияние белого карлика или нейтронной звезды и черной дыры. Поиск импульсов по всему доступному участку неба позволит на практике подтвердить изотропность появления быстрых радиовсплесков на небе.

Публикации по теме диссертации

[A1] Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН», Астрономический журнал, т. 96, № 1, стр.41 - 50, 2019.

[A2] Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Поиск и обнаружение быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33», Краткие сообщения по физике, т. 46, № 9, стр. 38 - 42, 2019.

[A3] Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33», Астрономический журнал, т. 96, № 11, стр. 883 - 897, 2019.

[A4] Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Сравнительный анализ наблюдательных свойств быстрых радиовсплесков на частотах 111 и 1 400 МГц», Астрономический журнал, т. 98, № 10, стр. 804 - 833, 2021.

[A5] Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Поиск импульсного излучения от магнетара SGR 1935+2154», Краткие сообщения по физике, т. 48, № 10, стр. 37 - 42, 2021.

[A6] Родин А.Е., Фёдорова В.А., «Обнаружение периодического излучения от магнетара SGR 1935+2154», Астрономический журнал, т. 99, № 1, стр. 37 - 42, 2022.

Благодарности

В заключении Фёдорова В.А. выражает искреннюю признательность научному руководителю к.ф.-м.н. Родину А. Е. за постановку задачи, общее руководство, поддержку и внимание к деталям. Отдельную благодарность диссертант выражает директору ФИАН Колачевскому Н.Н., заместителю

директора Иванову О.В., учёному секретарю ФИАН Колобову А.В., а также другим сотрудникам ФИАН: Леонидову А.В., Нечитайло В.А., Бескину В.С. за независимую проверку и оценку полученных результатов. Глубокую искреннюю благодарность диссертант выражает Ковалёву Ю.А. (АКЦ ФИАН) за его рецензию и, главное, доброе отношение к работе, которое позволило изменить ход событий. Автор выражает благодарность уважаемым официальным оппонентам Мингалиеву М.Г. (САО РАН) и Позаненко А.С. (ИКИ РАН). Фёдорова В.А. благодарит Крымскую астрофизическую обсерваторию за согласие быть ведущей организацией. Диссертант благодарит Диссертационный совет в лице Степанова А.В. (ГАО РАН) за согласие принять работу к защите. Фёдорова В.А. выражает искреннюю благодарность сотруднику Астрокосмического центра ФИАН Согласнову В.А. за независимую рецензию на диссертацию, сотрудникам Института космических исследований РАН Бисноватому-Когану Г.С. с коллегами за ценные рекомендации по улучшению диссертационной работы. Фёдорова В. А. благодарит Гершберга Р.Е. (КрАО РАН) за ценные рекомендации и проявленный интерес к диссертационной работе.

Список литературы

- [1] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins, Observation of rapidly pulsating radio source // *Nature*. – 1968. – Vol.217. – Is. 5130. – p. 709.
- [2] A. E. Rodin, V. A. Fedorova, A Pulsar Time Scale Based on Parkes Observations in 1995-2010 // *Astronomy Reports*. – 2018. – Vol.62. – Is. 6. – p. 378.
- [3] A. E. Rodin, V. V. Oreshko, V. A. Potapov, M. S. Pshirkov, M. V. Sazhin, Principles of Pulsar Space Navigation // *Astronomy Reports*. – 2020. – Vol.64. – Is. 6. – p. 499.
- [4] M. V. Barkov, M. Lyutikov, D. Khangulyan, Fast moving pulsars as probes of interstellar medium // *MNRAS*. – 2020. – Vol. 497. – Is. 3 – p.2605.
- [5] H. Stairs, Binary pulsars and tests of general relativity // *Relativity in Fundamental Astronomy*. – 2010. – Vol. 261. – p. 218.
- [6] В. В. Орешко, Г. А. Латышев, И. А. Алексеев и др., Новая многолучевая диаграмма направленности радиотелескопа БСА ФИАН // *Труды ИПА*. – 2012. – Т. 24. – с. 80.
- [7] D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, F. Crawford, A bright millisecond radio burst of extragalactic origin // *Science*. – 2007. – Vol. 318. – Is. 5851. – p. 777.
- [8] В. А. Фёдорова, А. Е. Родин, Обнаружение быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96. – № 1. – с. 41.

- [9] В. А. Фёдорова, А. Е. Родин, Поиск быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33 // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т.96. – № 11. – с. 883.
- [10] В. А. Федорова, А. Е. Родин, Сравнительный анализ наблюдательных свойств быстрых радиовсплесков на частоте 111 и 1400 МГц // *Астрономический журнал*. – Т.98. – № 10. – с. 804.
- [11] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=13684>.
- [12] Istomin Ya. N., Radiation of fast radio bursts by hot neutron stars (On the nature of fast radio bursts) // *MNRAS*. – 2018. – Vol. 478. – Is. 4. – p. 4348.
- [13] The Astronomer's Telergam, URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14186>.
- [14] В. А. Федорова, А. Е. Родин, Поиск импульсного излучения от магнетара SGR1935+2154 // *Краткие сообщения по физике*. – 2021. – Т. 48. – № 10. – с. 37.
- [15] А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, К. А. Лапаев, Измерение рассеяния радиоизлучения пульсаров // *Астрономический журнал*. – 2007. – Т. 84. – № 8.
- [16] FRBSTATS: Catalogue, URL: <https://www.herta-experiment.org/frbstats/catalogue>.
- [17] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=13681>.
- [18] Родин А.Е., Фёдорова В.А., «Обнаружение периодического излучения от магнетара SGR 1935+2154», *Астрономический журнал*, т. 99, № 1, стр. 37 - 42, 2022.