

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Ридная Анна Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК
МАГНИТАРОВ И ИХ СВЯЗИ С БЫСТРЫМИ
РАДИОВСПЛЕСКАМИ ПО ДАННЫМ
ЭКСПЕРИМЕНТА КОНУС-ВИНД**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к. ф.-м. н.
Фредерикс Дмитрий Дмитриевич

Санкт-Петербург — 2025

Содержание

Введение	5
Магнитары	5
Быстрые радиовсплески	13
Актуальность темы диссертации	17
Цели и задачи работы	18
Научная новизна	19
Достоверность полученных результатов	20
Научная и практическая значимость	20
Основные положения, выносимые на защиту	21
Апробация работы и публикации	21
Личный вклад	23
Структура диссертации	23
 1 Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус-	
Винд	26
 2 Исследование вспышечной активности SGR 1935+2154 . .	29
2.1 Введение	29
2.2 Набор всплесков	31
2.3 Временной анализ	35
2.3.1 Методика	35
2.3.2 Результаты	36
2.4 Спектральный анализ	41
2.4.1 Методика	41
2.4.2 Результаты	45
2.5 Заключение	55

3	Первая промежуточная вспышка SGR 1935+2154	57
3.1	Локализация	57
3.2	Временной анализ	59
3.3	Спектральный анализ	59
3.4	Заключение	68
4	Всплеск SGR 1935+2154, ассоциированный с FRB 200428	70
4.1	Введение	71
4.2	Временной анализ	72
4.3	Спектральный анализ	76
4.4	Сравнительный анализ характеристик	78
4.5	Последующие одновременные детектирования	83
4.6	Заключение	83
5	Рентгеновские и радиовспышки магнитара 1E 1547.0–5408	86
5.1	Введение	86
5.2	Наблюдения в рентгеновском диапазоне	87
5.3	Радионаблюдения	91
5.4	Обсуждение	92
5.5	Заключение	94
6	Поиск возможного жесткого рентгеновского излучения, со- провождающего FRB	97
6.1	Введение	98
6.2	Выборка FRB	99
6.3	Методика анализа	100
6.3.1	Верхние пределы на интегральный и пиковый потоки . .	102
6.3.2	Стековый анализ	103
6.4	Результаты	105
6.4.1	Обнаруженные кандидаты	105
6.4.2	Верхние пределы	107
6.5	Заключение	113
	Заключение	115

Благодарности	118
Литература	119

Введение

Исследование магнитаров ¹ и быстрых радиовсплесков (FRB) – одно из приоритетных направлений современной астрофизики, что обусловлено их уникальными физическими свойствами и значительным потенциалом для решения фундаментальных научных задач. Изучение этих объектов углубляет наше понимание физики экстремальных состояний вещества, эволюции звезд и механизмов излучения, а также стимулирует развитие новых технологий наблюдений. В ближайшем будущем FRB станут наиболее многочисленной выборкой удаленных нейтронных звезд ², что откроет широкие возможности для изучения их физики и исследования межгалактической среды, включая измерение плотности барионной материи, уточнение космологических параметров и анализ крупномасштабной структуры Вселенной.

Настоящая диссертация посвящена изучению вспышечной активности магнитаров в жестком рентгеновском диапазоне и ее связи с FRB. Основным объектом исследования является магнитар SGR 1935+2154, единственный подтвержденный источник FRB в нашей галактике. Анализ наблюдательных данных направлен на выявление механизмов и условий связи между магнитарами и FRB, что способствует более глубокому пониманию их природы.

Магнитары

Магнитары представляют собой особый класс молодых, медленно вращающихся одиночных нейтронных звезд, обладающих сверхсильными магнитными полями, достигающими $10^{14} - 10^{15}$ Гс [1]. Обычно их обнаруживают по вспышкам жесткого рентгеновского и мягкого гамма-излучения в периоды

¹Допустимо также написание «магнетар»

²Если существующий консенсус о том, что большинство источников FRB – магнитары, не будет опровергнут.

активности источников. Последующие наблюдения постоянного рентгеновского излучения позволяют определить период пульсаций источника и его производную, что дает возможность оценить величину магнитного поля и подтвердить магнитарную природу объекта.

Магнитары впервые появились в астрофизике под названиями *источники мягких повторных гамма-всплесков* (*Soft Gamma Repeaters, SGRs*) и *аномальные рентгеновские пульсары* (*Anomalous X-ray pulsars, AXP*s). Первоначальное разделение на два класса объектов сложилось исторически, в силу различий их наблюдательных проявлений, по которым они были открыты.

Первое опубликованное сообщение об обнаружении магнитара относится к 1979 году, когда в ходе советского эксперимента «Конус» на межпланетных станциях «Венера – 11» и «Венера – 12» зарегистрировали повторные вспышки жесткого рентгеновского и мягкого гамма-излучения [2]. Хотя изначально такие вспышки считались подтипом классических гамма-всплесков, повторяемость вспышек и необычный исключительно мощный всплеск 5 марта 1979 года (см. Рис. 1), теперь известный как гигантская вспышка магнитара SGR 0526-66 в Большом Магеллановом Облаке [3, 4], опровергли это предположение. Повторные вспышки отличались короткой длительностью и более мягкими спектрами по сравнению с гамма-всплесками, что привело к термину SGR. Обнаружение новых источников SGR 1900+14 [5] и SGR 1806-20 [6], а также рост числа повторных событий в последующие годы подтвердили существование отдельного класса высокоэнергетических транзиентных источников.

В те же годы начал формироваться еще один класс объектов, не поддающийся простой классификации и, на первый взгляд, не связанный с SGR. Наблюдения в мягком рентгеновском диапазоне на телескопе Einstein (HEAO-2) Observatory выявили «экстраординарный новый рентгеновский источник» 1E 2259+586, расположенный в центре остатка сверхновой СТВ 109 с периодом пульсаций около 7 секунд [7, 8]. Длинный период пульсаций уже сам по себе был необычной характеристикой, поскольку известные на тот момент пульсары, включая наиболее многочисленные радиопулсары, имели намного более короткие периоды – от миллисекунд до нескольких секунд. Рентгеновская светимость 1E 2259+586 была слишком велика, чтобы объясняться

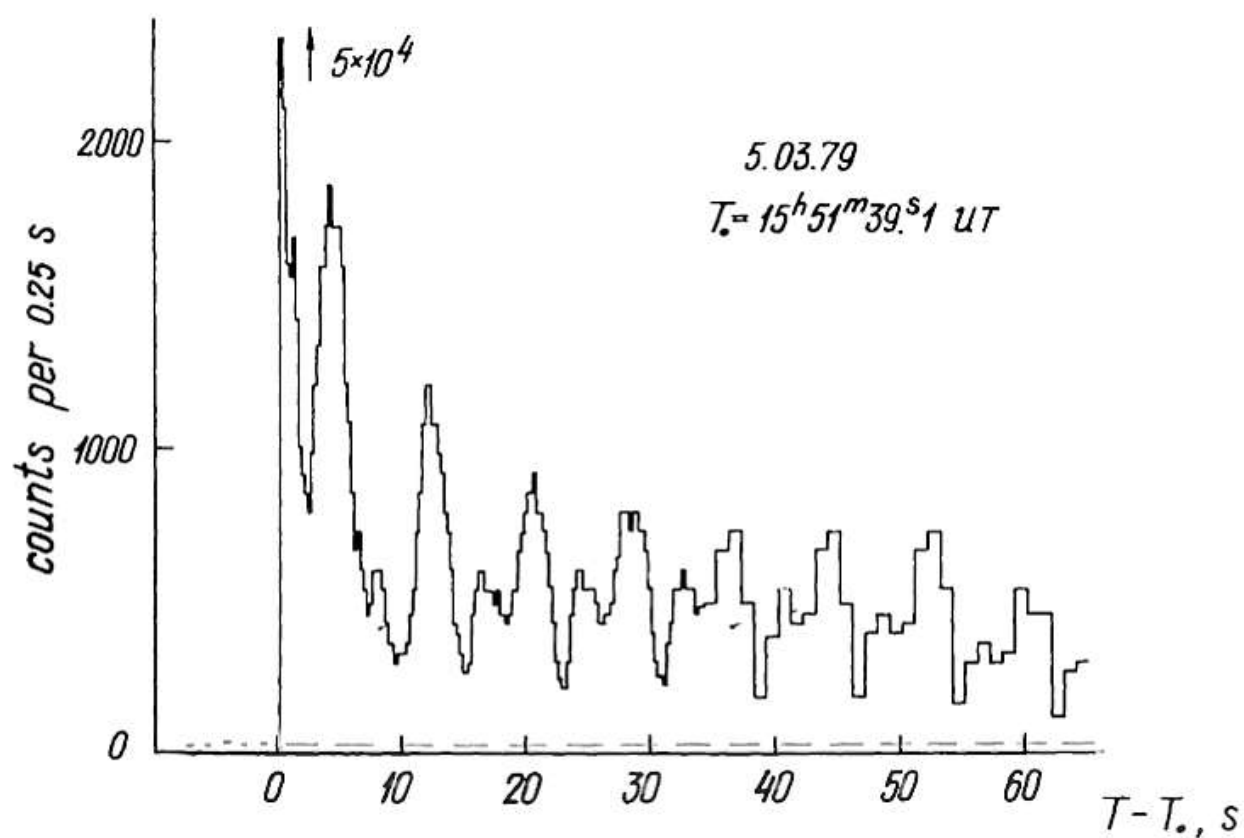


Рисунок 1: Временной профиль гигантской вспышки от SGR 0526-66, зарегистрированной 5 марта 1979 года. «Хвост» вспышки показал восьмисекундные пульсации, что указывало на то, что источник является нейтронной звездой с периодом вращения 8 секунд.

потерей энергии вращения предполагаемой нейтронной звезды, что привело к предположению об аккреции в рентгеновской двойной системе. Однако энергетический спектр источника был значительно мягче, чем у типичных аккрецирующих пульсаров, а оптический компаньон обнаружен не был. Эти необычные характеристики сделали 1E 2259+586 «аномальным» объектом, и на тот момент его природа оставалась загадкой. Обнаружение аналогичных источников – 1E 1048.1–5937 [9], 4U0142+61 [10], 1RXS J170849.0 – 400910 [11] и др. – указало на новый класс объектов, получивший название АХР. Изначально их интерпретировали как тип маломассивных рентгеновских двойных систем, где пульсации обусловлены аккрецией (например, [12, 13]). Малая высота АХР над галактической плоскостью, свидетельствующая об их молодом возрасте ($10^4 - 10^5$ лет), противоречила их идентификации как старых маломассивных двойных систем [14], а данные последующих наблюдений в оптическом и инфракрасном диапазонах исключили аккреционные модели [15, 16].

Thompson & Duncan, отметив сходство АХР с SGR, предложили объединить эти классы в рамках разработанной ими модели магнитара, согласно которой такие объекты представляют собой нейтронные звезды, излучение которых обеспечивается диссипацией сверхсильного магнитного поля [17, 18, 19]. Обнаружение постоянного рентгеновского излучения у всех трех известных SGR [20, 21, 22] с величиной периода пульсаций, связанными с вращением звезды, характерной для АХР [1, 23], и регистрация вспышечной активности у ряда АХР [24] окончательно устранили различия между этими классами, подтвердив их единство как магнитаров.

Популяция магнитаров на 2025 год насчитывает около 30 объектов ³, обнаруженных преимущественно в нашей галактике [25]. Они являются относительно медленно вращающимися звездами ($P \sim 1 - 12$ с), и их вращение замедляется на временных масштабах в несколько тысяч лет ($\dot{P} \sim 10^{-13} - 10^{-11}$ с/с). В предположении магнито-дипольного излучения эти временные параметры указывают на молодой возраст магнитаров – около $10^3 - 10^5$ лет и величину дипольного магнитного поля порядка $10^{14} - 10^{15}$ Гс ⁴, что делает их

³<http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>

⁴Следует однако отметить ограничения применения таких оценок к магнитарам. Во-первых, оценка возраста основана на предположении неизменности поля, и указанные значения являются верхней

уникальными объектами для изучения квантовой электродинамики и физики плазмы в условиях сверхсильных магнитных полей, недостижимых в земных лабораториях.

Наблюдаемая активность магнитаров представляет собой сложный комплекс явлений, включающий как постоянное излучение, так и транзиентную активность в широком диапазоне энергий и временных масштабов. *Постоянное излучение* магнитаров наблюдается преимущественно в мягком рентгеновском диапазоне (< 10 кэВ) и характеризуется относительно стабильной светимостью $10^{31} - 10^{35}$ эрг/с, что зачастую на несколько порядков превышает потери энергии вращения [31], подчеркивая доминирующую роль энергии магнитного поля в обеспечении их излучения. Излучение модулируется с периодом вращения звезды, обычно проявляя одну или две широкие синусоидальные компоненты. Доля пульсирующего излучения, определяемая как доля потока, изменяющегося в течение цикла вращения, составляет 10–30 %, хотя в периоды повышенной активности может быть и выше [32]. Профили пульсаций зависят от энергии и демонстрируют значительные изменения во времени, особенно в связи со вспышечной активностью [33, 34, 35]. *Вспышечная активность*, проявляющаяся в нерегулярных кратковременных всплесках в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах (> 10 кэВ), является отличительной чертой магнитаров (преимущественно SGR), выделяющей их среди других типов нейтронных звезд. Она подразделяется на три основных типа в зависимости от длительности и энергетических характеристик события: короткие всплески, промежуточные вспышки и гигантские вспышки (см. Рис. 2).

Короткие всплески – наиболее характерное проявление активности магнитаров, играющее ключевую роль в обнаружении новых источников и часто сигнализирующее о начале периодов активности. Эти события, вероятно, обусловлены локальными разрывами коры нейтронной звезды [37] или быстрой

границей для убывающих магнитных полей магнитаров, что может завышать их реальный возраст. Молодой возраст подтверждается их ассоциацией с областями звездообразования и остатками сверхновых [26, 27, 28]. Во-вторых, оценка магнитного поля учитывает лишь дипольную составляющую, тогда как основная часть магнитной энергии может быть сосредоточена в высших мультиполях и/или тороидальной компоненте. Примером служат магнитары с низкой оценкой дипольного поля, близкого к обычным пульсарам, которые, тем не менее, проявляют характерную для магнитаров вспышечную активность [29, 30].

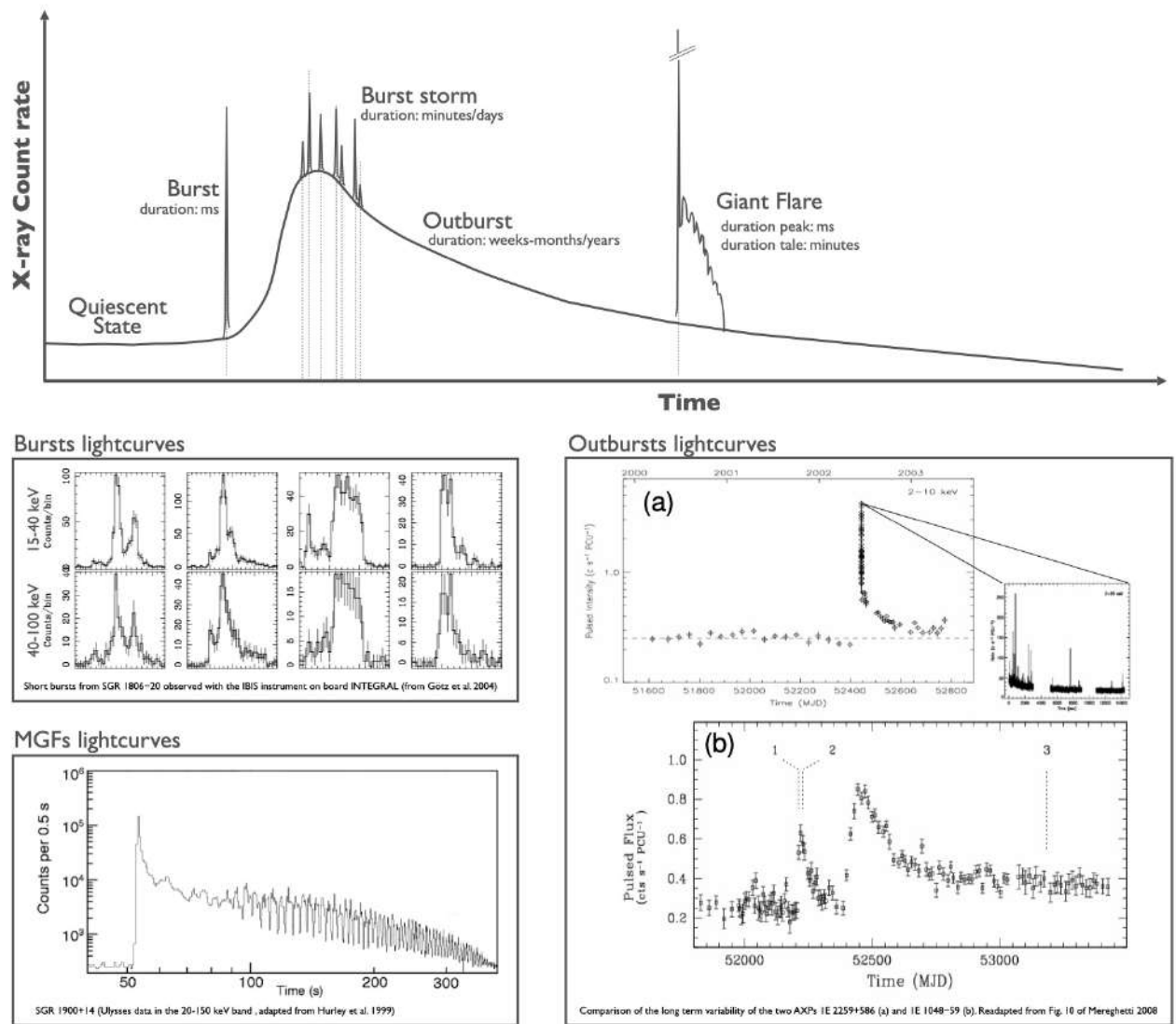


Рисунок 2: Иллюстрация транзиентной активности магнитаров. Верхняя панель схематично суммирует различные типы активности. Панель «Bursts lightcurves» показывает примеры коротких всплесков от SGR 1806-20, наблюдавшихся *INTEGRAL*-IBIS в 2004 году. Панель «MGFs lightcurves» иллюстрирует кривую блеска гигантских вспышек на примере события 1998 года от SGR 1900+14. Панель «Outbursts lightcurves» показывает долгосрочную переменность двух АХР. Изображение заимствовано из [36].

ми процессами магнитного пересоединения в магнитосфере [38], что приводит к мгновенному высвобождению накопленной энергии. Они могут быть изолированными или группироваться в кластеры, так называемые «леса» или «штормы» всплесков. Всплески происходят случайным образом, их невозможно предсказать: магнитары могут оставаться «спокойными» десятилетиями, а затем внезапно переходить в фазу интенсивной активности, испуская сотни вспышек за несколько дней. Их длительность варьируется от миллисекунд до секунд, а изотропное энерговыделение составляет $10^{38} - 10^{40}$ эрг. Кривая блеска обычно включает один или несколько пиков с более коротким временем нарастания по сравнению с затуханием.

Промежуточные всплески длятся от нескольких секунд до десятков секунд и выделяют $10^{41} - 10^{43}$ эрг. Эти события происходят реже коротких всплесков и могут сопровождаться модулированными «хвостами» излучения, длящимися несколько минут и напоминающими гигантские вспышки [39]. Соотношение энергии между вспышкой и «хвостом» варьируется в пределах порядка величины как между разными магнитарами, так и среди вспышек одного источника. Обычно энергия фотонов, наблюдаемых от коротких и промежуточных вспышек не превышает ~ 200 кэВ.

Гигантские вспышки – редчайшие и наиболее мощные события, зарегистрированные лишь трижды: в 1979 году от SGR 0526–66 [3, 4], в 1998 году от SGR 1900+14 [40, 41] и в 2004 году от SGR 1806–20 [42, 43]. Все три события начались с короткого гамма-импульса длительностью $0.1 - 0.5$ секунды с пиковой светимостью $\gtrsim 10^{44} - 10^{45}$ эрг/с для SGR 0526–66 и SGR 1900+14 и $\gtrsim 10^{47}$ эрг/с для SGR 1806–20, за которым следовал пульсирующий рентгеновский «хвост», модулированный периодом вращения звезды и затухающий за несколько минут. Энергия в пульсирующих «хвостах» у всех трех событий близка и составляет около 10^{44} эрг. Согласно модели магнитара, начальный импульс связан с выбросом горячей плазмы, часть которой удерживается замкнутыми силовыми линиями магнитного поля, формируя остывающую плазму, ответственную за излучение «хвоста» [37]. При наблюдении в близлежащих галактиках (на расстояниях порядка нескольких мегапарсек) детектируется только начальный жесткий импульс гигантских вспышек, поскольку их мягкие затухающие «хвосты» не достигают порога чувствительно-

сти современных инструментов, что делает эти редкие события практически неотличимыми от коротких гамма-всплесков и затрудняет их идентификацию. На сегодня известно шесть кандидатов во внегалактические гигантские вспышки магнитаров [44].

Эпизоды вспышечной активности часто сопровождаются значительным и быстрым (на временных масштабах от нескольких минут до нескольких часов) усилением постоянного рентгеновского излучения, интенсивность которого возрастает в $\sim 10 - 1000$ раз по сравнению с уровнем покоя [45]. Такие эпизоды, обозначаемые в англоязычной научной литературе термином *outbursts*, характеризуются более продолжительными временными масштабами, варьирующимися от нескольких недель до нескольких лет. В течение этого периода повышенное рентгеновское излучение постепенно затухает, возвращаясь к исходному уровню. Спектральная эволюция, наблюдаемая во время таких эпизодов, часто демонстрирует более жесткий начальный рентгеновский спектр, который постепенно смягчается по мере уменьшения потока излучения. Помимо изменений в спектре и интенсивности излучения, значительные вариации присутствуют и во временных характеристиках магнитаров. В частности, изменяется морфология профилей пульсаций, причем изменения затрагивают как форму профиля, так и долю пульсирующего излучения [46].

Основная часть излучения магнитаров сосредоточена в рентгеновском и гамма-диапазонах, но не ограничивается только ими. Около трети известных магнитаров имеют отождествления в оптическом и/или инфракрасном (ИК) диапазонах, несмотря на их слабую светимость ($V \sim 23 - 26$; $K \sim 19 - 22$) и расположение в плоскости Галактики, где высокая плотность межзвездной пыли и газа приводит к значительному поглощению излучения, особенно в оптическом диапазоне [47, 25, 48]. Ассоциации подтверждаются благодаря необычным показателям цвета магнитаров, отличающих их от обычных звезд [49, 50], обнаружению оптических пульсаций, синхронизированных с рентгеновскими [51, 52, 53], либо долговременной переменностью излучения на масштабах от месяцев до лет [54, 55, 48]. Возможные механизмы оптического и ИК-излучения включают переизлучение рентгеновского излучения окружающим диском или пылевым облаком [56, 57] и изгибное излучение

во внутренней магнитосфере [58, 59], однако детализированная модель пока отсутствует.

Радиоизлучение магнитаров является достаточно редким и малоизученным явлением. К 2025 году пульсирующее радиоизлучение обнаружено лишь у шести источников, преимущественно в периоды повышения их рентгеновской светимости [25]. В отличие от стабильных и регулярных радиоимпульсов пульсаров, радиоизлучение магнитаров характеризуется переменной и сложной формой импульсов, экстремальной изменчивостью яркости, спектральных свойств и поляризации на различных временных масштабах [60, 61, 62]. Радиоизлучение магнитаров является транзientным, с переходами между состояниями активного радиоизлучения и «радиомолчания», часто вызываемыми вспышками или периодами повышения светимости в рентгеновском диапазоне. Происхождение радиоизлучения остается предметом дискуссий, но перечисленные особенности указывают на тесную связь между динамикой магнитного поля магнитаров и их способностью к радиоизлучению, что намекает на уникальные механизмы генерации радиоизлучения магнитаров, непосредственно связанные с их сильным магнитным полем и окружающей плазменной средой [63].

Благодаря своим экстремальным свойствам и вспышечному поведению, магнитары часто рассматриваются в качестве источников энергии, «центральных машин», различных высокоэнергетических астрофизических явлений, таких как гамма-всплески и сверхяркие сверхновые (SLSN) [64, 65, 66, 67, 68, 69]. В последние годы одной из наиболее интригующих гипотез является их связь с быстрыми радиовсплесками [70].

Быстрые радиовсплески

Быстрые радиовсплески (Fast Radio Bursts, FRBs) – это мощные импульсы радиоизлучения внегалактического происхождения с характерной длительностью порядка нескольких миллисекунд (Рис. 3) [71, 72]. Это достаточно молодой класс астрофизических транзientов – первый всплеск был обнаружен случайно во время просмотра архивных данных обзора пульсаров в Малом Магеллановом Облаке в 2007 году [73]. Однако серьезное вни-

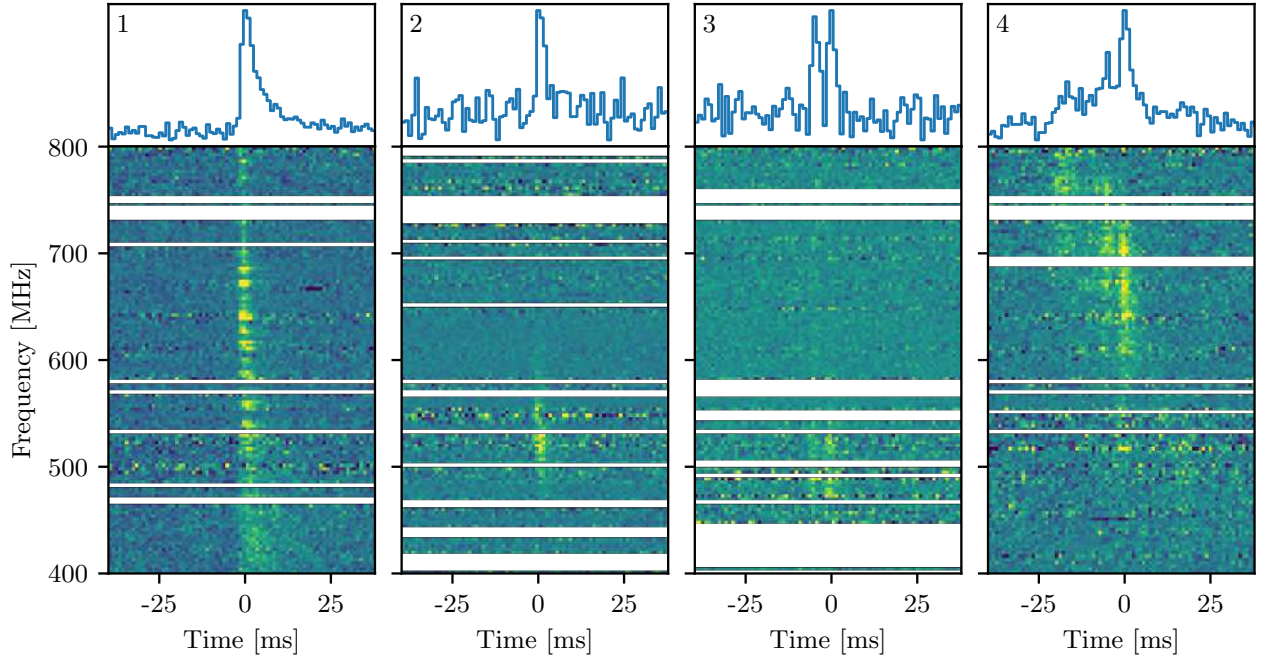


Рисунок 3: Динамические спектры четырех FRB, иллюстрирующие разнообразие морфологии импульсов, зарегистрированных CHIME/FRB. Выделены следующие архетипы: однопиковые профили, наблюдаемые в широком (1) или узком (2) диапазоне частот; сложные профили, состоящие из нескольких пиков, наблюдаемых на схожих частотах (3) или со смещением частоты вниз (4). Изображение заимствовано из [77].

мание к FRB привлекло лишь открытие четырех новых источников в 2013 году [74]. До этого сохранялись сомнения в их внеземной природе, отчасти из-за сходства с «перитонами» – явлением с формально определяемыми внегалактическими мерами дисперсии, но имеющим земное происхождение [75]. Лишь после того, как установили, что источниками перитонов были микроволновые печи в обсерватории Паркса [76] и что FRB не имеют особенностей, присущих перитонам, большинство ученых убедились в их астрономическом происхождении.

На 2025 год было детектировано более тысячи FRB⁵. Эти транзиенты наблюдаются в диапазоне частот от 110 МГц [78] до 8 ГГц [79]. Несмотря на такой широкий частотный диапазон, FRB проявляют себя как узкополосные явления. Одновременные наблюдения FRB на двух частотах, разделенных как минимум на 1 ГГц, пока не привели к обнаружению одного и того же всплеска

⁵Transient Name Server (TNS): <http://www.wis-tns.org>

на обеих частотах [80, 81, 82]. Подавляющее большинство FRB наблюдаются однократно, однако небольшая часть (~ 60 источников) демонстрирует повторные всплески [83, 84], что позволяет проводить детальные исследования их источников посредством целенаправленных наблюдательных кампаний. На текущий момент нет убедительных доказательств, что источники однократных и повторных всплесков («репитеры») представляют различные популяции FRB, не исключена также и возможность, что все FRB являются повторными. Тем не менее, статистические исследования показывают, что повторные всплески, в среднем, характеризуются большей длительностью и более узкими спектрами [77].

Среди репитеров наблюдается значительный разброс уровней активности, при этом лишь немногие источники отличаются высокой активностью. К числу наиболее активных относятся FRB 20201124A [85] и FRB 20240114A [86], для которых телескоп FAST зарегистрировал пока рекордную пиковую частоту ~ 500 всплесков в час. Репитеры также предоставляют возможность поиска периодичности. У ряда источников выявлены признаки периодической активности на неожиданно длительных временных масштабах. Наиболее достоверно периодичность установлена для FRB 20180916B и составляет ~ 16 дней с активным окном ~ 5 дней [87]. Длительность и фаза активного окна зависят от частоты: на более высоких частотах окна появляются раньше и являются более узкими, чем на низких частотах [88, 78]. Долгосрочные наблюдения FRB 20121102A также указывают на возможную периодичность ~ 160 дней [89, 90, 91], однако частое отсутствие всплесков в предсказанных окнах активности ставит под сомнение заявленную периодичность. Кроме того, для пока однократного FRB 20191221A обнаружена периодичность 216.8 мс в профиле необычно длинного (~ 3 с) всплеска [92]. Учитывая его существенно большую длительность по сравнению с другими FRB, этот источник, вероятно, имеет иное происхождение, отличное от основной популяции FRB. Квазипериодические структуры субсекундной длительности были выявлены также у однократных FRB 20210206A, FRB 20210213A и FRB 20201020A на низком уровне значимости $< 3\sigma$ [92, 93]. Это указывает на возможное существование подгруппы FRB, с (квази-) периодическими компонентами длительностью менее секунды.

Для более чем 100 FRB были определены родительские галактики, расположенные на расстояниях от 3.6 Мпк [94] до красного смещения $z = 2.148$ [95], при этом подавляющее большинство находится на малых $z \leq 0.5$ [96, 97]. Родительские галактики FRB характеризуются широким диапазоном показателей цвета ($u - r = 0.9 - 2.0$), звёздной массы ($10^8 - 10^{10} M_{\odot}$) и темпа звездообразования ($SFR = 0.05 - 10 M_{\odot} / \text{год}$) [96, 98, 97]. Локализации всплесков в большинстве случаев значительно смещены относительно центров галактик. Анализ с высоким пространственным разрешением подгруппы родительских галактик показал, что большинство FRB не расположены в областях с повышенным локальным звездообразованием по сравнению со средними глобальными значениями их галактик [99]. Кроме того, большинство галактик демонстрируют чёткие спиральные рукава в инфракрасном диапазоне, причём положения всплесков соответствуют их происхождению в этих рукавах.

Несмотря на колоссальный рост наблюдательных данных в последние годы, физическая природа этих всплесков все еще остается неясной. С момента обнаружения феномена, было предложено множество гипотез [100] о происхождении и механизмах генерации FRB, однако, ни одна из них не способна полностью объяснить весь комплекс наблюдаемых характеристик. Наиболее перспективными на данный момент считаются модели, связывающие FRB со вспышечной активностью магнитаров [72]. Эти модели условно можно разделить на два класса, в зависимости от области генерации излучения: внутри магнитосферы магнитара (и в ее непосредственной близости) или далеко за ее пределами. Оба класса предполагают начальное возмущение в магнитосфере, сопровождающееся значительным выделением энергии, большая часть которой может быть излучена в высокоэнергетическом диапазоне (вспышка магнитара). Радиоизлучение генерируется либо непосредственно в магнитосфере (например, через перезамыкание силовых линий магнитного поля [101, 102, 103] или изгибное излучение сгустков заряженных частиц [104, 105]) с последующим распространением наружу, либо путем взаимодействия энергии вспышки с окружающей средой, создавая ударные волны, которые порождают FRB посредством синхротронного мазерного излучения [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112].

Недавнее одновременное наблюдение FRB и рентгеновской вспышки от магнитара SGR 1935+2154 в нашей Галактике (см. Главу 4) впервые наблюдательно подтвердило связь между FRB и магнитарами. Это служит убедительным аргументом в пользу того, что, по крайней мере, часть FRB имеет магнитарное происхождение.

Актуальность темы диссертации

В последние годы астрофизика нейтронных звезд, в частности магнитаров, переживает значительный подъем интереса благодаря новым наблюдательным данным, связывающим их вспышечную активность с загадочными явлениями, такими как FRB.

Магнитары представляют собой класс нейтронных звезд с экстремально сильными магнитными полями (порядка $10^{14} - 10^{15}$ Гс) [1]. Некоторые из них (SGR) проявляют эпизодическую вспышечную активность в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазоне [31]. Изучение этих вспышек позволяет глубже понять механизмы генерации излучения и их роль в эволюции нейтронных звезд, а также физику экстремальных условий, характерных для источников, включая процессы, связанные с сильными магнитными полями и материей при сверхядерных плотностях.

Центральным объектом исследования выбран магнитар SGR 1935+2154, расположенный в нашей Галактике на расстоянии около 30 000 световых лет. Этот объект является одним из наиболее интенсивных магнитаров, демонстрируя высокую вспышечную активность почти ежегодно с момента своего открытия в 2014 году. Особое значение SGR 1935+2154 приобрел в апреле 2020 года, когда он стал первым (и пока единственным) объектом, для которого была наблюдательно установлена связь между рентгеновской вспышкой и FRB-подобным радиовсплеском FRB 200428. Это событие, детектированное радиотелескопами CHIME и STARE2 и рентгеновскими телескопами *Конус-Bund*, *INTEGRAL*, *Insight-HXMT* и *AGILE*, стало одним из ключевых результатов астрофизики последних лет, подтвердив гипотезу о том, что магнитары могут быть источниками, по крайней мере, части FRB. Этот результат предоставил уникальную возможность изучить физические механизмы генерации

радиовсплесков, стимулировал поиск аналогичных ассоциаций в других источниках и подчеркнул необходимость дальнейшего детального исследования активности магнитаров.

Актуальность исследования обусловлена рядом нерешенных вопросов. Во-первых, механизмы генерации радиовсплесков остаются предметом активных дискуссий. Во-вторых, неоднородность наблюдательных характеристик FRB указывает на возможное разнообразие источников или физических механизмов их генерации. В-третьих, корреляция между высокоэнергетическим излучением (вспышки в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах) и радиовсплесками требует накопления статистики и дальнейшего анализа. Исследование этих аспектов в контексте SGR 1935+2154 и других магнитаров позволяет углубить понимание физики экстремальных объектов и проверить гипотезы о природе FRB.

В ближайшие годы ожидается значительный прирост наблюдательных данных благодаря работе телескопов CHIME, FAST и SKA, что открывает новые перспективы для изучения FRB и их связи с магнитарной активностью. Таким образом, исследование вспышечной активности магнитаров в жестком рентгеновском диапазоне и их ассоциации с быстрыми радиовсплесками является не только фундаментально значимым для понимания физики экстремальных условий, но и практически важным для развития многоволновой астрономии и интеграции наблюдательных и теоретических подходов в эпоху больших данных.

Цели и задачи работы

Цель настоящей работы заключается в исследовании временных, спектральных и энергетических характеристик жестких рентгеновских вспышек SGR 1935+2154 и других магнитаров, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, а также в выявлении связи между этими вспышками и быстрыми радиовсплесками.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ вспышек магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд*, для определения их временных, спектральных и энергетических характеристик.
2. Детальное изучение вспышки, сопровождавшейся быстрым радиовсплеском FRB 200428, включая ее временной профиль, спектральные свойства и энергетические параметры.
3. Проведение сравнительного анализа характеристик вспышек SGR 1935+2154 с другими магнитарами для выявления общих и уникальных свойств, связанных с FRB.
4. Поиск подобных событий (рентгеновских вспышек, сопровождающихся радиоизлучением) у SGR 1935+2154 и других магнитаров на основе данных *Конус-Винд* и доступных радионаблюдений.
5. Поиск и оценка верхних пределов на потоки жесткого рентгеновского излучения, связанного с внегалактическими FRB в данных *Конус-Винд*.

Научная новизна

Следующие основные результаты получены впервые:

1. Проанализирован набор из 70 вспышек, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд* от SGR 1935+2154. Для всех вспышек определены длительности, спектральные параметры и энергетические характеристики.
2. Получены локализация, длительность, разрешенные по времени спектральные параметры для первой промежуточной вспышки от SGR 1935+2154. Исследована ее спектральная эволюция.
3. Проведен подробный анализ вспышки, сопровождавшейся быстрым радиовсплеском FRB 200428. Анализ кривой блеска жесткого рентгеновского излучения показал совпадение во времени его импульсов с импульсами радиоизлучения, что впервые позволило связать FRB-подобное событие с известным астрофизическим объектом.

4. Выявлен нетипично жесткий спектр вспышки сопровождавшейся FRB 200428 по сравнению с другими вспышками SGR 1935+2154, а также других магнитаров, наблюдавшихся в эксперименте *Конус-Винд*.
5. На основе данных эксперимента *Конус-Винд*, получены верхние пределы на высокоэнергетическое транзиентное излучение для 721 радиовсплеска от 581 источника FRB.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных в данной работе, обеспечивается:

1. Применением стандартных и апробированных методов обработки данных эксперимента *Конус-Винд*;
2. Многолетней интенсивной кооперацией с другими космическими экспериментами, совместным анализом общих событий и сравнением полученных результатов, подтвердившим применимость используемых методик.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты углубляют понимание физических условий и процессов, происходящих вблизи магнитаров, и механизмов генерации быстрых радиовсплесков. Данные о характеристиках всплесков SGR 1935+2154 и их связи с FRB могут быть использованы для уточнения теоретических моделей магнитарной активности и выявления физических условий, необходимых для генерации радиоизлучения. Установленные верхние пределы на высокоэнергетическое излучение для FRB ограничивают возможные модели их происхождения. Результаты работы имеют значение для планирования дальнейших наблюдений и интерпретации данных в области гамма-, рентгеновской и радиоастрономии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Временные, спектральные и энергетические характеристики 70 вспышек от магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд*.
2. Результаты детального анализа первой промежуточной вспышки от магнитара SGR 1935+2154, включая ее временные характеристики и разрешенные по времени спектральные параметры.
3. Первое одновременное детектирование магнитарной вспышки, сопровождавшейся быстрым радиовсплеском FRB 200428, подтверждающее связь между магнитарами и FRB. Сравнение свойств этого события с другими вспышками магнитара SGR 1935+2154 и вспышками других магнитаров, наблюдаемых в эксперименте *Конус-Винд*.
4. Результаты анализа рентгеновского всплеска магнитара 1E 1547.0–5408, зарегистрированного 3 февраля 2009 года инструментами *Конус-Винд*, *Swift-BAT*, *XMM-Newton*, для которого присутствует архивное радионаблюдение телескопа Parkes.
5. Верхние пределы на высокоэнергетическое транзиентное излучение в данных *Конус-Винд* для 721 радиовсплеска от 581 источника FRB.

Апробация работы и публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2015 по 2025 годы и опубликованы в **семи** статьях рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. A. V. Kozlova et al. The first observation of an intermediate flare from SGR 1935+2154 // Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 460, 2, 2016, p. 2008 - 2014;

2. A. V. Kozlova et al. First intermediate flare from SGR 1935+2154 // Journal of Physics: Conference Series, Volume 769, article id. 012005, 2016;
3. A. V. Kozlova et al. Properties of Konus-Wind SGR bursts // Journal of Physics: Conference Series, Volume 932, article id. 012026, 2017;
4. A. Ridnaia et al. A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst // Nat. Astron., v.5, 4, 2021, p. 372 - 377;
5. G. L. Israel, .., A. Ridnaia et al. X-Ray and Radio Bursts from the Magnetar 1E 1547.0-5408 // Astrophys. J., v.907, 1, 2021, ArtNo: #7;
6. A. V. Ridnaia et al. Search for gamma-ray counterparts to FRBs in Konus-Wind data // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 16 (1.2), 2023, p. 474-479;
7. A. Ridnaia et al. A targeted search for FRB counterparts with Konus-Wind // Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v.527, 3, 2024, p. 5580 - 5587

Полученные результаты также доложены на **семи** международных и российских научных конференциях:

1. «ФизикА.СПб/2015» (Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2015);
2. «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, ИКИ РАН, 2016);
3. «Physics of Neutron Stars» (St. Petersburg, Academic University, 2017);
4. «Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: Twenty Five Years of Konus-Wind Experiment» (St. Petersburg, Ioffe Institute, 2019);
5. «Успехи Российской Астрофизики 2020: теория и эксперимент» (Москва, МГУ ГАИШ, 2020);
6. «ФизикА.СПб/2022» (Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2022);

7. «Physics of Neutron Stars» (St. Petersburg, Ioffe Institute, 2023).

а также на астрофизических семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ГАО РАН.

Личный вклад

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, были получены соискателем лично или соавторами при непосредственном участии соискателя. Соискателем был проведен систематический анализ кривых блеска и энергетических спектров магнитарных всплесков, зарегистрированных в эксперименте *Конус-Винд*, определены временные, спектральные и энергетические параметры событий. Проведен детальный анализ первой промежуточной вспышки от SGR 1935+2154, исследована ее эволюция. Соискателем был разработан раздел на сайте лаборатории (<https://www.ioffe.ru/LEA/SGR/index.html>), который содержит результаты по ~ 300 магнитарным вспышкам, зарегистрированным в эксперименте *Конус-Винд*. Соискателем совместно с Д.Д. Фредериксом и Д.С. Свинкиным была выполнена обширная работа по детальному анализу магнитарной вспышки, сопровождавшейся быстрым радиовсплеском FRB 200428. Соискателем был проведен поиск возможных отождествлений радиовсплесков в жестком рентгеновском диапазоне и получены верхние пределы на высокоэнергетическое транзиентное излучение в данных *Конус-Винд* для 721 радиовсплеска. Соискатель внёс основной вклад в подготовку и анализ данных *Конус-Винд* для совместной работы по всплеску от SGR/AXP 1E 1547.0-5408. Также соискатель успешно апробировал свои работы на российских и международных конференциях.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации **138** страниц, включая **30** рисунков, **14** таблиц. Библиография включает **227** наименований на **20** страницах.

Во **введении** представлен краткий обзор истории наблюдений и современного состояния исследований магнитаров и быстрых радиовсплесков с

акцентом на их наблюдательные характеристики. Рассмотрена актуальность проводимого исследования, обоснована его научная новизна и значимость. Сформулированы ключевые результаты исследования, а также положения, выносимые на защиту. Приведен перечень публикаций, в которых отражены основные результаты диссертационной работы. В **Главе 1** приведено описание эксперимента *Конус-Винд* и условий наблюдений. **Глава 2** посвящена изучению вспышечной активности магнитара SGR 1935+2154 в период активности источника начиная с момента его открытия в 2014 г. по конец 2022 г. Изложена методика временного и спектрального анализа, приведены результаты ее применения к исследуемому набору из 70 вспышек, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд*. В **Главе 3** проведен детальный анализ первой промежуточной вспышки от магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированной 12 апреля 2015 года. Представлена локализация вспышки, полученная методом триангуляции с использованием данных четырех инструментов межпланетной сети IPN. Представлены результаты временного и спектрального анализа для интегральных и разрешенных по времени спектров. Исследована спектральная эволюция в ходе вспышки. В **Главе 4** представлен анализ уникального события — вспышки магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированной 28 апреля 2020 года одновременно с радиовсплеском FRB 200428, свойства которого чрезвычайно близки к внегалактическим FRB. Исследован временной профиль всплеска и определены его ключевые параметры. Изучены спектральные и энергетические характеристики. Подчеркивается исключительная природа события по сравнению с остальной популяцией всплесков SGR 1935+2154. **Глава 5** посвящена анализу рентгеновского всплеска магнитара 1E 1547.0–5408, зарегистрированного 3 февраля 2009 года инструментами *Конус-Винд*, *Swift-BAT* и *XMM-Newton*. Для этого события было обнаружено архивное радионаблюдение телескопа Parkes, в ходе которого были детектированы два одиночных радиоимпульса, один из которых произошел через ~ 1 с после рентгеновского всплеска. Представлены результаты временного и спектрального анализа рентгеновского всплеска на основе данных *Конус-Винд*. Описаны детали радионаблюдений и рассмотрена связь между рентгеновским всплеском и радиоимпульсом. Также приведена оценка вероятности случайного совпадения этих событий.

В **Главе 6** представлены результаты поиска сопутствующего жесткого рентгеновского излучения для 721 FRB, зарегистрированных в период с 25 января 2001 года по 5 января 2022 года. Описана методология поиска и определения верхних пределов. Для каждого события получены верхние пределы на поток сопутствующего высокоэнергетического излучения, а для 18 FRB с измеренными красными смещениями родительских галактик определены верхние пределы на изотропный эквивалент полного энергосвечения и пиковой светимости. **Заключение** содержит краткий обзор полученных в диссертации результатов.

Глава 1

Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус-Винд

Основным источником наблюдательных данных в настоящей работе является эксперимент *Конус-Винд*, проводимый ФТИ им. А. Ф. Иоффе на протяжении более трех десятилетий. Этот проект посвящен исследованию транзитных астрофизических явлений, таких как космические гамма-всплески, вспышки магнитаров и солнечные вспышки, в широком энергетическом диапазоне от ~ 20 кэВ до 18 МэВ. К концу 2025 года в рамках эксперимента зарегистрировано более 300 ярких вспышек, исходящих от шести активных магнитаров.

Гамма-спектрометр Конус [113] включает в себя два сцинтилляционных детектора NaI(Tl), обозначенных на Рис. 1.1 как S1 и S2. Детекторы установлены по одному на противоположных сторонах космического аппарата GGS-*Wind* [114], стабилизированного вращением вокруг оси эклиптики. Детектор S1 ориентирован на южный полюс эклиптики, а детектор S2 — на северный, обеспечивая тем самым полный обзор небесной сферы. Эффективная площадь каждого детектора варьируется в диапазоне от ~ 80 до 160 см^2 , в зависимости от энергии падающего фотона и угла его падения относительно оси детектора.

Преимуществом инструмента является его положение вблизи точки Лагранжа L1 системы Земля–Солнце, что обеспечивает непрерывные наблюдения без затенения Землей и влияния зон захваченной радиации. Это делает *Конус-Винд* исключительно ценным источником данных, особенно для ретроспективного поиска отождествлений FRB с высокоэнергетическими транзитами.

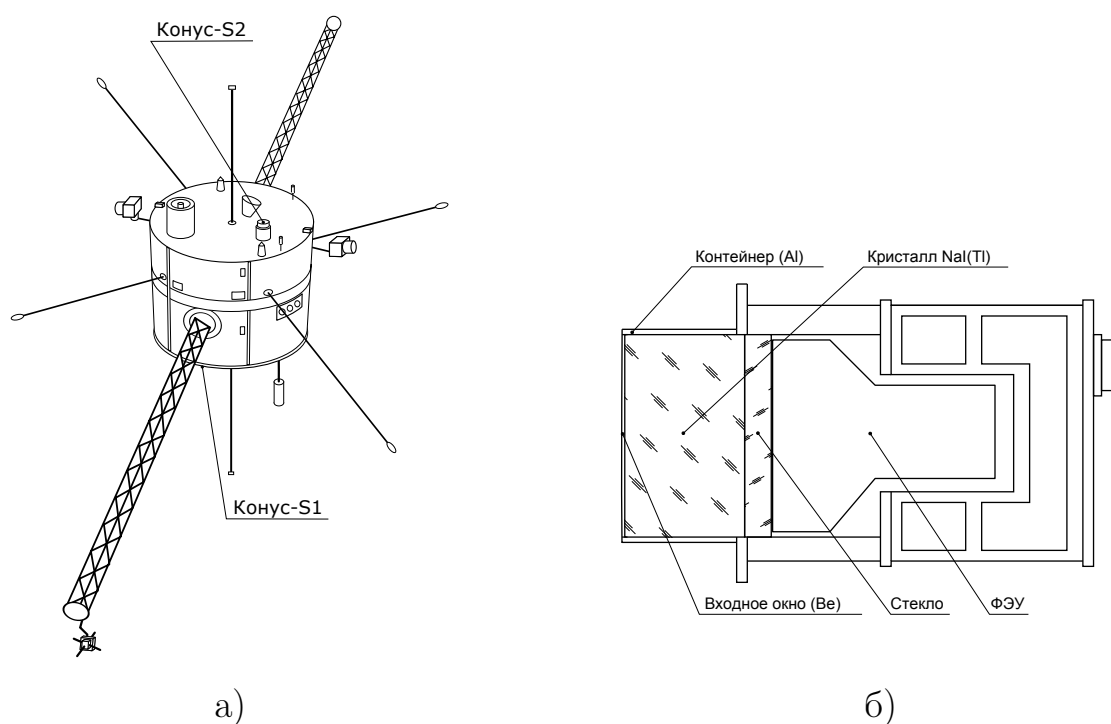


Рисунок 1.1: Схематическое изображение КА *GGS-Wind* (а) и детектора Конус (б).

Конус-*Винд* функционирует в двух взаимодополняющих режимах: фоновом и триггерном. В фоновом режиме осуществляется регистрация скорости счета с временным разрешением 2.944 с в трех энергетических каналах: 18–80 кэВ (G1), 80–320 кэВ (G2) и 320–1300 кэВ (G3). Переключение в триггерный режим происходит при превышении фонового уровня в канале G2 на $\approx 9\sigma$ на временных масштабах 140 мс или 1 с. В триггерном режиме данные фонового режима продолжают сохраняться до момента $T_0 + 250$ с, где T_0 обозначает время срабатывания триггера.

В триггерном режиме регистрация скоростей счета в каналах G1, G2 и G3 осуществляется с высоким временным разрешением (от 2 до 256 мс) на протяжении интервала от -0.512 с до 229.632 с относительно момента T_0 . Временное разрешение изменяется следующим образом: 2 мс в интервале от -0.512 с до 0.512 с, 16 мс — от 0.512 с до 33.280 с, 64 мс — от 33.280 с до 98.816 с и 256 мс — на протяжении оставшейся части триггерной записи. Кроме того, в этом режиме измеряются 64 многоканальных спектра в двух энергетических диапазонах РНА1 (~ 20 –1300 кэВ) и РНА2 (~ 300 кэВ–18 МэВ). Первые четыре спектра накапливаются по 64 мс каждый, последующие 52 спектра

записываются с адаптивно изменяющимся временем накопления, составляющим от 0.256 с до 8.192 с и определяемым текущей интенсивностью счета в канале G2. Последние восемь спектров аккумулируются в течение 8.192 с. По завершении накопления многоканальных спектров происходит перезапись данных, занимающая около часа, что приводит к временному прерыванию фоновой регистрации. В течение этого периода, непрерывная фиксация скорости счета обеспечивается резервной системой в канале G2 с временным разрешением 3.680 с.

В результате постепенной деградации фотокатода ФЭУ границы энергетических каналов со временем смещаются в область более высоких энергий. Калибровка энергетической шкалы проводится с использованием приборной фоновой линии ^{40}K (1460 кэВ) и e^+e^- аннигиляционной линии (511 кэВ). Фитирование положения этих линий методом наименьших квадратов позволяет точно определить границы спектральных каналов.

В настоящей работе для всех анализируемых событий была применена стандартная методика коррекции кривых блеска и спектральных данных с поправкой на мертвое время детектора, составляющее несколько микросекунд для кривых блеска и около $\sim 42\mu\text{с}$ для спектральных данных. Матрица отклика детектора была смоделирована в программном пакете GEANT4 [115]. Детали наземной калибровки и моделирования отклика детекторов изложены в работе [116].

Глава 2

Исследование вспышечной активности SGR 1935+2154

В данной главе проводится систематизация данных наблюдений магнитара SGR 1935+2154, полученных в рамках эксперимента Конус-Винд в период активности источника с апреля 2015 г. по декабрь 2022 г. Индивидуально для каждого всплеска рассматриваются характеристики излучения вспышки, такие как временная структура, длительность, параметры аппроксимации спектральными моделями, оценки полного и пикового потока энергии. Представлены также распределения длительностей всплесков, спектральных характеристик, соответствующих двум стандартным для магнитаров моделям (CPL и 2BB), а также интегральных и пиковых потоков.

Глава организована следующим образом. Во введении представлена общая информация о SGR 1935+2154, включая его характеристики и контекст наблюдений. В разделе 2.2 подробно описана исследуемая выборка из 70 всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд. В разделе 2.3 изложена методика временного анализа профилей всплесков и приведены результаты ее применения к данной выборке. В разделе 2.4 описана методика спектрального анализа и представлены результаты анализа спектров всплесков, включая распределения параметров и корреляции.

2.1 Введение

Объект SGR 1935+2154 был идентифицирован и локализован вблизи плоскости Галактики с помощью телескопа *Swift* Burst Alert Telescope (*Swift*-BAT), который зарегистрировал серию коротких всплесков в июле 2014 го-

да¹ [118, 119]. Последующие детальные наблюдения, выполненные рентгеновскими обсерваториями *Chandra* и *XMM-Newton* позволили определить период вращения объекта $P \approx 3.24$ с и темп его замедления $\dot{P} \approx 1.43 \times 10^{-11}$ с/с [120]. Эти параметры подтверждают магнитарную природу SGR 1935+2154 и указывают на дипольное магнитное поле напряженностью около 2.2×10^{14} Гс, характерный возраст ~ 3600 лет и темп потери энергии вращения $L_{sd} \approx 1.7 \times 10^{34}$ эрг/с. Источник расположен вблизи геометрического центра остатка сверхновой G57.2+0.8 [121]. Эта ассоциация дополнительно подкрепляется сопоставимыми оценками расстояния и возраста, независимо определенными для остатка сверхновой и магнитара [122]. Расстояние до магнитара находится в широком диапазоне значений от ~ 3 до 14 кпк и остается предметом активных дискуссий [123, 124, 122, 125, 126, 127, 128]. В данной работе, с учетом неопределенностей, расстояние принято равным 10 кпк.

SGR 1935+2154 относится к числу наиболее активных объектов своего класса, проявляя вспышечную активность практически ежегодно в период с 2015 по 2022 годы. Детальный анализ данных, полученных с помощью инструментов *Fermi*-GBM и *Swift*-BAT, показал, что источник становился все более интенсивным с каждым последующим периодом вспышечной активности [129]. Особо примечательным стал экстремально интенсивный эпизод 27 апреля 2020 года, когда SGR 1935+2154 произвел сотни всплесков за несколько минут [130, 131]. Менее чем через сутки после этого «леса» вспышек телескопы CHIME и STARE2 зарегистрировали радиовсплеск FRB 200428 [132, 133], по своим характеристикам очень схожий с внегалактическими FRB. По данным STARE2, флюенс FRB 200428 составил ~ 1.5 МЯн мс (1281–1468 МГц) [133], что является рекордным значением яркости радиоизлучения для галактических магнитаров. Одновременно с радиовсплеском была зафиксирована рентгеновская вспышка с необычно жестким спектром (см. подробное описание события в Главе 4). Это событие стало первым случаем обнаружения SGR 1935+2154 в радиодиапазоне и первым отождествлением FRB с транзиентным излучением вне радиодиапазона, что явилось

¹В данных *Fermi* Gamma-ray Burst Monitor (*Fermi*-GBM) были обнаружены несколько возможных более ранних вспышек SGR 1935+2154 [117].

ключевым подтверждением гипотезы, что магнитары могут быть источниками FRB.

Данное открытие стимулировало интенсивные наблюдения объекта. После FRB 200428 SGR 1935+2154 демонстрировал относительное «затишье» в радиодиапазоне, хотя были зафиксированы отдельные слабые радиовсплески [134, 135, 136], не сопровождавшиеся рентгеновским излучением. Через пять месяцев после FRB 200428 телескоп FAST обнаружил сотни периодических радиоимпульсов (с потоками менее 1 Ян), не связанных с рентгеновской активностью, что указывает на включение у магнитара фазы радиопульсара [137]. После более чем двухлетнего затишья, в октябре 2022 года, SGR 1935+2154 вступил в новую фазу активности, сопровождавшуюся рентгеновскими и радиовсплесками. Помимо FRB 200428, на данный момент известно о двух относительно менее мощных радиовсплесках, сопровождавшихся менее интенсивными и жесткими рентгеновскими вспышками, зарегистрированных 14 и 21 октября 2022 года [138, 139, 140, 141, 142, 143, 144].

Таким образом, SGR 1935+2154 представляет собой уникальный объект, демонстрирующий сложную активность в рентгеновском и радиодиапазонах. Его изучение предоставляет ценные данные для понимания процессов в сильных магнитных полях нейтронных звезд и природы быстрых радиовсплесков. Выявление временных и пространственных совпадений радио- и рентгеновских всплесков или установление верхних пределов на излучение в этих диапазонах является важным шагом для уточнения теоретических моделей FRB.

2.2 Набор всплесков

Для исследования вспышечной активности SGR 1935+2154 была сформирована выборка из 70 ярких всплесков, зарегистрированных инструментом *Конус-Винд* в период с момента открытия источника в 2014 году и до настоящего времени. Эти всплески были достаточно интенсивными, чтобы перевести спектрометр *Конус* в триггерный режим, обеспечивающий высокое временное разрешение в кривых блеска и измерение многоканальных спектров.

Идентификация всплесков проводилась на основе анализа их временных профилей и спектральных характеристик, чтобы подтвердить их принадлежность к магнитарным всплескам. Поскольку пространственная информация, предоставляемая Конус-*Bund*, ограничена, для подтверждения источника всплесков использовались дополнительные данные. Точные локализации (с точностью лучше нескольких угловых минут), полученные с помощью инструментов с возможностями построения изображения в рентгеновском или мягком гамма-диапазоне (например, *Swift*-BAT и *INTEGRAL* IBIS/ISGRI), а также автономные локализации, полученные *Fermi*-GBM, применялись для событий, где такие данные были доступны. Для всплесков, наблюдавшихся как минимум одной другой (помимо Конус-*Bund*) миссией межпланетной сети Interplanetary Network (IPN), источник всплеска уточнялся методом триангуляции. Для событий, обнаруженных исключительно Конус-*Bund* ($\sim 13\%$), местоположение источника определялось с помощью оценки эклиптической широты, вычисленной по соотношению потоков в двух детекторах, а также с учетом периодов активности источника и информации о его затенении для других космических аппаратов Земли.

Хронология зарегистрированной вспышечной активности представлена на Рис. 2.1, где показано распределение триггерных событий по времени, отражающее периоды активности магнитара. Стоит отметить, что чрезвычайно интенсивный эпизод 27 апреля 2020 года, упомянутый во введении, соответствует одному триггерному событию Конус-*Bund*, содержащему множество всплесков, которые трудно отделимы друг от друга. В целях обеспечения единообразия последующего анализа будет рассмотрен только первый всплеск из этого эпизода, для которого доступны данные с наилучшим временным и спектральным разрешением.

Итоговая выборка из 70 всплесков представляет собой репрезентативный набор данных для анализа временных и спектральных свойств вспышечной активности магнитара. Полный список всплесков представлен в Таб. 2.1, описание представленных в ней характеристик дано в последующих разделах.

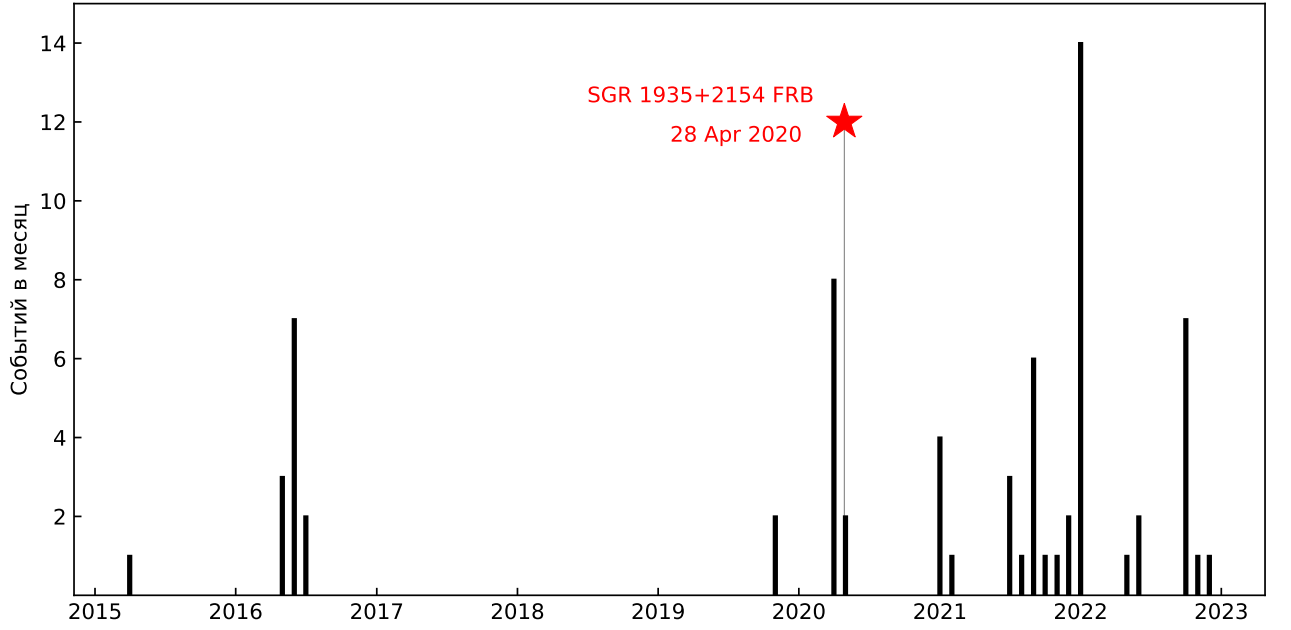


Рисунок 2.1: Хронология вспышечной активности SGR 1935+2154, зарегистрированной в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд.

Таблица 2.1: Список всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд

N	Триггерное время (UTC)	T_{90} (с)	S (10^{-6} эрг/см ²)*	F_{peak} (10^{-5} эрг/см ² /с)**
1 ^{IF}	2015-04-12T11:24:24.683	1.408 ± 0.016	26.20 ± 0.22	2.26 ± 0.08
2	2016-05-18T09:09:24.102	0.128 ± 0.004	1.82 ± 0.05	1.57 ± 0.08
3	2016-05-19T06:21:19.193	0.082 ± 0.004	1.40 ± 0.04	1.97 ± 0.10
4	2016-05-20T05:21:33.825	0.090 ± 0.004	1.17 ± 0.04	1.51 ± 0.09
5	2016-06-17T06:27:57.257	0.378 ± 0.006	6.38 ± 0.13	2.02 ± 0.09
6	2016-06-20T15:16:37.726	0.164 ± 0.004	2.97 ± 0.07	2.20 ± 0.10
7	2016-06-23T17:21:09.561	0.084 ± 0.004	1.33 ± 0.04	1.91 ± 0.11
8	2016-06-23T21:20:49.524	0.398 ± 0.010	2.90 ± 0.10	1.02 ± 0.07
9	2016-06-26T09:40:15.618	0.120 ± 0.011	0.66 ± 0.04	1.19 ± 0.10
10	2016-06-26T13:54:33.909	0.662 ± 0.016	9.19 ± 0.14	1.61 ± 0.06
11	2016-06-26T18:22:27.124	0.324 ± 0.006	6.05 ± 0.12	1.84 ± 0.08
12	2016-07-21T00:55:48.553	0.076 ± 0.015	0.71 ± 0.07	1.18 ± 0.14
13	2016-07-21T09:36:17.188	0.148 ± 0.005	1.78 ± 0.05	1.43 ± 0.08
14	2019-11-04T10:44:26.612	0.090 ± 0.004	1.33 ± 0.04	1.70 ± 0.10
15	2019-11-05T06:11:08.832	0.206 ± 0.004	4.78 ± 0.09	2.90 ± 0.11
16	2020-04-10T09:43:52.256	0.128 ± 0.005	1.55 ± 0.05	1.54 ± 0.09
17	2020-04-22T08:53:16.933	0.514 ± 0.016	11.50 ± 0.16	2.85 ± 0.08
18	2020-04-27T18:31:36.729	0.108 ± 0.004	1.50 ± 0.05	1.59 ± 0.09

Таблица 2.1: Продолжение

N	Триггерное время (UTC)	T_{90} (с)	S (10^{-6} эрг/см ²)*	F_{peak} (10^{-5} эрг/см ² /с)**
19	2020-04-27T19:43:44.348	0.186 ± 0.007	2.21 ± 0.06	1.25 ± 0.07
20	2020-04-27T21:59:22.174	0.092 ± 0.020	0.69 ± 0.05	1.36 ± 0.13
21	2020-04-27T23:44:31.654	0.088 ± 0.041	0.44 ± 0.04	1.08 ± 0.13
22 ^{FRB}	2020-04-28T14:34:24.084	0.310 ± 0.052	0.97 ± 0.05	0.75 ± 0.09
23	2020-04-29T20:47:27.792	0.144 ± 0.004	2.12 ± 0.05	1.55 ± 0.08
24	2020-05-10T06:12:02.624	0.296 ± 0.005	8.70 ± 0.17	3.89 ± 0.12
25	2020-05-10T21:51:17.280	0.076 ± 0.021	2.44 ± 0.03	1.78 ± 0.14
26	2021-01-27T06:50:16.685	0.088 ± 0.008	0.91 ± 0.04	1.26 ± 0.09
27	2021-01-29T06:59:56.932	0.152 ± 0.004	3.14 ± 0.07	2.28 ± 0.10
28	2021-01-29T10:35:35.984	0.244 ± 0.008	2.64 ± 0.07	1.47 ± 0.09
29	2021-01-30T17:40:50.688	0.094 ± 0.006	1.89 ± 0.06	2.62 ± 0.13
30	2021-02-02T12:54:22.929	0.038 ± 0.037	...	...
31	2021-07-06T17:14:53.331	0.042 ± 0.004	0.56 ± 0.04	1.37 ± 0.14
32	2021-07-07T00:33:35.644	0.096 ± 0.007	1.45 ± 0.05	1.64 ± 0.10
33	2021-07-10T20:26:08.532	0.146 ± 0.008	1.48 ± 0.10	1.11 ± 0.10
34	2021-08-05T00:08:59.958	0.114 ± 0.007	1.29 ± 0.05	1.32 ± 0.09
35 ^{IF}	2021-09-10T00:45:50.499	1.076 ± 0.016	20.00 ± 0.21	2.45 ± 0.08
36	2021-09-11T15:06:46.825	0.268 ± 0.004	5.38 ± 0.09	2.26 ± 0.09
37	2021-09-11T17:01:14.025	0.542 ± 0.008	7.62 ± 0.12	1.52 ± 0.07
38	2021-09-12T06:51:17.185	0.240 ± 0.006	4.96 ± 0.09	2.66 ± 0.10
39 ^{IF}	2021-09-12T08:01:44.121	1.200 ± 0.016	12.50 ± 0.14	1.13 ± 0.05
40	2021-09-22T20:12:19.639	0.104 ± 0.004	1.45 ± 0.05	1.58 ± 0.09
41	2021-10-08T15:57:48.742	0.116 ± 0.004	1.50 ± 0.04	1.34 ± 0.08
42	2021-11-03T14:53:33.626	0.120 ± 0.004	2.53 ± 0.06	2.15 ± 0.10
43 ^{IF}	2021-12-24T03:42:30.516	0.966 ± 0.025	10.90 ± 0.13	1.33 ± 0.05
44	2021-12-29T16:41:22.391	0.254 ± 0.007	1.30 ± 0.05	1.17 ± 0.11
45	2022-01-11T17:05:51.690	0.172 ± 0.011	1.78 ± 0.05	1.56 ± 0.09
46	2022-01-12T08:39:21.806	0.316 ± 0.008	6.02 ± 0.12	2.51 ± 0.11
47	2022-01-13T08:09:35.444	0.304 ± 0.013	1.45 ± 0.07	1.47 ± 0.11
48	2022-01-13T12:52:58.912	0.140 ± 0.005	1.37 ± 0.06	1.23 ± 0.08
49	2022-01-13T22:25:50.270	0.166 ± 0.040	0.90 ± 0.03	1.67 ± 0.10
50	2022-01-14T09:20:22.126	0.352 ± 0.015	3.47 ± 0.07	1.93 ± 0.09
51	2022-01-14T16:08:39.186	0.352 ± 0.043	1.39 ± 0.05	2.23 ± 0.12
52	2022-01-14T19:56:48.322	0.324 ± 0.005	5.86 ± 0.14	2.37 ± 0.10
53	2022-01-15T08:25:52.115	0.480 ± 0.044	0.83 ± 0.04	1.10 ± 0.09
54	2022-01-15T17:21:55.176	0.140 ± 0.029	1.71 ± 0.05	1.92 ± 0.10
55	2022-01-15T19:37:29.225	0.126 ± 0.018	1.13 ± 0.04	1.63 ± 0.10

Таблица 2.1: Продолжение

N	Триггерное время (UTC)	T_{90} (с)	S (10^{-6} эрг/см ²)*	F_{peak} (10^{-5} эрг/см ² /с)**
56	2022-01-16T14:09:34.968	0.154 ± 0.007	2.30 ± 0.06	1.83 ± 0.09
57 ^{IF}	2022-01-20T09:51:15.962	0.966 ± 0.016	8.04 ± 0.13	1.41 ± 0.05
58	2022-01-23T20:06:34.602	0.286 ± 0.008	4.57 ± 0.08	1.99 ± 0.09
59	2022-05-25T07:10:16.580	0.132 ± 0.004	2.55 ± 0.06	2.09 ± 0.10
60	2022-06-03T23:48:53.643	0.286 ± 0.008	3.89 ± 0.07	1.70 ± 0.09
61	2022-06-16T07:11:55.887	0.622 ± 0.016	11.50 ± 0.16	2.32 ± 0.09
62	2022-10-12T15:42:32.646	0.320 ± 0.013	3.09 ± 0.06	1.59 ± 0.08
63	2022-10-13T02:02:46.180	0.212 ± 0.005	3.30 ± 0.07	1.69 ± 0.08
64	2022-10-13T22:41:30.645	0.352 ± 0.005	5.75 ± 0.13	1.96 ± 0.09
65	2022-10-14T07:12:29.934	0.142 ± 0.006	1.91 ± 0.05	1.60 ± 0.09
66	2022-10-14T13:54:12.142	0.064 ± 0.021	0.73 ± 0.04	1.49 ± 0.11
67	2022-10-14T17:08:41.260	0.264 ± 0.021	1.89 ± 0.05	2.04 ± 0.10
68	2022-10-17T11:14:43.010	0.086 ± 0.005	2.16 ± 0.06	2.83 ± 0.14
69	2022-11-09T16:06:08.083	0.224 ± 0.006	2.38 ± 0.07	1.36 ± 0.08
70	2022-12-13T06:57:06.883	0.096 ± 0.007	0.66 ± 0.03	1.31 ± 0.09

Примечания:

* Интегральный поток S в диапазоне (20 – 500) кэВ.

** Пиковый поток F_{peak} на временном масштабе 16 мс в диапазоне (20 – 500) кэВ.

^{IF} Промежуточная вспышка.

^{FRB} Всплеск, сопровождавшийся FRB 200428.

2.3 Временной анализ

2.3.1 Методика

Для анализа временных характеристик полученного набора всплесков использовались временные профили в энергетических диапазонах G1 и G2, с наилучшим доступным временным разрешением. Данные с разрешением 2 мс охватывают интервал от $T_0 - 0.512$ с до $T_0 + 0.512$ с, где T_0 соответствует времени срабатывания триггера (см. Главу 1). Для более длительных всплесков ($\sim 16\%$) использовались данные с разрешением 16 мс, доступные до $T_0 + 33.280$ с. Энергетический диапазон G3 ($\sim 320 - 1300$ кэВ) в анализе

не использовался, поскольку не содержит отсчетов от исследуемых событий (детектируемое излучение магнитаров, как правило, ограничено энергиями до ~ 200 кэВ).

Полная длительность всплеска T_{100} , а также длительности T_{90} и T_{50} (временные интервалы, содержащие от 5% до 95% и от 25% до 75% полного числа отсчетов за всплеск, соответственно) определялись на основе временных профилей в объединенном диапазоне G1+G2 ($\sim 20 - 320$ кэВ). Для определения времен начала T_i и окончания всплеска T_f (т.е. интервала T_{100}) использовалась автоматическая процедура [145], выявляющая превышение скорости счета над фоновой на уровне значимости 5σ на временных масштабах от 2 мс до 100 с в интервале от $T_0 - 0.512$ с до $T_0 + 240$ с, соответствующем длительности триггерной записи Конус-Винд. Такой подход позволяет учитывать как быстрые, импульсные компоненты, так и возможные длительные хвосты излучения. Значения T_{90} и T_{50} и их ошибки определялись методом, описанным в работе [146].

Фоновый уровень аппроксимировался константой, рассчитанной по предтриггерному интервалу (обычно от $T_0 - 800$ с до $T_0 - 20$ с). Для каждого события интервал выбора фона проверялся вручную, чтобы подтвердить его стабильность и исключить влияние близлежащих событий или инструментальных артефактов. В отдельных случаях, таких как, например, всплеск №39, в триггерной записи которого присутствовала солнечная вспышка, границы интервала поиска начала и окончания всплеска (или определения фона) корректировались, чтобы исключить посторонние события.

2.3.2 Результаты

На основе анализа выборки из 70 всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных Конус-Винд, проведена классификация событий по их морфологии и энергетическим характеристикам. Из общего числа событий 65 отнесены к категории коротких всплесков (Short Bursts, SBs) с типичной длительностью менее секунды. Пять событий, характеризующихся наибольшей длительностью и, в трех случаях, максимальным интегральным потоком, классифицированы как промежуточные вспышки (Intermediate Flares, IFs).

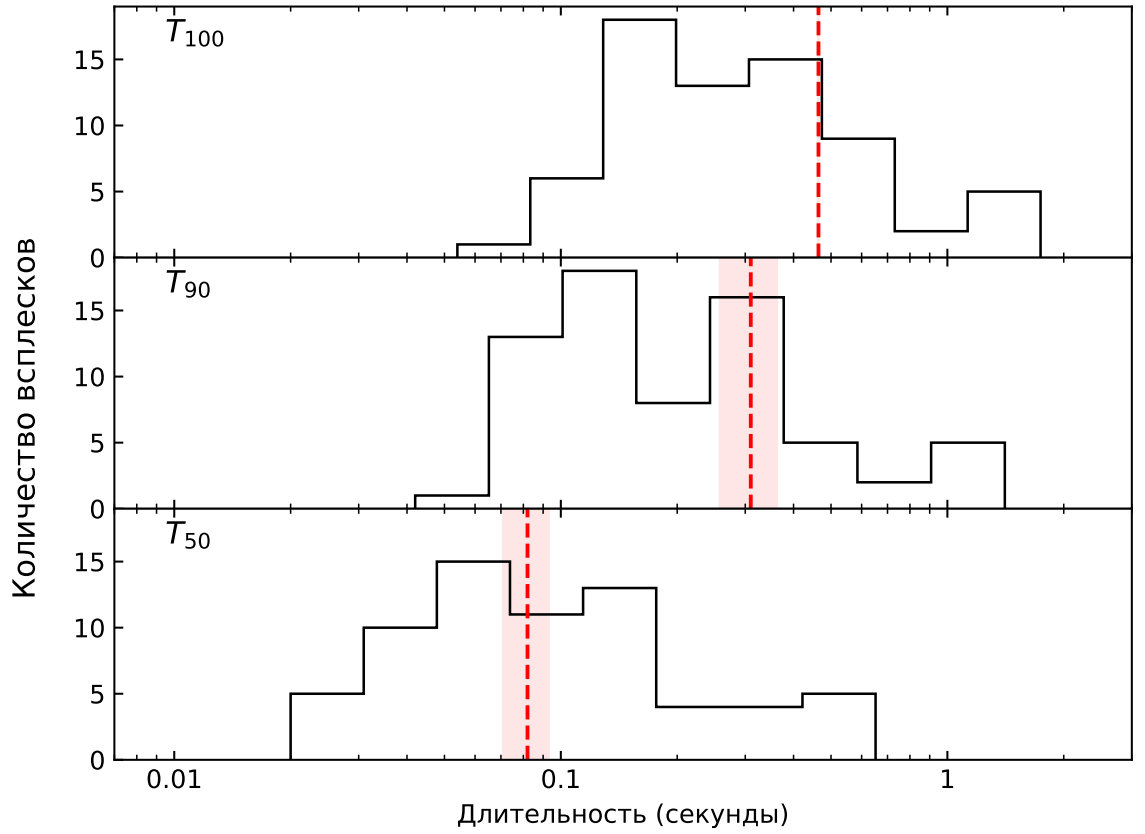


Рисунок 2.2: Распределения длительностей T_{100} (верхняя панель), T_{90} (средняя панель) и T_{50} (нижняя панель) для всплесков SGR 1935+3154, зарегистрированных Конус-Винд. Красным цветом отмечены длительности для всплеска, сопровождавшегося FRB 200428.

Для каждого всплеска определены временные параметры T_{100} , T_{90} и T_{50} . Распределение этих параметров для всей выборки представлено на Рис. 2.2. Распределение длительностей всплесков SGR 1935+2154 демонстрирует сходство с наблюдаемыми у других магнитаров (см., например, [147]). Статистика длительностей для полной выборки, а также подвыборок коротких и промежуточных всплесков приведены в Таб. 2.2. Короткие всплески характеризуются средним значением $T_{100} \sim 0.3$ с и диапазоном длительностей от 0.05 до 0.83 с, тогда как промежуточные всплески имеют среднюю длительность ~ 1.4 с с разбросом от 1.2 до 1.7 с. Небольшое число промежуточных всплесков слабо влияет на общие статистические свойства выборки.

Таблица 2.2: Статистика длительностей всплесков SGR .1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд

Длительность	Среднее значение (с)		
	SBs	IFs	All
T_{100}	0.31	1.44	0.39
T_{90}	0.21	1.12	0.28
T_{50}	0.10	0.57	0.14

На Рис. 2.3 представлена эволюция параметра T_{90} во времени. Значительных трендов в изменении длительностей всплесков за период наблюдений не обнаружено. Однако промежуточные вспышки преимущественно происходили в период повышенной активности источника в конце 2021 – начале 2022 года. В этот же период наблюдается сложная морфология временных профилей всплесков: появляются структуры и многокомпонентные профили. Разнообразие форм профилей коротких всплесков за весь период наблюдений представлено на Рис. 2.4. Большинство событий демонстрируют характерную для магнитаров морфологию: стремительный рост интенсивности на масштабе миллисекунд с последующим более медленным спадом. Наиболее распространенным типом временных профилей выборки является «П-образный профиль» без выраженных подпиков, представленный на панели а (Рис. 2.4). Он может быть протяженным, напоминая морфологию промежуточных вспышек (панель «b»), или характеризоваться более продолжительным спадом интенсивности (панель «i»). Остальные панели Рис. 2.4 иллюстрируют всплески, зарегистрированные в период наиболее интенсивной активности источника по данным Конус-Винд, и демонстрируют разнообразие форм и структур профилей. Некоторые всплески содержат прекурсоры («с») или хвосты излучения разной степени протяженности («d», «e»). Другие проявляют выраженную мультипиковую структуру с различным положением доминирующей компоненты: в начале («g»), середине («h») или конце («f») всплеска. В редких случаях рост к пику интенсивности занимает больше времени, чем спад («j»). Эти особенности могут указывать на эволюцию магнитного поля магнитара или накопление механических напряжений в коре

нейтронной звезды, приводящее к более сложным, интенсивным и хаотичным процессам энерговыделения.

Полный список временных характеристик всех зарегистрированных всплесков приведен в Таб. 2.3.

Таблица 2.3: Временные параметры всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-*Bund*

N	Триггерное время (UTC)	T_i (с)	T_f (с)	T_{100} (с)	T_{90} (с)	T_{50} (с)
1	2015-04-12T11:24:24.683	-0.062	1.680	1.742	1.408 ± 0.016	0.652 ± 0.016
2	2016-05-18T09:09:24.102	-0.042	0.108	0.150	0.128 ± 0.004	0.066 ± 0.003
3	2016-05-19T06:21:19.193	-0.034	0.078	0.112	0.082 ± 0.004	0.046 ± 0.003
4	2016-05-20T05:21:33.825	-0.026	0.080	0.106	0.090 ± 0.004	0.052 ± 0.003
5	2016-06-17T06:27:57.257	-0.018	0.422	0.440	0.378 ± 0.006	0.204 ± 0.004
6	2016-06-20T15:16:37.726	-0.046	0.176	0.222	0.164 ± 0.004	0.092 ± 0.004
7	2016-06-23T17:21:09.561	-0.024	0.100	0.124	0.084 ± 0.004	0.044 ± 0.004
8	2016-06-23T21:20:49.524	-0.078	0.394	0.472	0.398 ± 0.010	0.234 ± 0.008
9	2016-06-26T09:40:15.618	-0.162	0.072	0.234	0.120 ± 0.011	0.030 ± 0.003
10	2016-06-26T13:54:33.909	-0.032	0.800	0.832	0.662 ± 0.016	0.370 ± 0.012
11	2016-06-26T18:22:27.124	-0.032	0.360	0.392	0.324 ± 0.006	0.174 ± 0.004
12	2016-07-21T00:55:48.553	-0.066	0.092	0.158	0.076 ± 0.015	0.036 ± 0.003
13	2016-07-21T09:36:17.188	-0.056	0.118	0.174	0.148 ± 0.005	0.082 ± 0.004
14	2019-11-04T10:44:26.612	-0.088	0.070	0.158	0.090 ± 0.004	0.044 ± 0.003
15	2019-11-05T06:11:08.832	-0.064	0.216	0.280	0.206 ± 0.004	0.110 ± 0.004
16	2020-04-10T09:43:52.256	-0.096	0.086	0.182	0.128 ± 0.005	0.066 ± 0.004
17	2020-04-22T08:53:16.933	-0.012	0.608	0.620	0.514 ± 0.016	0.278 ± 0.004
18	2020-04-27T18:31:36.729	-0.124	0.066	0.190	0.108 ± 0.004	0.058 ± 0.004
19	2020-04-27T19:43:44.348	-0.104	0.158	0.262	0.186 ± 0.007	0.102 ± 0.004
20	2020-04-27T21:59:22.174	-0.074	0.094	0.168	0.092 ± 0.020	0.028 ± 0.003
21	2020-04-27T23:44:31.654	-0.050	0.148	0.198	0.088 ± 0.041	0.022 ± 0.003
22	2020-04-28T14:34:24.084	-0.220	0.264	0.484	0.310 ± 0.052	0.082 ± 0.011
23	2020-04-29T20:47:27.792	-0.056	0.116	0.172	0.144 ± 0.004	0.080 ± 0.004
24	2020-05-10T06:12:02.624	-0.042	0.350	0.392	0.296 ± 0.005	0.152 ± 0.004
25	2020-05-10T21:51:17.280	-0.032	0.106	0.138	0.076 ± 0.021	0.020 ± 0.003
26	2021-01-27T06:50:16.685	-0.066	0.062	0.128	0.088 ± 0.008	0.038 ± 0.003
27	2021-01-29T06:59:56.932	-0.038	0.156	0.194	0.152 ± 0.004	0.078 ± 0.004
28	2021-01-29T10:35:35.984	-0.144	0.162	0.306	0.244 ± 0.008	0.140 ± 0.006

Таблица 2.3: Временные параметры всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд*

N	Триггерное время (UTC)	T_i (с)	T_f (с)	T_{100} (с)	T_{90} (с)	T_{50} (с)
29	2021-01-30T17:40:50.688	-0.042	0.080	0.122	0.094 ± 0.006	0.040 ± 0.003
30	2021-02-02T12:54:22.929	-0.060	0.098	0.158	0.038 ± 0.037	0.014 ± 0.003
31	2021-07-06T17:14:53.331	-0.036	0.018	0.054	0.042 ± 0.004	0.020 ± 0.003
32	2021-07-07T00:33:35.644	-0.042	0.080	0.122	0.096 ± 0.007	0.050 ± 0.003
33	2021-07-10T20:26:08.532	-0.154	0.052	0.206	0.146 ± 0.008	0.074 ± 0.004
34	2021-08-05T00:08:59.958	-0.070	0.094	0.164	0.114 ± 0.007	0.054 ± 0.004
35	2021-09-10T00:45:50.499	-0.088	1.296	1.384	1.076 ± 0.016	0.520 ± 0.016
36	2021-09-11T15:06:46.825	-0.104	0.288	0.392	0.268 ± 0.004	0.140 ± 0.004
37	2021-09-11T17:01:14.025	-0.140	0.576	0.716	0.542 ± 0.008	0.280 ± 0.005
38	2021-09-12T06:51:17.185	-0.168	0.284	0.452	0.240 ± 0.006	0.132 ± 0.004
39	2021-09-12T08:01:44.121	-0.272	1.328	1.600	1.200 ± 0.016	0.620 ± 0.016
40	2021-09-22T20:12:19.639	-0.104	0.068	0.172	0.104 ± 0.004	0.052 ± 0.003
41	2021-10-08T15:57:48.742	-0.074	0.096	0.170	0.116 ± 0.004	0.060 ± 0.004
42	2021-11-03T14:53:33.626	-0.042	0.122	0.164	0.120 ± 0.004	0.064 ± 0.003
43	2021-12-24T03:42:30.516	-0.126	1.168	1.294	0.966 ± 0.025	0.510 ± 0.016
44	2021-12-29T16:41:22.391	-0.236	0.058	0.294	0.254 ± 0.007	0.040 ± 0.003
45	2022-01-11T17:05:51.690	-0.208	0.162	0.370	0.172 ± 0.011	0.066 ± 0.003
46	2022-01-12T08:39:21.806	-0.394	0.282	0.676	0.316 ± 0.008	0.156 ± 0.004
47	2022-01-13T08:09:35.444	-0.190	0.198	0.388	0.304 ± 0.013	0.166 ± 0.005
48	2022-01-13T12:52:58.912	-0.116	0.076	0.192	0.140 ± 0.005	0.068 ± 0.005
49	2022-01-13T22:25:50.270	-0.062	0.182	0.244	0.166 ± 0.040	0.032 ± 0.003
50	2022-01-14T09:20:22.126	-0.216	0.362	0.578	0.352 ± 0.015	0.124 ± 0.005
51	2022-01-14T16:08:39.186	-0.054	0.576	0.630	0.352 ± 0.043	0.198 ± 0.008
52	2022-01-14T19:56:48.322	-0.052	0.330	0.382	0.324 ± 0.005	0.156 ± 0.004
53	2022-01-15T08:25:52.115	-0.062	0.544	0.606	0.480 ± 0.044	0.092 ± 0.014
54	2022-01-15T17:21:55.176	-0.076	0.198	0.274	0.140 ± 0.029	0.050 ± 0.003
55	2022-01-15T19:37:29.225	-0.032	0.210	0.242	0.126 ± 0.018	0.036 ± 0.003
56	2022-01-16T14:09:34.968	-0.376	0.122	0.498	0.154 ± 0.007	0.072 ± 0.004
57	2022-01-20T09:51:15.962	-0.094	1.104	1.198	0.966 ± 0.016	0.564 ± 0.016
58	2022-01-23T20:06:34.602	-0.066	0.286	0.352	0.286 ± 0.008	0.144 ± 0.004
59	2022-05-25T07:10:16.580	-0.072	0.122	0.194	0.132 ± 0.004	0.070 ± 0.004
60	2022-06-03T23:48:53.643	-0.060	0.282	0.342	0.286 ± 0.008	0.148 ± 0.005
61	2022-06-16T07:11:55.887	-0.032	0.784	0.816	0.622 ± 0.016	0.306 ± 0.006
62	2022-10-12T15:42:32.646	-0.130	0.288	0.418	0.320 ± 0.013	0.150 ± 0.007
63	2022-10-13T02:02:46.180	-0.098	0.232	0.330	0.212 ± 0.005	0.112 ± 0.004

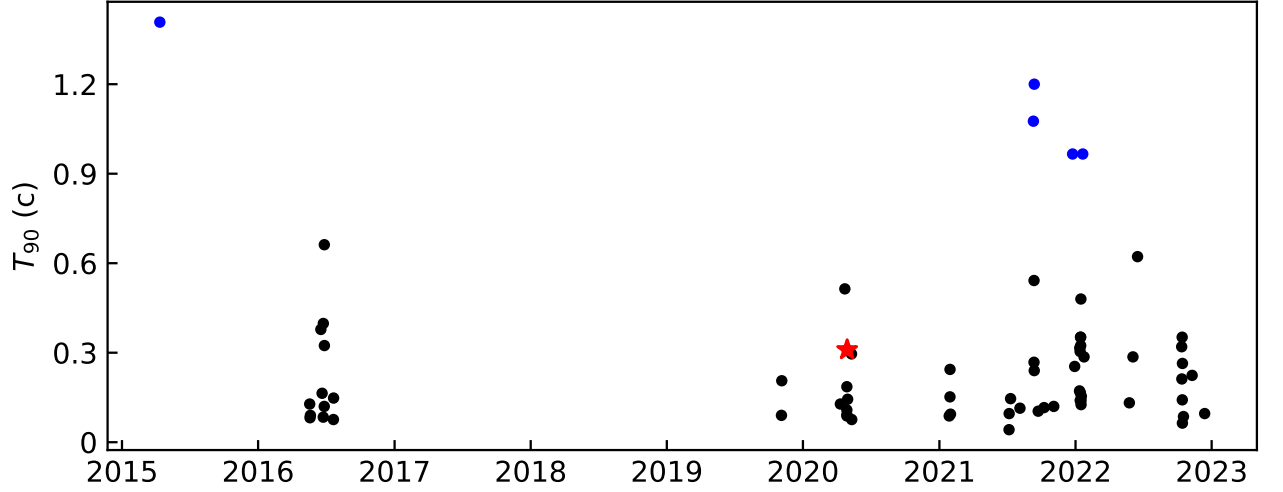


Рисунок 2.3: Эволюция T_{90} для всплесков SGR 1935+3154, зарегистрированных Конус-Винд. Синим цветом отмечены промежуточные вспышки, красной звездой — всплеск, сопровождавшийся FRB 200428.

Таблица 2.3: Временные параметры всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд

N	Триггерное время (UTC)	T_i (с)	T_f (с)	T_{100} (с)	T_{90} (с)	T_{50} (с)
64	2022-10-13T22:41:30.645	-0.050	0.374	0.424	0.352 ± 0.005	0.184 ± 0.004
65	2022-10-14T07:12:29.934	-0.070	0.132	0.202	0.142 ± 0.006	0.070 ± 0.004
66	2022-10-14T13:54:12.142	-0.068	0.162	0.230	0.064 ± 0.021	0.028 ± 0.003
67	2022-10-14T17:08:41.260	-0.140	0.376	0.516	0.264 ± 0.021	0.158 ± 0.004
68	2022-10-17T11:14:43.010	-0.056	0.146	0.202	0.086 ± 0.005	0.046 ± 0.003
69	2022-11-09T16:06:08.083	-0.246	0.160	0.406	0.224 ± 0.006	0.112 ± 0.004
70	2022-12-13T06:57:06.883	-0.096	0.046	0.142	0.096 ± 0.007	0.026 ± 0.003

2.4 Спектральный анализ

2.4.1 Методика

Для получения интегрального спектра каждого всплеска из исследуемой выборки выбирались спектры с суммарным временем накопления, наиболее близким снизу к T_{100} . Последующий спектр добавлялся, если в нём присут-

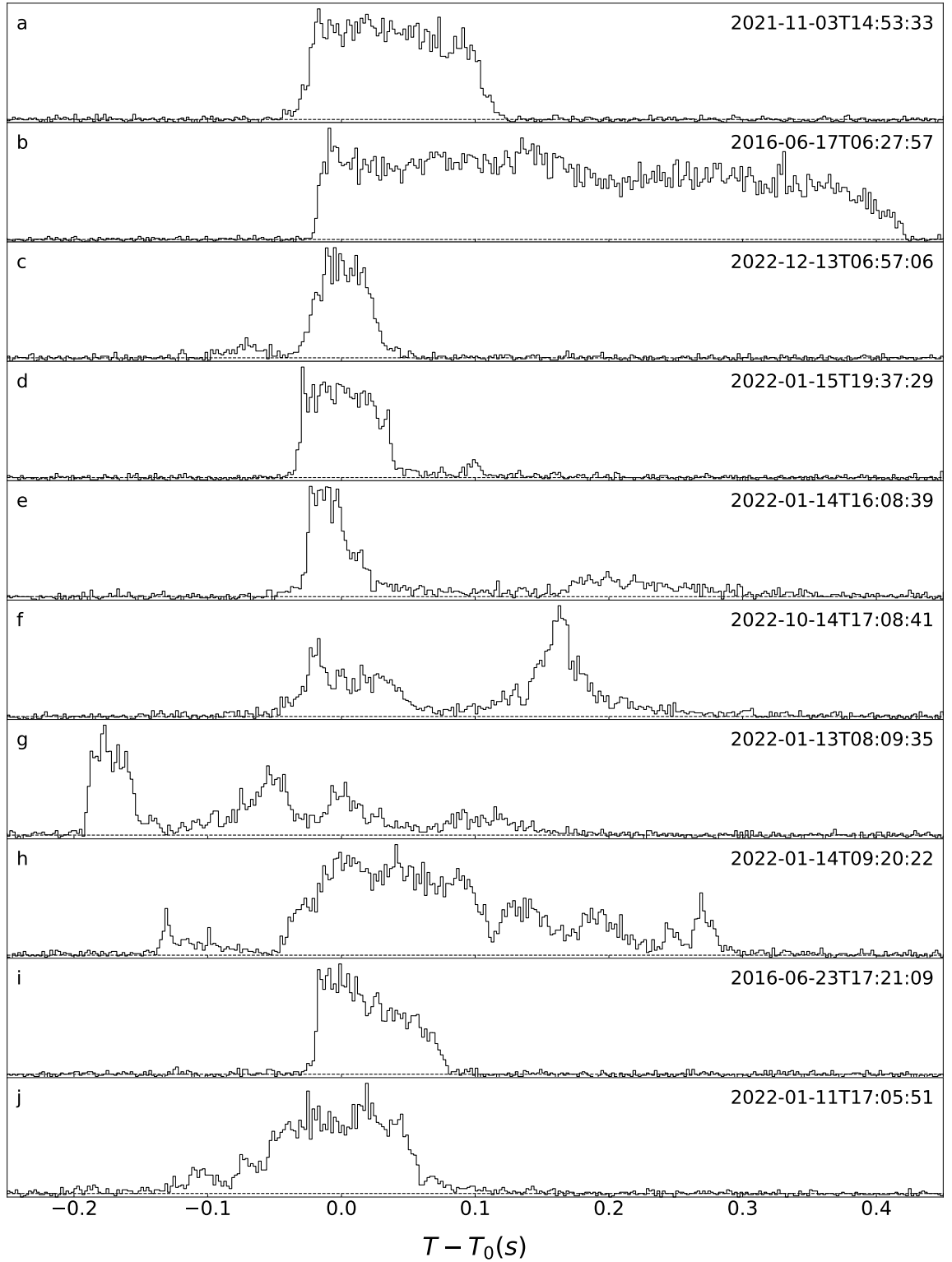


Рисунок 2.4: Временные профили десяти коротких всплесков SGR 1935+3154, демонстрирующие разнообразие их морфологии. Каждый всплеск обозначен буквой (a-j) с указанием даты и времени регистрации в UTC. Ось абсцисс - время относительно триггера T_0 в секундах.

ствовало значимое излучение. Для $\sim 60\%$ всплесков рассматриваемой выборки интегральный спектр состоит из подгруппы первых трех спектров с временем накопления 64 мс на интервале от 0 до 0.192 с относительно триггера. Примерно в $\sim 20\%$ случаев всплески демонстрировали значимое излучение в пятом спектре (0.256 – 8.192 с). Для 4% ярких событий границы интервалов накопления спектров, начиная с пятого, были изменены системой адаптации.

Спектральный анализ осуществлялся с использованием пакета XSPEC версии 12.10.1 [148]. Аппроксимация спектров проводилась методом минимизации статистики χ^2 , обеспечивающим оценку качества соответствия модели данным. Каналы исходных спектров группировались таким образом, чтобы каждый канал содержал не менее 10 отсчетов, что обеспечивало корректность использования статистики. В качестве нормировки модели CPL (см. далее) использовался поток в диапазоне (20 – 500) кэВ, который вычислялся с использованием в моделях XSPEC нормализующего поток компонента `cflux`. Для аппроксимации спектров применялись две основные модели, которые, как было найдено в предыдущих исследованиях [149, 150, 151, 152, 153], наилучшим образом описывают широкополосные спектры всплесков магнитаров.

Первая модель (2BB²) представляет собой сумму двух компонент излучения со спектром абсолютно черного тела (BB), где нормализация каждой компоненты пропорциональна площади излучающей поверхности:

$$f_{BB}(E) \propto \frac{N \times E^2}{\exp(E/kT) - 1}$$

Эта модель предполагает наличие двух излучающих областей с различными температурами, расположенных на поверхности магнитара или в его магнитосфере. Параметры модели включают температуры kT_1 и kT_2 (в кэВ) и радиусы излучающих областей R_1 и R_2 (в км), где параметр нормализации $N_i = R_i^2/D_{10}^2$, D_{10} - расстояние до источника в единицах 10 кпк.

Вторая модель – степенной закон с экспоненциальным обрезанием в области высоких энергий (CPL), параметризованный через пиковую энергию E_p :

$$f_{CPL}(E) \propto E^\alpha \exp\left(-\frac{(2 + \alpha)E}{E_p}\right),$$

²bbbodyrad+bbbodyrad в XSPEC

где α - степенной индекс, а E_p - пиковая энергия в спектре νF_ν (в кэВ). Эта модель воспроизводит классический ненасыщенный спектр комптонизации, возникающий при многократном рассеянии фотонов низкой энергии горячими электронами в короне до энергии $E \sim kT_e$, соответствующей температуре электронов, после чего формируется квазиэкспоненциальный спад спектра из-за невозможности дальнейшего нагрева.

Дополнительно, все спектры аппроксимировались исторически используемой в описании спектров SGR, простой двухпараметрической моделью теплового тормозного излучения оптически тонкой плазмы (ОТТВ), которая эквивалентна модели CPL с фиксированным индексом $\alpha = -1$. Однако эта модель в большинстве случаев не обеспечивала удовлетворительного соответствия данным и была отвергнута по статистическим критериям. Параметры модели ОТТВ приводятся только для случаев, когда модели 2BB и CPL не позволяли достичь, в силу малой статистики отсчетов, приемлемых ограничений на параметры.

Для каждого спектра модели фитировались независимо с начальными параметрами, основанными на типичных значениях для магнитаров ($\alpha \sim -0.5$, $E_p \sim 30$ кэВ для CPL; $kT_1 \sim 4$ кэВ, $kT_2 \sim 12$ кэВ для 2BB). Доверительные интервалы спектральных параметров определялись для уровня значимости 68%.

Поскольку модель CPL оказывается наиболее универсальной (хорошо описывает спектры подавляющего большинства всплесков), она была использована для расчета интегрального S и пикового F_{peak} потоков энергии. Так как интервал накопления спектра, как правило, отличался от длительности T_{100} , применялась коррекция, которая учитывала излучение вне интервала накопления спектра для вычисления S . Пиковый поток вычислялся путем умножения потока по модели на отношение пиковой скорости счета на временном масштабе 16 мс к средней скорости счета за интервал накопления спектра.

2.4.2 Результаты

Результаты спектрального анализа всплесков SGR 1935+2154 приведены в Таб. 2.4. Всплеск № 30 практически целиком находится в предыстории, и, следовательно, не подлежит полноценному многоканальному спектральному анализу из-за ограничений в данных.

Аппроксимация спектров считалась успешной, если невязки модели были малы ($\chi^2_\nu \leq 3$), а параметры принимали физически допустимые значения и имели ограниченные ошибки. Из 69 проанализированных спектров 67 могут быть описаны хотя бы одной из стандартных для магнитаров моделей: CPL или 2BB. В частности, 20 спектров описываются исключительно моделью CPL, три – только моделью 2BB, а 44 обеими моделями, при этом для 35 из них модель CPL обеспечивает меньшее значение статистики χ^2 . Поскольку модели CPL и 2BB не являются вложенными, прямое сравнение их статистических характеристик затруднено. Результаты моделирования спектров для первой промежуточной вспышки (см. раздел 3.3), а также аналогичные исследования, приведенные в литературе [151, 153] подтверждают отсутствие явного преимущества одной модели над другой с точки зрения качества аппроксимации. Основная причина этого заключается в том, что, учитывая статистику наблюдаемых отсчётов и полученные спектральные параметры, модели CPL и 2BB могут успешно имитировать друг друга (см. Рис 3.4) в относительно жёстком рассматриваемом диапазоне ($\sim 20\text{--}250$ кэВ). В связи с этим в данной работе приводятся результаты, полученные для обеих моделей. Для пяти всплесков, где модель CPL не позволила наложить ограничения на параметры, они были определены с использованием модели ОТТВ. Эти параметры приведены в Таб. 2.4 и использовались для последующего анализа энергетики событий.

Левая панель Рис. 2.5 демонстрирует распределения температур двух компонент модели 2BB для 46 всплесков. Эти распределения аппроксимированы функцией Гаусса со средними значениями 6.0 ± 0.1 кэВ ($\sigma = 1.7 \pm 0.2$ кэВ) для низкотемпературной компоненты kT_1 и 13.0 ± 0.2 кэВ ($\sigma = 2.9 \pm 0.3$ кэВ) для высокотемпературной компоненты kT_2 . Диапазоны температур обеих компонент перекрываются, при этом диапазон температур

горячей компоненты $kT_2 \sim (9 - 31)$ кэВ шире, чем для $kT_1 \sim (3 - 11)$ кэВ. На основе нормализации модели 2BV и предполагаемого расстояния до источника 10 кпк (см. раздел 2.1), рассчитаны радиусы излучающих областей, соответствующие температурам kT_1 и kT_2 . Для низкотемпературной компоненты радиусы варьируются от 2 до 44 км (среднее значение 16.2 ± 5.6 км), тогда как для высокотемпературной – от 0.1 до 11 км (среднее значение 3.0 ± 1.6 км). Эти значения указывают на компактность горячих зон, сопоставимых с размерами нейтронной звезды, и более протяженный характер менее горячих областей. Распределения радиусов представлены на левой панели Рис. 2.6.

Правая панель Рис. 2.5 иллюстрирует корреляцию между температурами kT_1 и kT_2 , а правая панель Рис. 2.6 – корреляцию между радиусами излучающих областей R_1 и R_2 . Для количественной оценки корреляций применялся метод бутстрэпа: с учетом ошибок параметров было сгенерировано 10 000 наборов данных, для каждого из которых вычислялись коэффициенты корреляции Спирмена r и вероятности случайного совпадения P . На основе распределения коэффициентов определены средние значения r , их доверительные интервалы, а также значения P , отражающие статистическую значимость корреляций. Обе корреляции являются умеренными с $r = 0.47$ для температур и $r = 0.53$ для радиусов и значимыми на уровне $> 3\sigma$. При аппроксимации степенным законом наклоны корреляций составляют 0.97 ± 0.12 для температур и 1.04 ± 0.08 для радиусов.

Распределения параметров модели CPL для 64 всплесков представлены на Рис. 2.7. Пиковая энергия E_p варьируется в диапазоне от ~ 20 до ~ 50 кэВ, со средним значением 35.7 кэВ; для пекулярного всплеска, ассоциированного с FRB 200428, E_p достигает ~ 85 кэВ. Аппроксимация распределения E_p функцией Гаусса дает среднее значение 34.4 ± 0.2 кэВ и стандартное отклонение $\sigma = 5.7 \pm 0.2$ кэВ. Фотонный индекс α варьируется в выборке в широком диапазоне значений от -1.3 до 1.0 и также следует распределению Гаусса со средним значением 0.02 ± 0.03 ($\sigma = 0.49 \pm 0.03$).

Для всех 69 всплесков, доступных для многоканального спектрального анализа, были определены значения интегрального S и пикового потока F_{peak} . Результаты представлены в Таб. 2.1. Распределения S и F_{peak} проиллюстрированы на Рис. 2.8. Распределение интегрального потока S охва-

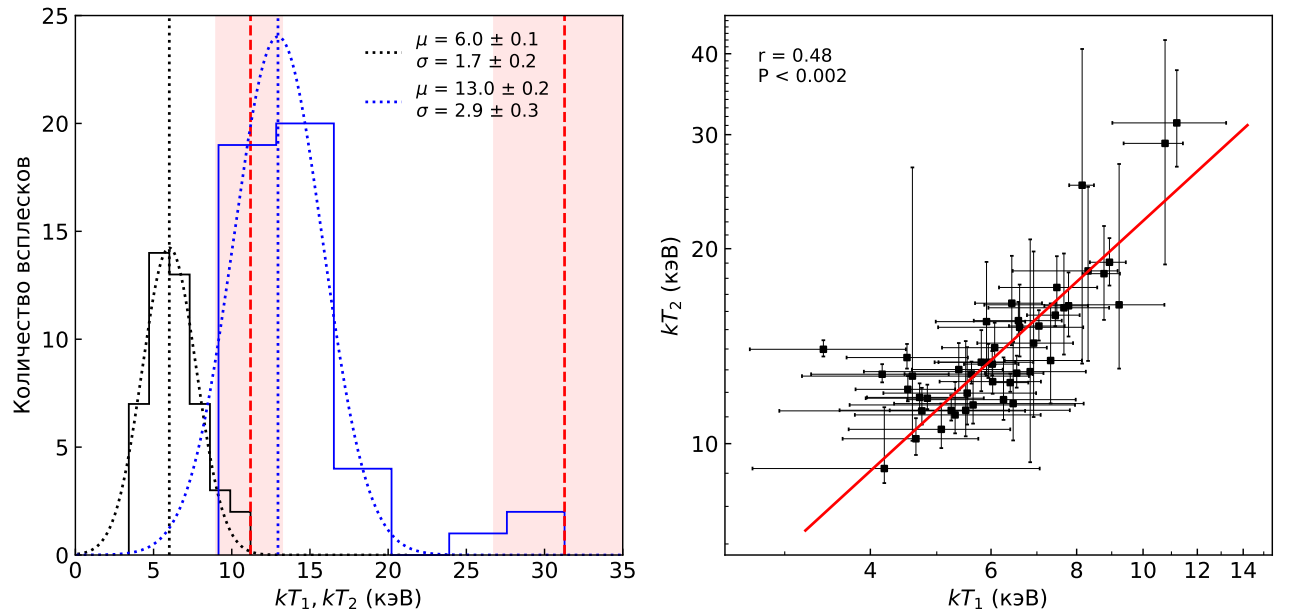


Рисунок 2.5: Слева: Распределения температур для двух компонент модели 2ВВ. Пунктирные кривые представляют гауссовские аппроксимации распределений с вертикальными линиями обозначающими их средние значения, красным цветом указаны области значения параметров с ошибками на уровне значимости 68% для всплеска, связанного с FRB 200428. Справа: корреляция между температурами двух компонент модели 2ВВ. В левом верхнем углу указан коэффициент корреляции Спирмена r и вероятность случайного совпадения P . Красная сплошная линия соответствует наилучшей аппроксимации степенным законом.

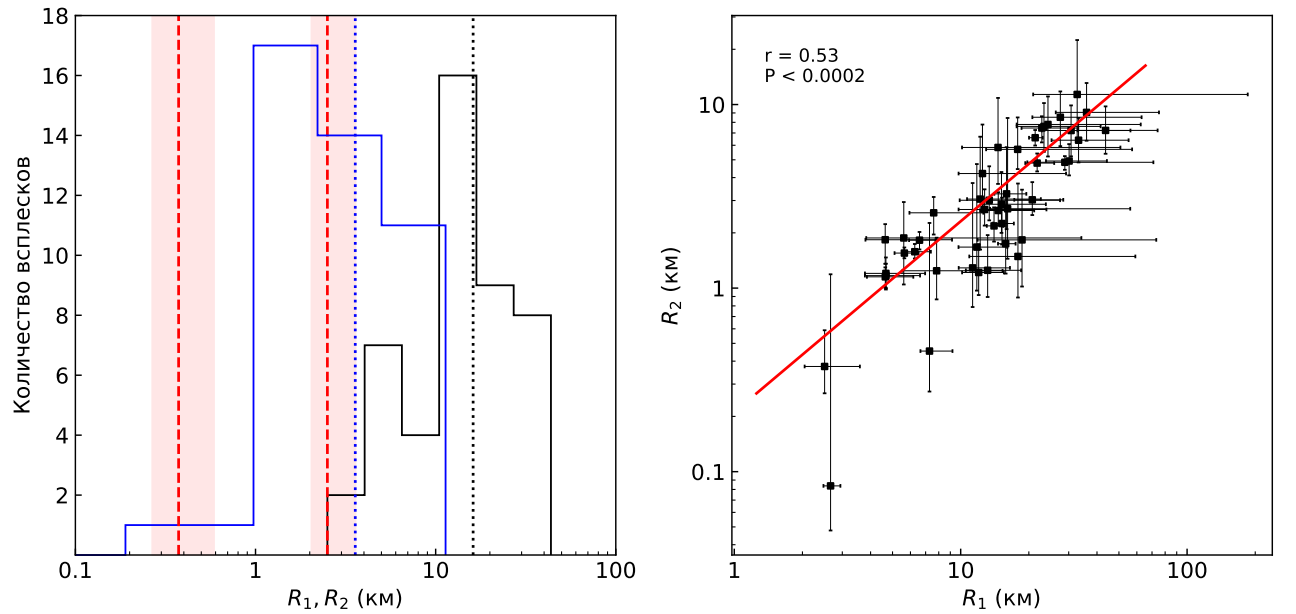


Рисунок 2.6: Распределения радиусов излучающих областей для низкотемпературной (черным) и высокотемпературной (синим) компоненты модели 2BB. Вертикальные линии обозначают их средние значения, красным цветом указаны области значения параметров с ошибками на уровне значимости 68% для всплеска, связанного с FRB 200428. Справа: корреляция между радиусами излучающих областей двух компонент модели 2BB. В левом верхнем углу указан коэффициент корреляции Спирмена r и вероятность случайного совпадения P . Красная сплошная линия соответствует наилучшей аппроксимации степенным законом

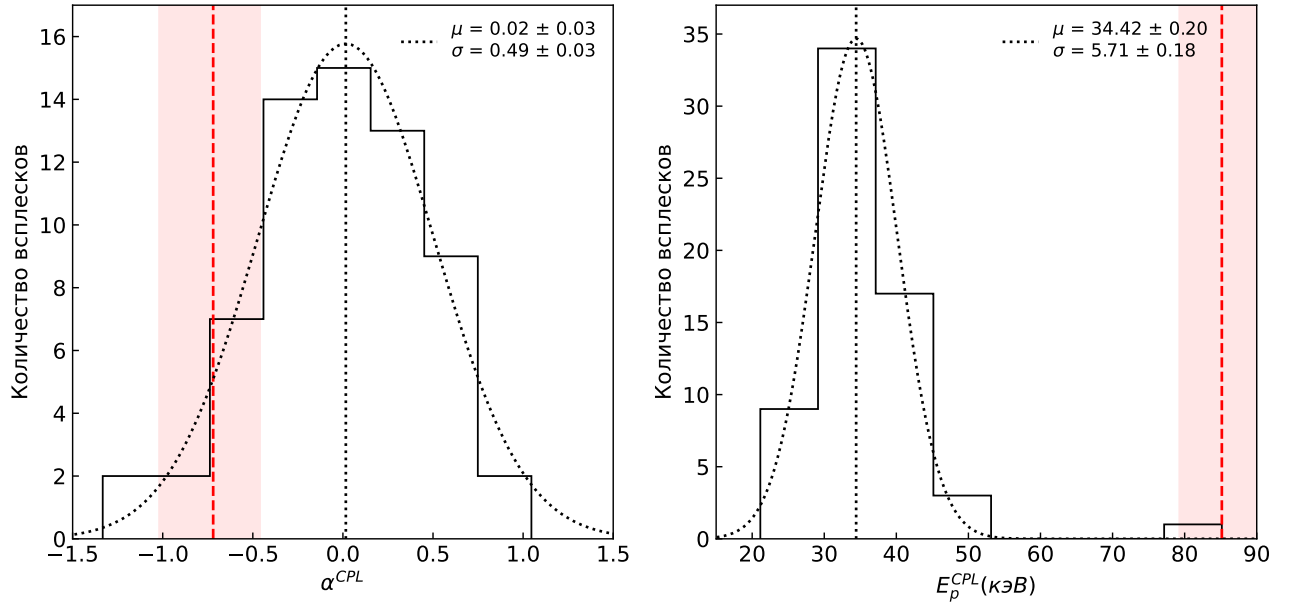


Рисунок 2.7: Распределения спектральных параметров α (слева) и E_p (справа) модели CPL. Пунктирные кривые соответствуют гауссовским аппроксимациям распределений с вертикальными линиями обозначающими их средние значения, красным цветом указаны области значения параметров с ошибками на уровне значимости 68% для всплеска, связанного с FRB 200428.

тывает значения $\sim (4 - 30) \times 10^{-6}$ эрг/см² со средним (медианным) значением $3.7(1.9) \times 10^{-6}$ эрг/см². Аппроксимация распределения S логнормальной функцией дает среднее значение $(2.0 \pm 0.6) \times 10^{-6}$ эрг/см². Пиковый поток F_{peak} варьируется в диапазоне $\sim (0.8 - 4) \times 10^{-5}$ эрг/см²/с со средним (медианным) значением $1.7(1.6) \times 10^{-5}$ эрг/см²/с. Распределение также аппроксимируется логнормальной функцией со средним значением $(1.6 \pm 0.1) \times 10^{-5}$ эрг/см²/с.

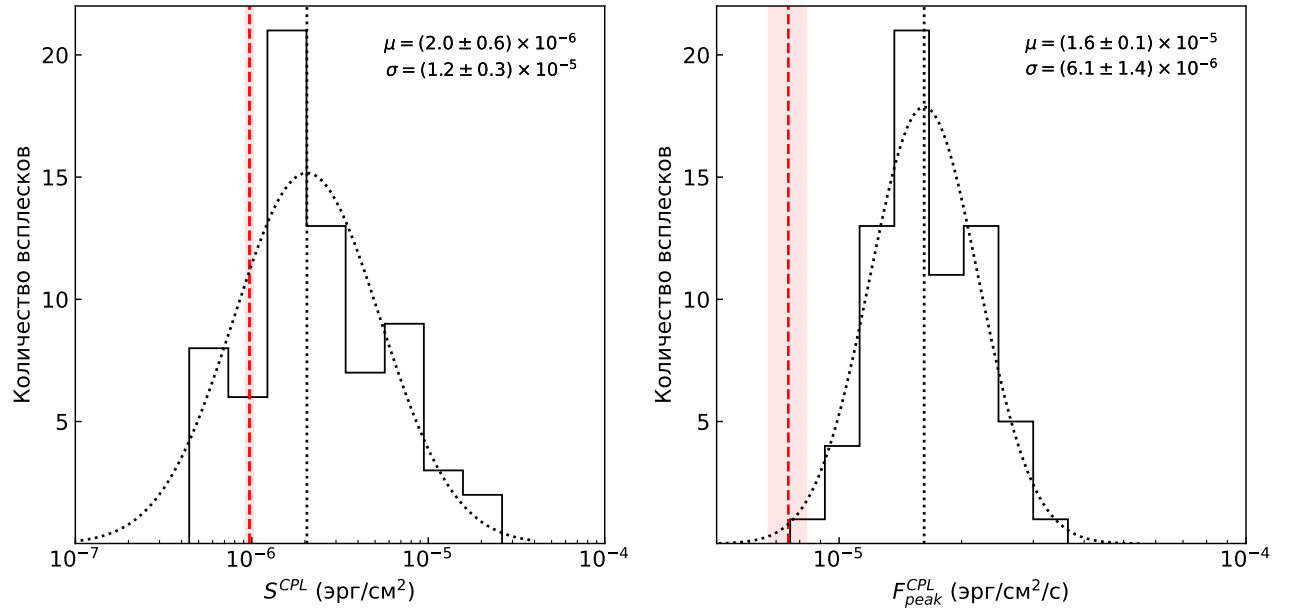


Рисунок 2.8: Распределения интегральных (слева) и пиковых (справа) энергетических потоков. Пунктирные кривые представляют гауссовские аппроксимации распределений с вертикальными линиями обозначающими их средние значения, красным цветом указаны области значения потоков с ошибками на уровне значимости 68% для всплеска, связанного с FRB 200428.

Таблица 2.4: Спектральные параметры всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд

N	Триггерное время (UTC)	CPL параметры			2BV параметры				
		α	E_p (кэВ)	χ^2/dof	kT_1 (кэВ)	R_1 (км)	kT_2 (кэВ)	R_2 (км)	χ^2/dof
1	2015-04-12T11:24:24.683	$0.20^{+0.08}_{-0.08}$	$35.7^{+0.3}_{-0.3}$	32.4/31	$6.4^{+0.4}_{-0.4}$	$21.3^{+1.7}_{-1.3}$	$12.4^{+0.4}_{-0.4}$	$6.6^{+0.7}_{-0.6}$	37.0/30
2	2016-05-18T09:09:24.102	$0.21^{+0.35}_{-0.33}$	$31.9^{+1.5}_{-1.7}$	17.6/16	$5.1^{+1.3}_{-1.4}$	$27.6^{+35.4}_{-6.8}$	$10.5^{+1.0}_{-0.7}$	$8.5^{+3.3}_{-2.6}$	17.2/15
3	2016-05-19T06:21:19.193	$0.49^{+0.45}_{-0.42}$	$37.1^{+1.5}_{-1.7}$	14.2/17	...	...	...	...	...
4	2016-05-20T05:21:33.825	$0.13^{+0.45}_{-0.42}$	$34.0^{+1.9}_{-2.2}$	21.3/17	$5.5^{+2.3}_{-1.9}$	$17.9^{+39.3}_{-4.9}$	$11.3^{+3.1}_{-1.0}$	$5.7^{+2.8}_{-1.2}$	21.7/16
5	2016-06-17T06:27:57.257	$-0.24^{+0.19}_{-0.18}$	$41.4^{+1.1}_{-1.2}$	38.9/34	$6.1^{+1.2}_{-1.0}$	$4.7^{+1.9}_{-0.9}$	$14.1^{+1.3}_{-0.8}$	$1.2^{+0.2}_{-0.2}$	43.9/33
6	2016-06-20T15:16:37.726	$0.22^{+0.23}_{-0.22}$	$36.9^{+1.1}_{-1.2}$	36.2/20	...	...	...	...	...
7	2016-06-23T17:21:09.561	$-0.03^{+0.36}_{-0.34}$	$45.0^{+1.9}_{-2.0}$	28.5/21	$10.8^{+0.7}_{-1.4}$	$7.3^{+1.9}_{-0.6}$	$29.1^{+12.9}_{-10.2}$	$0.5^{+1.8}_{-0.2}$	28.9/20
8	2016-06-23T21:20:49.524	$0.80^{+0.58}_{-0.54}$	$31.9^{+1.3}_{-1.5}$	27.3/34	$8.1^{+0.3}_{-0.3}$	$2.7^{+0.3}_{-0.2}$	$25.1^{+15.6}_{-11.8}$	$0.1^{+1.1}_{-0.0}$	26.0/33
9	2016-06-26T09:40:15.618	$-0.03^{+1.01}_{-0.79}$	$30.0^{+3.2}_{-4.8}$	7.5/11	$6.9^{+1.0}_{-1.2}$	$11.8^{+4.3}_{-2.0}$	$14.3^{+5.5}_{-3.3}$	$1.7^{+3.1}_{-0.7}$	6.0/10
10	2016-06-26T13:54:33.909	$-0.20^{+0.14}_{-0.13}$	$37.5^{+0.8}_{-0.8}$	35.7/34	$6.0^{+0.6}_{-0.5}$	$6.3^{+1.1}_{-0.7}$	$13.3^{+0.6}_{-0.5}$	$1.6^{+0.2}_{-0.1}$	38.5/33
11	2016-06-26T18:22:27.124	$0.51^{+0.25}_{-0.24}$	$38.4^{+0.9}_{-0.9}$	31.3/34	$4.8^{+2.0}_{-1.8}$	$5.6^{+28.5}_{-1.8}$	$11.2^{+1.0}_{-0.5}$	$1.9^{+1.1}_{-0.8}$	31.0/33
12	2016-07-21T00:55:48.553	$0.20^{+1.62}_{-1.28}$	$30.3^{+4.5}_{-8.6}$	5.3/9	...	...	...	...	...
13	2016-07-21T09:36:17.188	$0.54^{+0.44}_{-0.42}$	$30.5^{+1.4}_{-1.6}$	20.3/17	$4.2^{+2.9}_{-1.5}$	$32.7^{+152.6}_{-11.8}$	$9.2^{+2.2}_{-0.5}$	$11.4^{+11.1}_{-4.8}$	20.2/16
14	2019-11-04T10:44:26.612	$0.52^{+0.52}_{-0.48}$	$34.6^{+1.8}_{-2.1}$	5.9/14	...	...	...	...	...
15	2019-11-05T06:11:08.832	$-0.36^{+0.19}_{-0.18}$	$41.1^{+1.3}_{-1.4}$	27.0/23	$8.9^{+0.5}_{-0.6}$	$14.0^{+1.4}_{-1.0}$	$19.1^{+1.7}_{-1.5}$	$2.2^{+0.6}_{-0.4}$	26.8/22
16	2020-04-10T09:43:52.256	$-0.16^{+0.58}_{-0.53}$	$27.7^{+2.6}_{-3.5}$	14.5/14	$6.8^{+1.4}_{-2.9}$	$16.1^{+40.0}_{-2.6}$	$12.9^{+7.8}_{-3.6}$	$2.7^{+5.7}_{-1.3}$	14.9/13
17	2020-04-22T08:53:16.933	$-0.24^{+0.15}_{-0.14}$	$46.1^{+0.9}_{-1.0}$	33.3/33	$6.6^{+1.0}_{-0.9}$	$4.6^{+1.5}_{-0.8}$	$15.5^{+1.1}_{-0.7}$	$1.2^{+0.1}_{-0.1}$	41.9/32
18	2020-04-27T21:59:22.174	-1.0	$22.3^{+3.1}_{-2.7}$	12.9/13	$4.6^{+2.2}_{-1.4}$	$18.7^{+54.4}_{-6.8}$	$12.7^{+14.0}_{-2.6}$	$1.8^{+1.6}_{-0.8}$	12.1/11
19	2020-04-27T18:31:36.729	$0.59^{+0.55}_{-0.51}$	$32.7^{+2.0}_{-2.4}$	24.2/13	...	...	...	...	...

Таблица 2.4: Спектральные параметры всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд

N	Триггерное время (UTC)	CPL параметры			2BV параметры				
		α	E_p (кэВ)	χ^2/dof	kT_1 (кэВ)	R_1 (км)	kT_2 (кэВ)	R_2 (км)	χ^2/dof
20	2020-04-27T19:43:44.348	$0.15^{+0.43}_{-0.40}$	$32.6^{+1.7}_{-2.1}$	23.2/16	$7.3^{+0.8}_{-1.0}$	$15.9^{+3.5}_{-1.9}$	$13.4^{+3.0}_{-1.9}$	$3.3^{+2.6}_{-1.2}$	21.6/15
21	2020-04-27T23:44:31.654	$-1.33^{+0.98}_{-0.52}$	$24.1^{+10.4}_{-24.1}$	6.9/10	...	...	...	...	...
22	2020-04-28T14:34:24.084	$-0.72^{+0.33}_{-0.31}$	$85.2^{+7.0}_{-6.0}$	14.0/24	$11.2^{+3.3}_{-3.8}$	$2.5^{+3.0}_{-0.6}$	$31.3^{+12.2}_{-6.7}$	$0.4^{+0.4}_{-0.1}$	15.5/23
23	2020-04-29T20:47:27.792	$0.24^{+0.37}_{-0.35}$	$34.2^{+1.6}_{-1.8}$	14.9/17	$5.3^{+1.8}_{-1.5}$	$24.3^{+38.1}_{-6.6}$	$11.1^{+1.4}_{-0.7}$	$7.8^{+3.3}_{-2.6}$	14.9/16
24	2020-05-10T06:12:02.624	$0.01^{+0.18}_{-0.17}$	$48.5^{+1.0}_{-1.1}$	65.9/33	$3.4^{+1.1}_{-0.7}$	$17.9^{+41.2}_{-7.0}$	$14.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.5^{+2.2}_{-0.6}$	69.7/32
25	2020-05-10T21:51:17.280	$0.56^{+1.54}_{-1.40}$	$28.7^{+3.6}_{-7.2}$	10.1/8	...	...	...	...	...
26	2021-01-27T06:50:16.685	$-0.21^{+0.70}_{-0.62}$	$31.2^{+3.6}_{-5.1}$	12.5/11	...	...	...	...	...
27	2021-01-29T06:59:56.932	$-0.33^{+0.24}_{-0.23}$	$33.7^{+1.7}_{-1.9}$	13.6/19	$4.5^{+0.8}_{-0.7}$	$43.7^{+30.5}_{-10.8}$	$12.1^{+0.6}_{-0.5}$	$7.2^{+2.5}_{-1.8}$	9.6/18
28	2021-01-29T10:35:35.984	$-0.16^{+0.47}_{-0.44}$	$29.1^{+2.3}_{-2.9}$	14.1/17	...	...	...	...	...
29	2021-01-30T17:40:50.688	$-0.62^{+0.29}_{-0.27}$	$41.1^{+2.5}_{-3.0}$	26.1/19	$7.5^{+1.1}_{-1.3}$	$14.7^{+6.5}_{-2.5}$	$17.4^{+2.0}_{-1.8}$	$2.6^{+0.7}_{-0.4}$	28.6/18
31	2021-07-06T17:14:53.331	$-0.54^{+1.18}_{-0.93}$	$33.2^{+6.0}_{-12.3}$	5.0/11	...	...	...	...	...
30	2021-02-02T12:54:22.929	...	...	...	...	...	...	...	...
32	2021-07-07T00:33:35.644	$0.65^{+0.48}_{-0.45}$	$38.2^{+1.7}_{-2.0}$	12.1/16	$5.6^{+2.3}_{-1.9}$	$14.6^{+36.1}_{-4.5}$	$11.5^{+1.4}_{-0.7}$	$5.8^{+5.0}_{-2.1}$	11.5/15
33	2021-07-10T20:26:08.532	$0.01^{+1.09}_{-0.95}$	$28.5^{+4.3}_{-7.0}$	6.0/10	...	...	...	...	...
34	2021-08-05T00:08:59.958	$0.34^{+0.61}_{-0.55}$	$33.6^{+2.3}_{-2.8}$	13.0/14	$6.5^{+1.7}_{-2.1}$	$12.5^{+16.7}_{-2.7}$	$11.5^{+2.8}_{-1.4}$	$4.2^{+3.6}_{-1.6}$	12.8/13
35	2021-09-10T00:45:50.499	$-0.08^{+0.10}_{-0.09}$	$45.7^{+0.6}_{-0.6}$	47.0/32	$7.4^{+0.6}_{-0.7}$	$5.6^{+0.9}_{-0.5}$	$15.8^{+0.7}_{-0.6}$	$1.6^{+0.1}_{-0.1}$	60.9/31
36	2021-09-11T15:06:46.825	$0.44^{+0.20}_{-0.19}$	$42.3^{+0.9}_{-0.9}$	31.8/21	$5.6^{+1.3}_{-1.1}$	$23.3^{+18.2}_{-5.7}$	$12.8^{+0.6}_{-0.4}$	$7.6^{+2.6}_{-2.1}$	30.9/20
37	2021-09-11T17:01:14.025	$0.40^{+0.23}_{-0.23}$	$36.8^{+0.8}_{-0.9}$	40.0/32	$6.3^{+1.7}_{-1.7}$	$4.6^{+4.5}_{-0.8}$	$11.7^{+1.9}_{-0.8}$	$1.8^{+0.4}_{-0.5}$	41.0/31
38	2021-09-12T06:51:17.185	$0.28^{+0.21}_{-0.20}$	$38.6^{+1.0}_{-1.1}$	18.8/20	$6.0^{+1.1}_{-1.0}$	$22.8^{+10.2}_{-4.3}$	$12.5^{+0.7}_{-0.5}$	$7.4^{+1.2}_{-1.2}$	18.8/20

Таблица 2.4: Спектральные параметры всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд

N	Триггерное время (UTC)	CPL параметры			2BV параметры				
		α	E_p (кэВ)	χ^2/dof	kT_1 (кэВ)	R_1 (км)	kT_2 (кэВ)	R_2 (км)	χ^2/dof
39	2021-09-12T08:01:44.121	$-0.10^{+0.14}_{-0.13}$	$35.1^{+0.7}_{-0.7}$	49.9/32	$6.5^{+0.6}_{-0.7}$	$6.6^{+1.2}_{-0.7}$	$12.8^{+0.8}_{-0.6}$	$1.8^{+0.2}_{-0.2}$	56.1/31
40	2021-09-22T20:12:19.639	$-0.48^{+0.48}_{-0.44}$	$33.5^{+3.0}_{-4.1}$	13.2/17	$8.3^{+0.9}_{-1.9}$	$11.3^{+5.2}_{-1.5}$	$18.5^{+6.4}_{-5.1}$	$1.3^{+2.4}_{-0.5}$	13.4/16
41	2021-10-08T15:57:48.742	$-0.42^{+0.42}_{-0.40}$	$31.2^{+2.9}_{-3.7}$	9.8/16	...	...	...	...	...
42	2021-11-03T14:53:33.626	$0.34^{+0.32}_{-0.31}$	$43.4^{+1.4}_{-1.5}$	10.0/18	$9.2^{+1.5}_{-3.4}$	$12.2^{+10.4}_{-1.5}$	$16.4^{+10.6}_{-3.3}$	$3.1^{+3.6}_{-1.4}$	10.5/17
43	2021-12-24T03:42:30.516	$0.33^{+0.16}_{-0.16}$	$36.3^{+0.6}_{-0.7}$	39.0/32	$5.2^{+1.1}_{-1.0}$	$7.6^{+5.0}_{-1.7}$	$11.3^{+0.6}_{-0.4}$	$2.6^{+0.6}_{-0.6}$	40.4/31
44	2021-12-29T16:41:22.391	$-0.48^{+0.42}_{-0.38}$	$37.1^{+3.0}_{-3.8}$	10.9/16	$7.7^{+1.3}_{-1.7}$	$15.1^{+8.6}_{-2.6}$	$16.2^{+3.5}_{-2.5}$	$2.9^{+1.4}_{-0.9}$	11.7/15
45	2022-01-11T17:05:51.690	$0.02^{+0.54}_{-0.48}$	$32.1^{+2.4}_{-3.1}$	15.2/14	...	...	...	...	...
46	2022-01-12T08:39:21.806	$0.69^{+0.32}_{-0.30}$	$38.2^{+1.0}_{-1.1}$	57.6/32	...	...	...	...	...
47	2022-01-13T08:09:35.444	-1.0	$22.9^{+2.0}_{-1.9}$	22.4/17	$5.9^{+0.8}_{-0.9}$	$13.2^{+5.3}_{-2.6}$	$15.4^{+3.6}_{-2.7}$	$1.3^{+0.7}_{-0.4}$	20.4/15
48	2022-01-13T12:52:58.912	$1.05^{+0.88}_{-0.76}$	$31.5^{+2.0}_{-2.6}$	7.5/11	...	...	...	...	...
49	2022-01-13T22:25:50.270	$-0.38^{+0.58}_{-0.53}$	$30.7^{+3.2}_{-4.5}$	12.8/17	$5.5^{+1.4}_{-1.4}$	$13.4^{+14.1}_{-3.5}$	$12.0^{+2.1}_{-1.3}$	$3.0^{+1.6}_{-0.7}$	12.3/16
50	2022-01-14T09:20:22.126	$-0.39^{+0.26}_{-0.25}$	$33.4^{+1.6}_{-1.9}$	15.9/21	$7.8^{+0.5}_{-0.6}$	$15.2^{+1.9}_{-1.3}$	$16.3^{+2.1}_{-1.7}$	$2.2^{+0.9}_{-0.5}$	12.4/20
51	2022-01-14T16:08:39.186	-1.0	$25.4^{+1.6}_{-1.6}$	18.5/20	$6.4^{+0.7}_{-0.7}$	$12.0^{+3.5}_{-1.9}$	$16.5^{+3.0}_{-2.3}$	$1.2^{+0.5}_{-0.3}$	16.4/18
52	2022-01-14T19:56:48.322	$-0.26^{+0.23}_{-0.22}$	$42.6^{+1.4}_{-1.6}$	33.8/32	$4.5^{+1.0}_{-0.8}$	$7.8^{+7.5}_{-2.3}$	$13.6^{+0.7}_{-0.5}$	$1.2^{+0.6}_{-0.4}$	33.5/31
53	2022-01-15T08:25:52.115	-1.0	$24.2^{+1.9}_{-1.8}$	21.3/16	...	...	...	...	...
54	2022-01-15T17:21:55.176	$-0.53^{+0.35}_{-0.33}$	$38.8^{+2.6}_{-3.3}$	10.3/18	$6.6^{+1.6}_{-1.6}$	$12.8^{+11.2}_{-3.0}$	$15.1^{+2.5}_{-1.5}$	$2.7^{+0.8}_{-0.5}$	12.0/17
55	2022-01-15T19:37:29.225	$-1.00^{+0.45}_{-0.42}$	$28.1^{+4.8}_{-7.1}$	16.9/16	...	...	...	...	...
56	2022-01-16T14:09:34.968	$0.02^{+0.40}_{-0.38}$	$29.3^{+1.9}_{-2.3}$	12.8/14	$4.7^{+1.1}_{-1.0}$	$36.0^{+39.2}_{-9.7}$	$10.2^{+0.8}_{-0.6}$	$9.1^{+4.0}_{-2.7}$	11.4/13
57	2022-01-20T09:51:15.962	$0.17^{+0.16}_{-0.16}$	$43.0^{+0.8}_{-0.8}$	44.2/25	$4.2^{+1.0}_{-0.9}$	$28.8^{+42.1}_{-9.2}$	$12.8^{+0.5}_{-0.4}$	$4.8^{+0.4}_{-0.4}$	38.7/24

Таблица 2.4: Спектральные параметры всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд

N	Триггерное время (UTC)	CPL параметры			2BV параметры				
		α	E_p (кэВ)	χ^2/dof	kT_1 (кэВ)	R_1 (км)	kT_2 (кэВ)	R_2 (км)	χ^2/dof
58	2022-01-23T20:06:34.602	$0.18^{+0.25}_{-0.24}$	$32.9^{+1.2}_{-1.3}$	25.6/19	...	...	...	...	...
59	2022-05-25T07:10:16.580	$0.11^{+0.36}_{-0.34}$	$36.0^{+1.5}_{-1.8}$	19.3/18	$8.8^{+0.5}_{-0.6}$	$15.8^{+1.7}_{-1.2}$	$18.3^{+3.4}_{-2.8}$	$1.7^{+1.4}_{-0.5}$	15.4/17
60	2022-06-03T23:48:53.643	$0.07^{+0.23}_{-0.22}$	$36.0^{+1.2}_{-1.3}$	22.7/20	$4.8^{+1.0}_{-0.9}$	$30.7^{+25.5}_{-7.9}$	$11.8^{+0.6}_{-0.4}$	$7.2^{+2.7}_{-2.0}$	21.0/19
61	2022-06-16T07:11:55.887	$-0.34^{+0.17}_{-0.16}$	$38.8^{+1.2}_{-1.4}$	16.4/21	$7.0^{+0.6}_{-0.7}$	$21.8^{+4.1}_{-2.5}$	$15.2^{+0.9}_{-0.8}$	$4.8^{+0.6}_{-0.5}$	18.1/20
62	2022-10-12T15:42:32.646	$0.54^{+0.40}_{-0.38}$	$29.4^{+1.4}_{-1.6}$	8.8/17	...	...	...	...	...
63	2022-10-13T02:02:46.180	$-0.20^{+0.24}_{-0.23}$	$33.3^{+1.5}_{-1.7}$	24.2/19	$4.7^{+0.8}_{-0.8}$	$33.2^{+22.0}_{-8.0}$	$11.8^{+0.6}_{-0.5}$	$6.4^{+2.1}_{-1.6}$	20.8/18
64	2022-10-13T22:41:30.645	$-0.05^{+0.24}_{-0.23}$	$39.2^{+1.3}_{-1.4}$	41.4/32	$5.9^{+1.0}_{-1.0}$	$4.7^{+2.3}_{-0.9}$	$13.4^{+0.9}_{-0.7}$	$1.2^{+0.3}_{-0.2}$	39.6/31
65	2022-10-14T07:12:29.934	$-1.01^{+0.33}_{-0.31}$	$26.6^{+3.5}_{-4.7}$	22.3/18	$5.4^{+0.9}_{-0.8}$	$30.1^{+14.1}_{-6.3}$	$13.0^{+1.3}_{-0.9}$	$4.9^{+1.2}_{-0.8}$	23.7/17
66	2022-10-14T13:54:12.142	-1.0	$20.5^{+1.8}_{-1.8}$	11.3/12	...	...	...	...	...
67	2022-10-14T17:08:41.260	$-1.20^{+0.33}_{-0.30}$	$21.1^{+4.0}_{-5.3}$	17.4/19	$5.8^{+0.7}_{-0.8}$	$20.7^{+7.7}_{-3.5}$	$13.4^{+1.6}_{-1.3}$	$3.0^{+0.8}_{-0.5}$	19.2/18
68	2022-10-17T11:14:43.010	$-0.67^{+0.38}_{-0.36}$	$33.7^{+3.0}_{-4.0}$	14.2/16	...	...	...	...	...
69	2022-11-09T16:06:08.083	$-0.07^{+0.53}_{-0.49}$	$28.2^{+2.6}_{-3.3}$	25.6/14	...	...	...	...	...
70	2022-12-13T06:57:06.883	$0.12^{+0.75}_{-0.66}$	$36.6^{+2.9}_{-3.9}$	14.8/11	...	...	...	...	...

2.5 Заключение

В главе проведена систематизация данных наблюдений магнитара SGR 1935+2154, полученных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд за период активности источника в 2015–2022 гг. Для 70 всплесков сформированной выборки выполнен временной и спектральный анализ, вычислены интегральные и пиковые потоки. На основании полученных результатов построены распределения временных, спектральных и энергетических параметров.

В главе получены следующие результаты:

1. Сформирована выборка из 70 ярких всплесков магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд в период с момента открытия источника в 2014 году по конец 2022 года. Около 13 % событий в данной выборке не были зафиксированы другими инструментами (на основе доступных публичных данных).
2. Для каждого всплеска в сформированной выборке на основе анализа временных профилей определены временные параметры: полная длительность T_{100} , а также длительности T_{90} и T_{50} . Построенные распределения длительностей для всей выборки хорошо согласуются с данными для других магнитаров. Средние значения составляют $T_{100} \sim 0.3$ с, $T_{90} \sim 0.25$ с и $T_{50} \sim 0.15$ с. Сравнение длительностей всплесков в разные периоды активности не выявило значимой эволюции временных параметров. Показано разнообразие морфологии временных профилей, проявляющееся преимущественно в период активности источника в конце 2021 – начале 2022 года.
3. Для 69 анализируемых спектров, доступных для многоканального анализа, была проведена аппроксимация с использованием основных стандартных моделей для описания излучения магнитаров: модели двух компонент абсолютно черного тела (2BB) и степенного закона с экспоненциальным обрезанием в области высоких энергий (CPL). В ре-

зультате 44 спектра хорошо описываются обеими моделями, демонстрируя их взаимозаменяемость в жёстком энергетическом диапазоне $\sim 20 - 250$ кэВ, где формы спектральных аппроксимаций частично воспроизводят друг друга; для 20 спектров ограниченные оценки параметров и их ошибок удалось получить только в рамках модели CPL (модель 2BV приводила к большим неопределенностям параметров), а для 3 — только с использованием 2BV. В двух случаях, где ни одна из основных моделей не позволила наложить ограничения на параметры, применена двухпараметрическая модель теплового тормозного излучения оптически тонкой плазмы (ОТТВ), параметры которой использованы в дальнейшем анализе энергетики данных событий. Полученные распределения спектральных и энергетических параметров для всей выборки являются типичными среди других магнитаров [147].

По материалам Главы 2 на защиту выносится следующее положение:

- Временные, спектральные и энергетические характеристики 70 всплесков от магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд.

Результаты частично отражены в публикациях:

- A. V. Kozlova et al. Properties of Konus-Wind SGR bursts // Journal of Physics: Conference Series, Volume 932, article id. 012026, 2017;
- A. Ridnaia et al. A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst // Nat. Astron., v.5, 4, 2021, p. 372 - 377

Они также опубликованы в многочисленных циркулярах GCN и детально представлены на сайте лаборатории <https://www.ioffe.ru/LEA/SGR/index.html>

Глава 3

Первая промежуточная вспышка SGR 1935+2154

Первая промежуточная вспышка от магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированная 12 апреля 2015 года, стала первым событием данного источника, зарегистрированным в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд* (№1 в Таб. 2.1). Вспышка выделяется как наиболее продолжительная и яркая по интегральному потоку излучения среди всех всплесков, зафиксированных от SGR 1935+2154.

В данной главе представлены результаты детального анализа данных, полученных в эксперименте *Конус-Винд*, включая локализацию вспышки, временной и спектральный анализ, оценку энергетических характеристик и поиск квазипериодических осцилляций.

3.1 Локализация

Помимо эксперимента *Конус-Винд*, вспышка была зарегистрирована тремя другими инструментами межпланетной сети IPN: SPI-ACS на борту *INTEGRAL*, GRNS на *MESSENGER* и HEND на *Mars-Odyssey*. Это позволило с помощью метода триангуляции [154] определить область локализации вспышки площадью 280 квадратных угловых минут с центром в координатах $R.A.(J2000) = 19^h34^m55^s$, $Decl.(J2000) = +21^\circ51'49''$. Максимальный размер области составляет 1.34° , минимальный – $6.72'$. Положение SGR 1935+2154 [155] находится внутри этой области, на расстоянии $1.97'$ от её центра (см. Рис. 3.1).

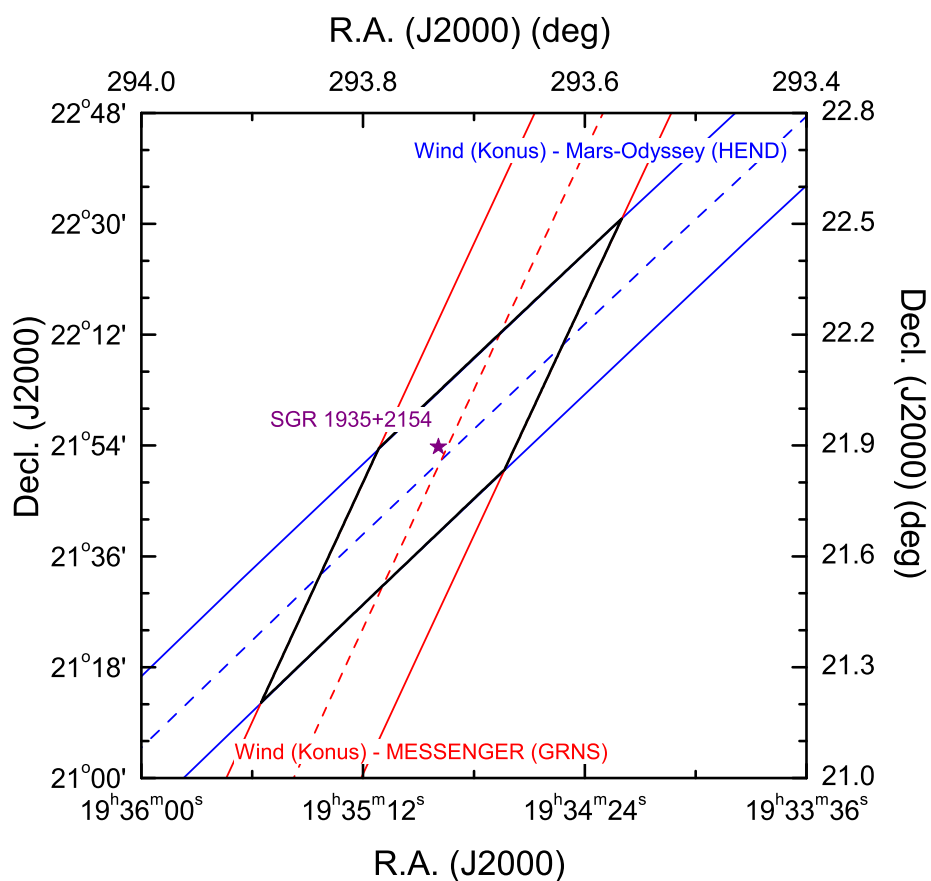


Рисунок 3.1: IPN локализация первой промежуточной вспышки SGR 1935+2154 площадью 280 квадратных угловых минут, полученная пересечением двух триангуляционных колец: Конус - HEND (ширина 7.08') и Конус - MESSENGER (ширина 6.72'). Положение SGR 1935+2154 обозначено звездой.

3.2 Временной анализ

На Рис. 3.2 представлены временные профили вспышки в диапазонах G1 и G2. Статистически значимое излучение в диапазоне G3 (выше ~ 300 кэВ) не обнаружено, что, учитывая яркость вспышки, свидетельствует о мягком энергетическом спектре, типичном для магнитаров. Профиль вспышки характеризуется одиночным ярким импульсом с резким подъемом (< 10 мс), начинающимся в момент $T_0 - 0.062$ с, достигающим максимума интенсивности в $T_0 + 0.800$ с и затухающим до фонового уровня к $T_0 + 1.680$ с. Также профиль вспышки не содержит признаков продолжительного модулированного «хвоста», характерного для ряда промежуточных вспышек [156, 157]. Общая длительность вспышки $T_{100} = 1.742$ с определена на уровне 5σ в объединенном энергетическом диапазоне G1+G2 (20 – 300 кэВ). Значения длительностей T_{90} и T_{50} составляют 1.412 ± 0.016 с и 0.654 ± 0.016 с соответственно.

Используя метод быстрого преобразования Фурье, был выполнен анализ временного профиля вспышки в объединенном диапазоне G1+G2 с временным разрешением 2 и 16 мс для поиска пульсаций. Статистически значимый сигнал не выявлен. В соответствии с методикой, описанной в [158], определены верхние пределы амплитуд пульсаций на уровне значимости 3σ : более 50% для частот в диапазоне 5–60 Гц и 10–30% для частот 60–250 Гц (Рис. 3.3).

По сравнению с амплитудами квазипериодических осцилляций (QPO), обнаруженными в хвостах гигантских вспышек, эти пределы не являются строгими. Основные QPO в гигантских вспышках SGR 1806-20 и SGR 1900+14 [159, 160, 161, 162] имеют амплитуды пульсаций около 5% на частоте 20 Гц, 50% на 30 Гц, 10% на 150 Гц и 20% на 260 Гц. Во всех случаях верхние пределы полученные для первой промежуточной вспышки значительно или немного превышают эти значения.

3.3 Спектральный анализ

За время вспышки Конус-Винд зарегистрировал семь многоканальных энергетических спектров в диапазоне энергий от 20 кэВ до 14 МэВ; времена

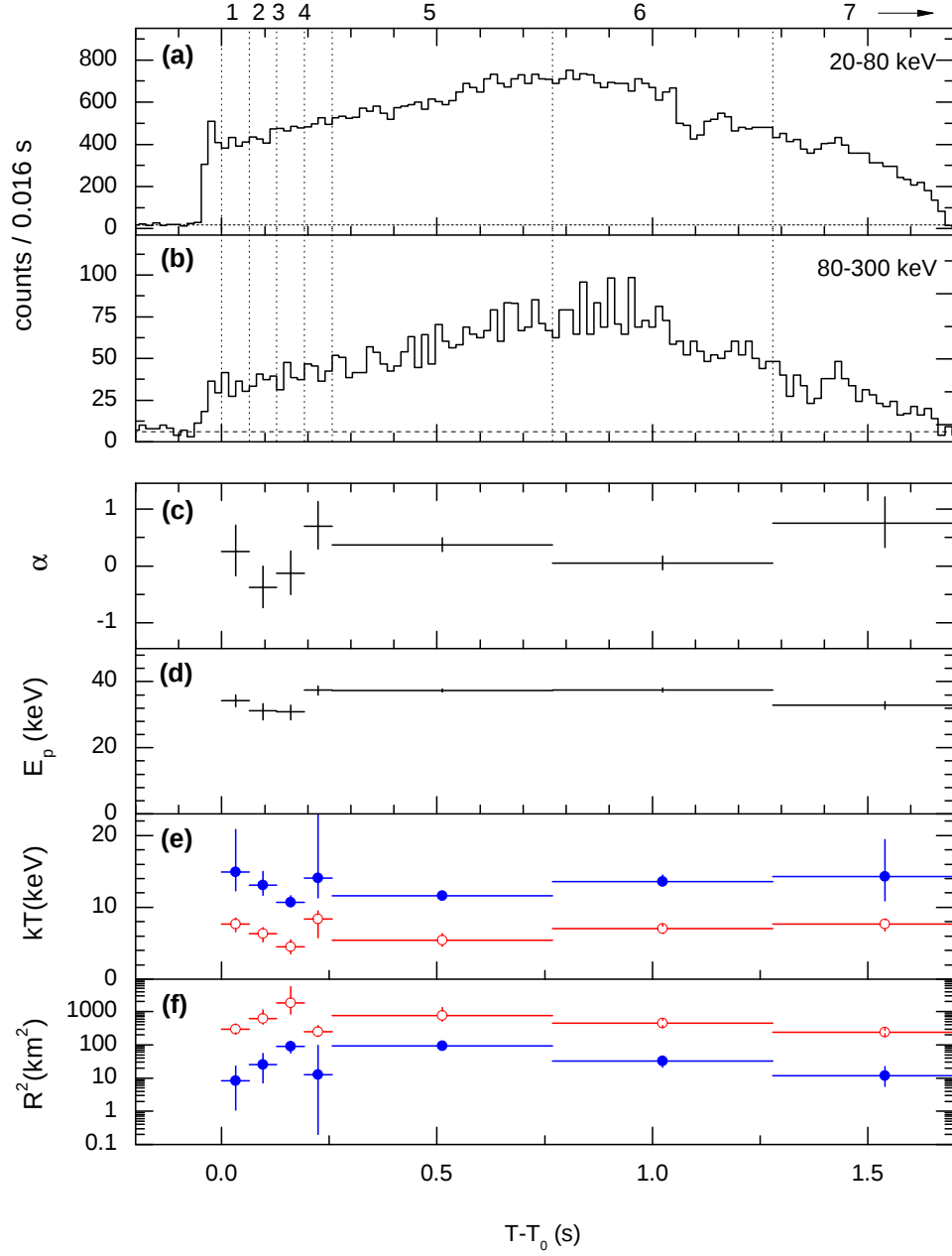


Рисунок 3.2: Временные профили вспышки, зарегистрированные в G1 (20 – 80 кэВ, панель а) и G2 (80 – 300 кэВ, панель б) с временным разрешением 16 мс. Вертикальные пунктирные линии обозначают интервалы накопления спектров; правая граница спектра 7 ($T_0 + 9.472$ с) не показана. Разрешенные по времени параметры моделей CPL и 2BV приведены на панелях (с)–(ф); низко- и высокотемпературные компоненты 2BV обозначены открытыми и заполненными символами соответственно.

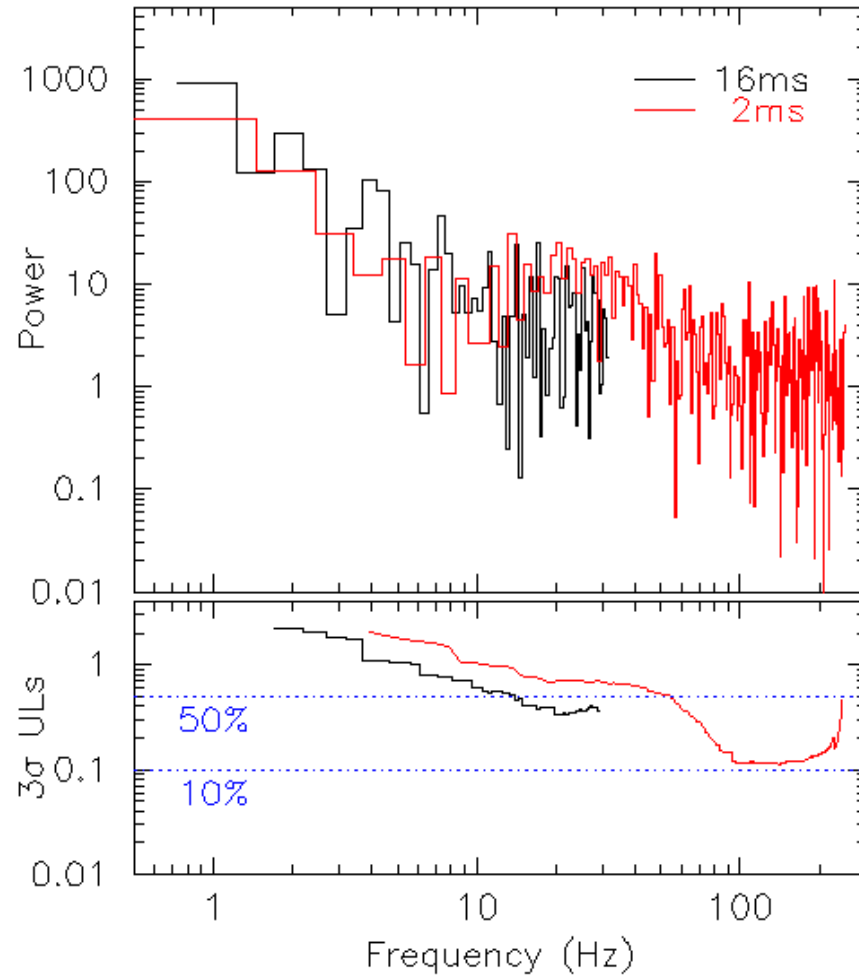


Рисунок 3.3: Спектр мощности кривой блеска *Конус-Винд* в энергетическом диапазоне G1+G2 (верхняя панель) и верхние пределы на амплитуду пульсаций (нижняя панель). Две горизонтальные пунктирные линии обозначают верхние пределы 10% и 50% для доли пульсаций. Линии разных цветов соответствуют разным временным разрешениям.

накопления спектров приведены в Таб. 3.1. Для аппроксимации спектров использовался энергетический диапазон от 20 до 250 кэВ, так как излучение на более высоких энергиях не обнаружено. Спектральный анализ, как и ранее (см. раздел 2.4.1), проводился в пакете XSPEC с применением моделей 2BV и CPL. Также были предприняты попытки аппроксимации спектров моделью ОТТВ и одной функцией черного тела (`bbodyrad` в XSPEC), однако эти модели были отвергнуты на основании статистических критериев.

Результаты аппроксимации спектров вспышки с использованием моделей 2BV и CPL представлены в Таб. 3.1. Для определения наилучших значений параметров каждой спектральной модели применялись два подхода. В первом подходе, как и в предыдущих разделах работы, исходные спектры скоростей счета группировались таким образом, чтобы каждый энергетический канал содержал не менее 10 отсчетов, с последующей аппроксимацией методом минимизации статистики χ^2 . Во втором подходе использовалась минимизация С-статистики (C-stat) с группировкой спектров, обеспечивающей минимум один отсчет на канал. Для спектров 1–4, отличающихся короткими временами накопления и низкой статистикой отсчетов в высокоэнергетических каналах, аппроксимации с использованием С-статистики обеспечивали меньшие ошибки параметров по сравнению с методом χ^2 , хотя результаты обоих методов согласуются в пределах погрешностей. В таких случаях приведены результаты, полученные с использованием С-статистики, с указанием качества соответствующей аппроксимации χ^2 для справки. Также следует отметить, что спектр 7 имеет время накопления от $T_0 + 1.280$ с до $T_0 + 9.472$ с, при этом в кривой блеска излучение вспышки после $T_0 + 1.680$ с не обнаружено. Для этого спектра радиусы и соответствующие светимости компонент модели 2BV, полученные из аппроксимаций, были пересчитаны для интервала накопления 1.280 – 1.680 с. Аналогично, для интегрального спектра эти параметры указаны для интервала 0 – 1.680 с.

Таблица 3.1: Результаты разрешенного во времени спектрального анализа первой промежуточной вспышки от SGR 1935+2154.

N	Время накопления (с от T_0)	2BV параметры						CPL параметры			
		kT_1 (кэВ)	Norm ₁ R^2_{KM}/d^2_{10}	$L^a_{10^{39} \text{ эр}}$	kT_2 (кэВ)	Norm ₂ R^2_{KM}/d^2_{10}	$L^a_{10^{39} \text{ эр}}$	χ^2/dof^b	α	E_p (кэВ)	χ^2/dof^b
1	0.0 - 0.064	$7.8^{+0.7}_{-0.9}$	292^{+107}_{-64}	137^{+22}_{-33}	$14.9^{+4.1}_{-2.6}$	$6.7^{+16.6}_{-5.2}$	49.0^{+34}_{-23}	11.9/25 [4.8/15]	$0.12^{+0.36}_{-0.35}$	$34.4^{+1.8}_{-2.1}$	14.5/26 [6.9/16]
2	0.064 - 0.128	$6.0^{+1.0}_{-1.1}$	678^{+660}_{-239}	116^{+29}_{-27}	$12.6^{+1.8}_{-1.2}$	$33.7^{+31.3}_{-19.6}$	108^{+33}_{-37}	10.5/21 [8.3/15]	$-0.30^{+0.35}_{-0.34}$	$31.7^{+2.1}_{-2.5}$	10.3/22 [8.1/16]
3	0.128 - 0.192	$4.5^{+1.0}_{-1.0}$	1830^{+3650}_{-970}	96^{+20}_{-19}	$11.0^{+0.9}_{-0.7}$	$81.3^{+34.0}_{-26.7}$	155^{+20}_{-25}	26.7/24 [15.0/15]	$-0.20^{+0.33}_{-0.32}$	$31.7^{+2.4}_{-2.0}$	28.3/25 [16.4/16]
4	0.192 - 0.256	$8.5^{+1.0}_{-2.0}$	246^{+122}_{-49}	151^{+50}_{-86}	$13.8^{+4.9}_{-2.5}$	$16.5^{+60.9}_{-14.8}$	76^{+89}_{-52}	13.7/21 [8.4/15]	$0.67^{+0.36}_{-0.34}$	$37.7^{+1.4}_{-1.5}$	14.2/22 [8.8/16]
5	0.256 - 0.768	$5.4^{+0.7}_{-0.7}$	776^{+454}_{-236}	87^{+16}_{-11}	$11.7^{+0.4}_{-0.3}$	$88.4^{+16.5}_{-17.8}$	213^{+15}_{-20}	26.2/28	$0.36^{+0.12}_{-0.12}$	$37.6^{+0.5}_{-0.5}$	25.0/29
6	0.768 - 1.280	$7.3^{+0.5}_{-0.5}$	421^{+84}_{-58}	152^{+21}_{-21}	$14.0^{+0.8}_{-0.7}$	$27.5^{+11.6}_{-9.3}$	136^{+23}_{-23}	37.0/30	$0.04^{+0.11}_{-0.11}$	$37.6^{+0.6}_{-0.6}$	31.6/31
7	1.280 - 9.472 ^c	$7.7^{+0.6}_{-1.0}$	165^{+23}_{-60}	73^{+10}_{-25}	$14.5^{+5.2}_{-3.4}$	$3.7^{+7.8}_{-2.0}$	20^{+26}_{-11}	23.1/30	$0.70^{+0.46}_{-0.43}$	$32.9^{+1.1}_{-1.2}$	25.8/31
1 - 7 ^d	0.0 - 9.472 ^c	$6.4^{+0.4}_{-0.4}$	455^{+73}_{-55}	95^{+12}_{-11}	$12.4^{+0.4}_{-0.4}$	$43.5^{+8.8}_{-8.1}$	136^{+12}_{-14}	37.0/30	$0.20^{+0.08}_{-0.08}$	$35.7^{+0.3}_{-0.3}$	32.4/31

Примечания:

^a Светимости компонент модели 2BV вычислены для расстояния до источника $d=10$ кпк.

^b C-stat/dof для спектров 1 to 4; качество соответствующей χ^2 аппроксимации указано в квадратных скобках для справок.

^c Радиусы и светимости модели 2BV для спектров 7 и 1-7 рассчитаны с использованием интервалов 1.280-1.680 с и 0.0-1.680 с соответственно (см. текст).

^d Интегральный спектр.

Модели 2BB и CPL хорошо описывают интегральный спектр (Рис. 3.4) и все семь разрешенных по времени спектров с максимальным значением $\chi^2/\text{dof} = 1.23$ и вероятностью нулевой гипотезы > 0.18 для всех аппроксимаций. Разница между статистиками аппроксимации CPL и 2BB, $\Delta\chi^2_{\text{CPL-2BB}}$, для отдельных спектров находится в диапазоне от -5.4 до $+2.7$, с примерно равным количеством положительных и отрицательных значений $\Delta\chi^2_{\text{CPL-2BB}}$. Поведение С-статистики аналогично, поэтому далее рассматривается только статистика χ^2 .

Так как модели CPL и 2BB не являются вложенными, выбор предпочтительной модели не может быть осуществлен с использованием тестовой статистики с известным эталонным распределением, например, посредством F -теста или теста отношения правдоподобия. В этом случае обычно применяется байесовский подход, в рамках которого апостериорное предсказательное распределение тестовой статистики формируется с использованием симуляций Монте-Карло для параметров модели. Следуя методологии, описанной в [163], в пакете XSPEC были проведены симуляции для оценки способности инструмента Конус-Винд различать модели CPL и 2BB для спектров SGR 1935+2154. Для каждого временного интервала были смоделированы две группы по 1000 спектров с использованием CPL или 2BB в качестве нулевой модели, с последующей аппроксимацией смоделированных спектров обеими моделями. На основе аппроксимаций построены апостериорные предсказательные распределения $\Delta\chi^2$, а также рассчитаны апостериорные предсказательные p -значения, отражающие вероятность того, что спектр, смоделированный по CPL (2BB), будет аппроксимирован моделью 2BB (CPL) с более экстремальным значением $\Delta\chi^2$, чем наблюдаемое для реального спектра. Ни для одного из временных интервалов не было получено $p < 0.01$. Модель CPL демонстрирует предпочтительность ($p \lesssim 0.05$) только для спектра №6 ($p = 0.051$) и интегрального спектра ($p = 0.019$), тогда как для модели 2BB наилучшее значение составило $p = 0.173$ для спектра №1. Ввиду отсутствия статистически значимых различий статистики и высокого качества аппроксимации моделями CPL и 2BB, данные Конус-Винд не позволяют однозначно исключить ни одну из них и далее приводятся параметры обеих моделей.

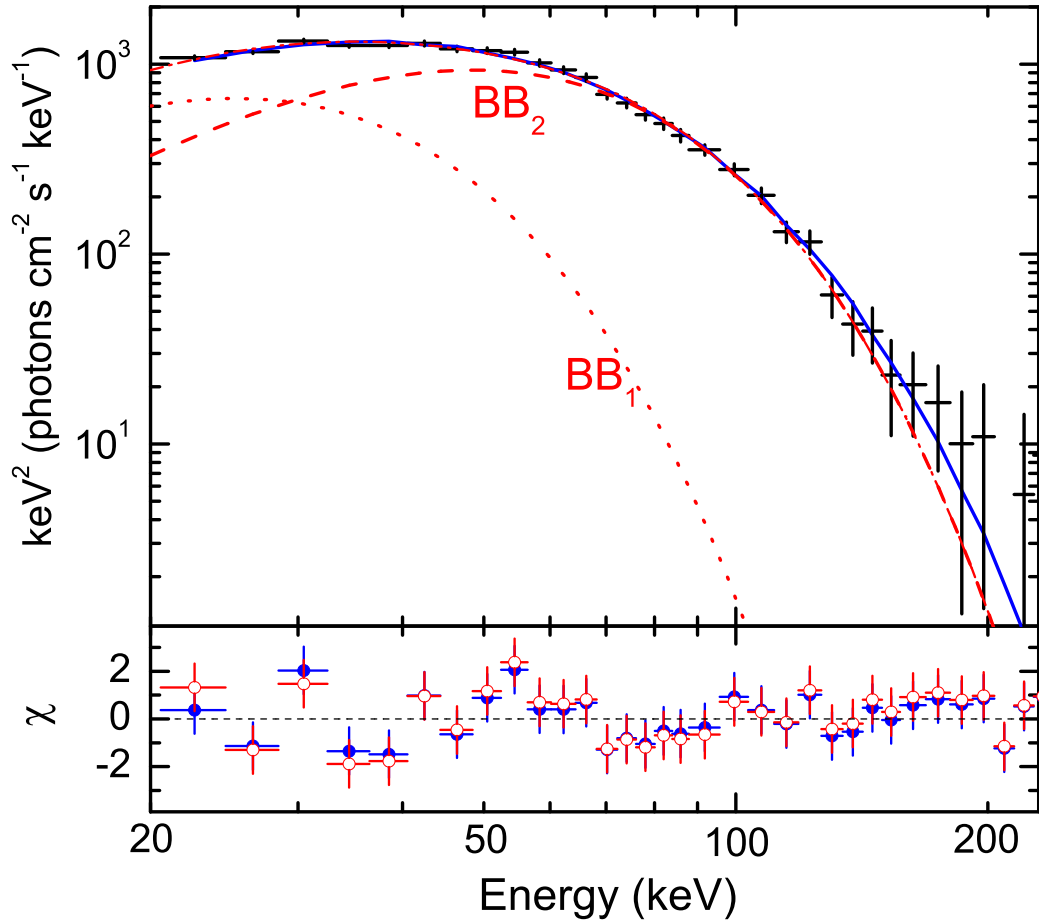


Рисунок 3.4: Интегральный νF_ν спектр первой промежуточной вспышки: данные Конус-*Bund* (символы); модель CPL (синяя сплошная линия), модель 2BB (красная штрихпунктирная линия) и ее компоненты с низкой и высокой kT (красные пунктирная и штриховая линии соответственно). Нижняя панель показывает невязки аппроксимации для каждой модели.

Аппроксимация интегрального спектра моделью CPL дает параметры $\alpha \approx 0.20$ и $E_p \approx 35.7$ кэВ. Эволюция спектральных параметров за время вспышки представлена на панелях (с–f) Рис. 3.2. Пиковые энергии модели CPL для отдельных спектров варьируются от ~ 31.7 до ~ 37.5 кэВ, демонстрируя слабую корреляцию с энергетическим потоком. Фотонный индекс α изменяется в широком диапазоне жёстких значений от -0.3 до $+0.7$, не проявляя явной зависимости от интенсивности излучения.

При аппроксимировании интегрального спектра моделью 2BB, температуры мягкой и жёсткой компоненты модели составляют $kT_1 \approx 6.4$ кэВ и $kT_2 \approx 12.4$ кэВ, а соответствующие радиусы излучающих областей (рассчитанные для расстояния 10 кпк) равны $R_1 \approx 21.3$ км и $R_2 \approx 6.6$ км соответственно. Значения kT_1 для отдельных спектров варьируются в диапазоне $\sim 4.5 - 8.5$ кэВ. Для kT_2 , несмотря на значительные погрешности в некоторых спектрах, оптимальные значения лежат в диапазоне 11-15 кэВ и характеризуются меньшими относительными флуктуациями по сравнению с kT_1 : $\sigma(\log kT_2) = 0.050$ против $\sigma(\log kT_1) = 0.098$. Радиусы излучающих областей модели 2BB и соответствующие светимости в целом коррелируют с эволюцией скорости счета. Простой тест показывает, что флуктуации параметров моделей CPL и 2BB не могут быть объяснены исключительно статистическими причинами: аппроксимации с фиксированными параметрами дают $\chi^2 > 11.2/6$ dof для всех спектральных параметров, указывая на наличие значимой спектральной эволюции в течение вспышки.

На Рис. 3.5 представлены корреляции между температурами (левая панель), а также между площадями излучающих областей (правая панель) мягкой и жёсткой компоненты модели 2BB, полученными для отдельных спектров. Коэффициенты корреляции Спирмена r и вероятности случайного совпадения P указаны на каждой панели. Корреляция площадей с $r = 0.93$ близка к значимой на уровне $> 3\sigma$, тогда как температуры коррелируют менее выражено. При аппроксимации степенным законом наклоны корреляций составляют 0.52 ± 0.14 для температур и 1.27 ± 0.17 для площадей. Кроме того, площади излучающих областей антикоррелируют с соответствующими температурами (см. раздел ??).

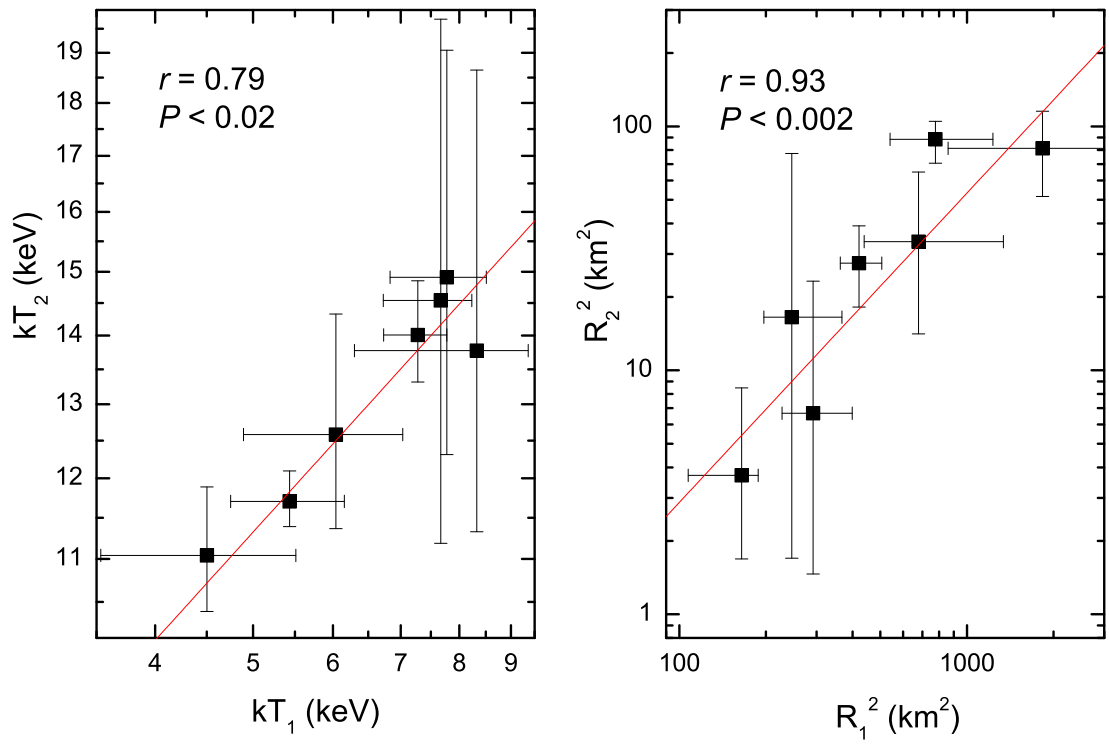


Рисунок 3.5: Корреляции между параметрами двух компонент модели 2ВВ: температуры (левая панель) и площади излучения (правая панель). Коэффициенты корреляции Спирмена r и вероятности случайного совпадения P указаны на каждой панели. Сплошные линии представляют собой наилучшие аппроксимации степенным законом.

На основе аппроксимации моделью CPL полный энергетический поток вспышки S составляет $(2.50 \pm 0.03) \times 10^{-5}$ эрг/см², а пиковый энергетический поток $F_{\max} = (2.15 \pm 0.13) \times 10^{-5}$ эрг/см²/с в 16-мс интервале, начиная с $T_0 + 0.800$ с. Для аппроксимаций моделью 2ВВ болометрический поток и пиковый поток составляют $\sim 3.3 \times 10^{-5}$ эрг см⁻² и $\sim 3.0 \times 10^{-5}$ эрг см⁻² с⁻¹ соответственно. Мягкая компонента ВВ с низким kT вносит около 27% вклада в полный поток в диапазоне 20–200 кэВ и около 42% в полный болометрический поток. Предполагая изотропное излучение на расстоянии 10 кпк, полная болометрическая энергия, выделенная во вспышке, составляет $\sim 4.0 \times 10^{41}$ эрг, а пиковая болометрическая светимость $\sim 3.6 \times 10^{41}$ эрг/с.

3.4 Заключение

В данной главе представлено первое наблюдение промежуточной вспышки от магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированной 12 апреля 2015 года четырьмя инструментами межпланетной сети IPN, включая *Конус-Винд*. Приведен подробный анализ данных, полученных в эксперименте *Конус-Винд*, включающий временные, спектральные и энергетические характеристики события.

В главе получены следующие результаты:

1. Получена IPN-локализация источника вспышки площадью 280 квадратных угловых минут. Среди известных магнитаров в этой области находится только SGR 1935+2154, расположенный на угловом расстоянии 1.97' от центра области.
2. Временные характеристики вспышки, зарегистрированной в эксперименте *Конус-Винд*, свидетельствуют о том, что она является наиболее продолжительной среди всех событий, зафиксированных от SGR 1935+2154. Профиль вспышки отличается отсутствием выраженной структуры: в нем не наблюдается яркий начальный пик или модулированный хвост, характерные для ряда промежуточных вспышек. Проведен поиск QPO, в результате которого установлены верхние пре-

делу на амплитуду пульсирующего излучения в диапазоне 10–50% для частот от 5 до 250 Гц.

3. Спектральный анализ не позволяет однозначно выделить модель, оптимально описывающую спектры вспышки SGR 1935+2154. Среди четырех рассмотренных моделей две простые — ОТТВ и ВВ — были отвергнуты на основании статистических критериев. Более сложные модели — CPL и 2BV — успешно описывают как интегральный спектр, так и семь отдельных спектров, накопленных в ходе вспышки. Полученные спектральные параметры типичны для магнитаров и согласуются с характеристиками более слабых вспышек от данного источника, что указывает на сходство физических процессов, ответственных за излучение.

По материалам Главы 3 на защиту выносится следующее положение:

- Результаты детального анализа первой промежуточной вспышки от магнитара SGR 1935+2154, включая ее временные характеристики и разрешенные по времени спектральные параметры.

Результаты отражены в публикациях:

- A. V. Kozlova et al. The first observation of an intermediate flare from SGR 1935+2154 // Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 460, 2, 2016, p. 2008 - 2014;
- A. V. Kozlova et al. First intermediate flare from SGR 1935+2154 // Journal of Physics: Conference Series, Volume 769, article id. 012005, 2016

Глава 4

Всплеск SGR 1935+2154, ассоциированный с FRB 200428

В данной главе представлен анализ уникального события — вспышки магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированной 28 апреля 2020 года одновременно с радиовсплеском FRB 200428, характеристики которого демонстрируют исключительное сходство с внегалактическими FRB. Это наблюдение стало первым случаем отождествления FRB вне радиодиапазона и первым убедительным подтверждением их связи с магнитарами. Хотя интенсивность FRB 200428 ниже типичной для внегалактических FRB, его энергия, в изотропном приближении, превосходит энергию всех ранее зарегистрированных радиовсплесков от магнитаров примерно на три порядка. Это обстоятельство подчеркивает исключительную значимость данного события как для исследования природы FRB, так и для понимания физических процессов, происходящих в магнитарах.

Глава организована следующим образом. Во введении описывается интенсивная активность магнитара в апреле 2020 года, приводятся ключевые характеристики FRB 200428, а также локализации события, полученные по наблюдениям в радио и рентгеновском диапазонах. В разделе 4.2 анализируется временной профиль всплеска, демонстрируется взаимосвязь явлений в двух диапазонах. Раздел 4.3 посвящен изучению спектральных характеристик всплеска и его энергетических параметров, а в разделе 4.4 подчеркивается пекулярный характер события среди других всплесков SGR 1935+2154 в силу его аномально жесткого энергетического спектра.

4.1 Введение

В начале апреля 2020 года магнитар SGR 1935+2154 вступил в фазу повышенной активности, продемонстрировав серию ярких коротких рентгеновских всплесков. 27 апреля наблюдалась исключительно интенсивная плотная последовательность многочисленных всплесков («лес вспышек»). Начальный эпизод серии, длительностью более 100 с, был зафиксирован в жестком рентгеновском диапазоне рядом инструментов, включая *Конус-Винд* [167, 131]. Последующие наблюдения с помощью телескопа NICER выявили дополнительный кластер всплесков спустя ~ 6 часов после начала эпизода, в течение первых 1120 с которого было зарегистрировано более 217 всплесков [130].

На следующий день, 28 апреля, в $\sim 14:34:33$ UT эксперимент CHIME/FRB зарегистрировал яркий миллисекундный радиовсплеск в диапазоне 400 – 800 МГц, направление на источник которого совпадало с SGR 1935+2154. Всплеск характеризовался двухпиковой структурой с длительностями компонент ~ 0.6 мс и ~ 0.3 мс, разделенных интервалом ~ 29 мс [132]. Вторая компонента была независимо обнаружена в эксперименте STARE2 на частоте 1.4 ГГц с длительностью ~ 0.6 мс [133]. На Рис. 4.1 приведены динамические спектры всплеска по данным двух экспериментов. Оценка флюенса этого FRB-подобного радиовсплеска составила ~ 700 кЯн мс по данным CHIME/FRB и ~ 1.5 МЯн мс по данным STARE2. Одновременно с радиовсплеском, жесткая рентгеновская вспышка была зарегистрирована инструментами *INTEGRAL* [126], *AGILE* [168], *Конус-Винд* [169] и *Insight-HXMT* [170].

Локализация рентгеновской вспышки, включающая положение магнитара SGR 1935+2154, была независимо определена инструментами *INTEGRAL* (IBIS/ISGRI) и *Insight-HXMT*. Наиболее точная локализация, полученная *INTEGRAL*, указывает на область с центром в точке R.A.(J2000) = $19^{\text{h}}34^{\text{m}}53.8^{\text{s}}$, Decl.(J2000) = $+21^{\circ}53'46''$ и радиусом на уровне значимости 90% равным $1.4'$. Магнитар SGR 1935+2154 находится в пределах этой области, на расстоянии $0.5'$ от её центра. Локализации события в радиодиапазоне значительно менее точна, с наименьшей погрешностью порядка 1° для эксперимента CHIME. 30 апреля 2020 года телескоп FAST зарегистрировал слабый

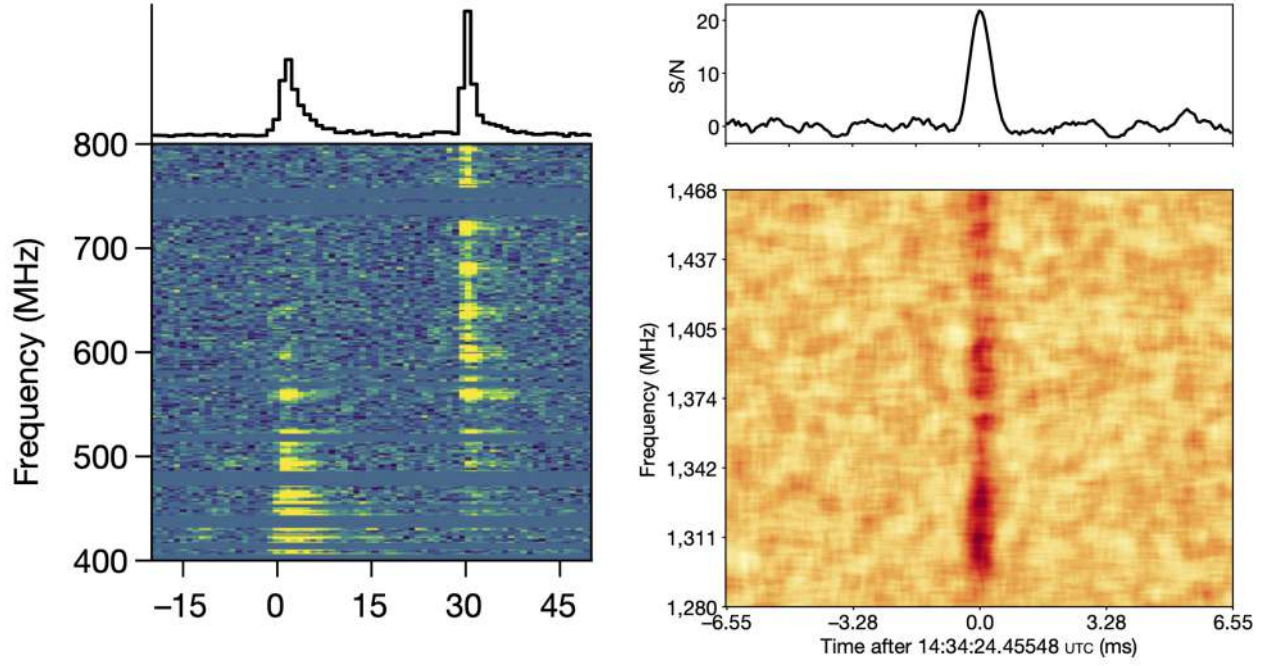


Рисунок 4.1: Временной профиль и динамический спектр FRB 200428 по данным CHIME/FRB (слева, изображение заимствовано из [132]) и STARE2 (справа, изображение заимствовано из [133]).

всплеск (60 мЯн мс) в диапазоне 1.02 – 1.48 ГГц, локализовав его в пределах $3'$ (размер луча FAST) от SGR 1935+2154 [134]. Схожая мера дисперсии радиовсплесков CHIME, STARE2 и FAST указывает на их общий источник, при этом наилучшая локализация подтверждена данными FAST. Временное совпадение радиовсплесков CHIME, STARE2 и рентгеновской вспышки однозначно указывает на связь FRB 200428 с SGR 1935+2154.

4.2 Временной анализ

Конус-*Винд* зарегистрировал вспышку 28 апреля 2020 года в момент времени $T_0 = 14:34:24.084$ UT. Скорректированное, с учетом времени распространения сигнала от *Винд* до Земли, геоцентрическое время срабатывания триггера составило $T_{0,\text{Earth}} = 14:34:24.447$ UT.

Временной профиль (Рис. 4.3) рентгеновского всплеска характеризуется постепенно нарастающим двухпиковым импульсом. Для определения полной длительности всплеска и выявления статистически значимых изменений интенсивности счета в ходе события был применен алгоритм байесовских бло-

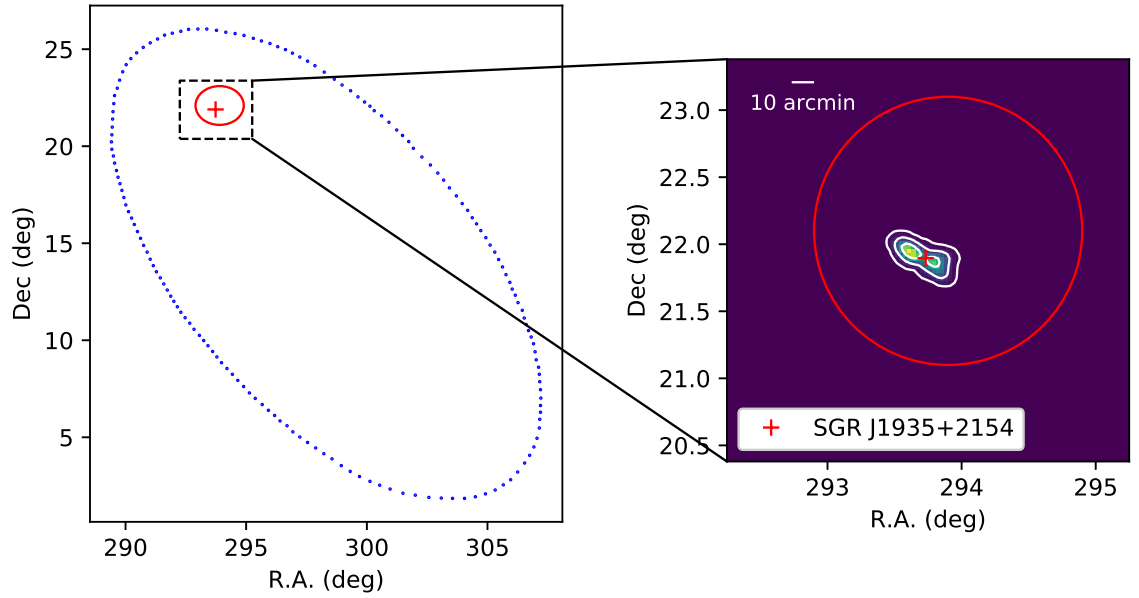


Рисунок 4.2: Локализация FRB 200428. Положение SGR 1935+2154 указано красным крестом. Красный круг и синий пунктирный эллипс обозначают области локализации FRB 200428 с доверительным интервалом на уровне 95%, определенные экспериментами CHIME/FRB и STARE2, соответственно. Белые контуры доверительных интервалов 1σ , 2σ , 3σ на увеличенной панели соответствуют локализации, полученной *Insight*-HXMT. Изображение заимствовано из [170].

ков [171]. Этот алгоритм разбивает кривую блеска на временные интервалы, в течение которых интенсивность счета остается постоянной. Разложение регулируется единственным параметром (`ncrrior`), влияющим на количество выделяемых интервалов. Для данного анализа был выбран параметр `ncrrior` = 7, обеспечивающий значимость выделяемых интервалов (с разрешением 4 мс) на уровне $\geq 4\sigma$. Временные границы всплеска, определенные стандартной процедурой, описанной в разделе 2.3.1, совпадают с результатами, полученными из разложения на байесовские блоки и составляют $T_0 - 0.220$ с и $T_0 + 0.244$ с. Полная длительность события $T_{100} = 0.464$ с. Все временные параметры сведены в Таб. 4.1.

Наиболее яркая часть всплеска охватывает интервал от $T_0 - 0.060$ с до $T_0 + 0.036$ с и включает два отчетливых пика с длительностью 0.016 с и 0.032 с, перекрывающихся по времени с двумя радиоимпульсами. Несмотря на бóльшую ширину пиков в жестком рентгеновском диапазоне по сравнению с субмиллисекундными радиопиками, максимумы кривой блеска в диапазоне G1 совпадают с геоцентрическими временами прихода радиоимпульсов, скорректированными на дисперсию, с точностью до ± 2 мс. На основании этого, мы заключаем, что зарегистрированное Конус-Винд событие и радиовсплеск имеют общий источник и представляют собой одновременное обнаружение FRB-подобного всплеска от галактического магнитара и его жесткого рентгеновского аналога.

Таблица 4.1: Временные параметры всплеска, ассоциированного с FRB 200428, определенные в разных энергетических диапазонах.

Диапазон	T_{start} (с)	T_{stop} (с)	T_{100} (с)	T_{50} (с)	T_{90} (с)
G1	-0.238	0.284	0.522	$0.084^{+0.020}_{-0.009}$	$0.352^{+0.087}_{-0.053}$
G2	-0.100	0.234	0.334	$0.074^{+0.021}_{-0.022}$	$0.238^{+0.053}_{-0.064}$
G1+G2	-0.266	0.264	0.530	$0.082^{+0.015}_{-0.009}$	$0.348^{+0.063}_{-0.051}$

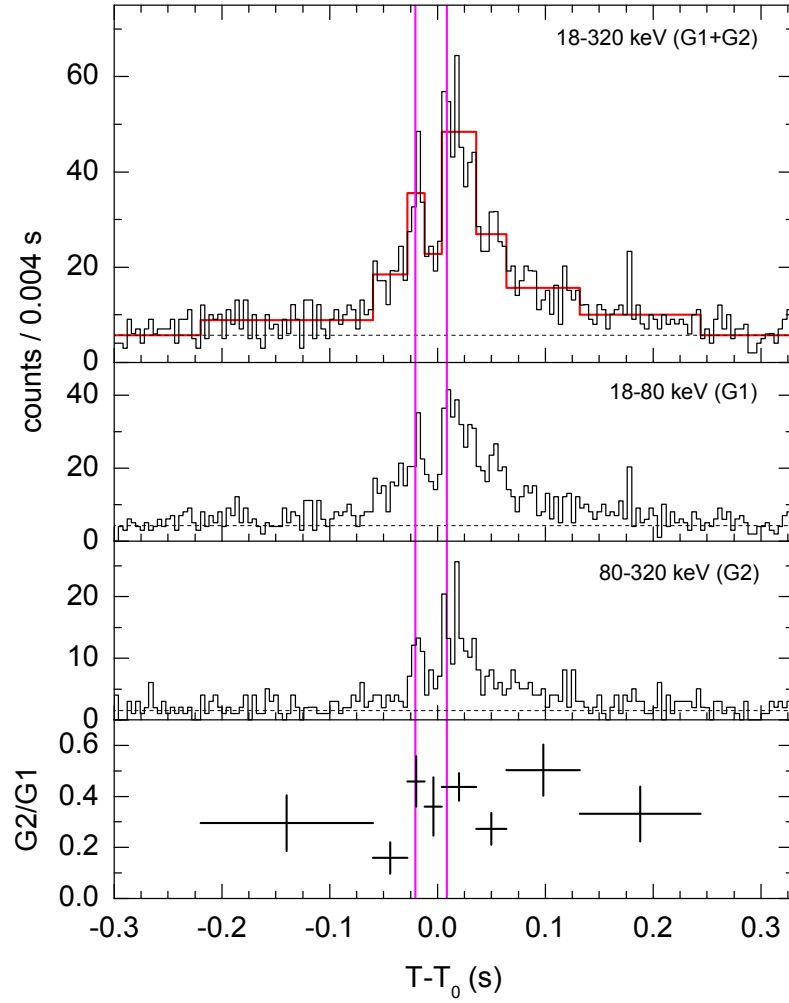


Рисунок 4.3: Временной профиль всплеска, ассоциированного с FRB 200428, по данным Конус-Винд в трех диапазонах: G1 (18–80 кэВ), G2 (80–320 кэВ) и объединенном диапазоне G1+G2 (18–320 кэВ). Красной линией на верхней панели показано разложение временного профиля на байесовские блоки. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены уровни фонового счета. На нижней панели приведено отношение жесткости G2/G1 (доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 68%). Положения двух максимумов пиков на кривой блеска G1 Конус-Винд (14:34:24.427 и 14:34:24.455 соответственно) совпадают с точностью до ± 2 мс с поправленными на дисперсию геоцентрическими временами прихода двух радиокомпонент, зарегистрированных CHIME/FRB: 14:34:24.42650(2) и 14:34:24.45547(2) соответственно (отмечены вертикальными фиолетовыми линиями).

4.3 Спектральный анализ

Для изучения спектральных характеристик всплеска были выбраны два спектра: интегральный, накопленный в интервале от T_0 до $T_0 + 0.256$ с, соответствующий полному излучению всплеска после T_0 , и пиковый, охватывающий интервал от T_0 до $T_0 + 0.064$ с, приблизительно совпадающий со вторым пиком всплеска. Фоновый спектр извлечен из интервала от $T_0 + 8.448$ с до $T_0 + 98.560$ с. Энергии фотонов, зарегистрированные Конус-Винд во время данного события, превышают 250 кэВ. Аппроксимация спектров проводилась с использованием статистики PG-stat, оптимальной для спектров с низким числом отсчетов на высоких энергиях, где доминирует фон. Спектральные каналы были сгруппированы с минимальным числом отсчетов не менее одного на канал, обеспечивая корректность статистики.

Среди рассмотренных спектральных моделей, включающих простой степенной закон (PL), степенной закон с экспоненциальным обрезанием (CPL), двухстепенную функцию Банда [172], а также однокомпонентную (BB) и двухкомпонентную (2BB) модели излучения черного тела, энергетический спектр в диапазоне 20–500 кэВ наиболее точно описывается моделями CPL и 2BB. Результаты аппроксимации для PL и CPL приведены в Таб. 4.2, для BB и 2BB в Таб. 4.3.

Для проверки наличия жесткой степенной компоненты была выполнена аппроксимация спектров с использованием функции Банда, применяемой для гамма-всплесков. Она показала значения параметров α и E_p , близкие к результатам CPL, при этом фотонный индекс в области высоких энергий имеет лишь верхний предел ($\beta < -2.7$).

Таблица 4.2: Результаты спектрального анализа с использованием нетепловых моделей (PL и CPL). Статистика аппроксимации PG-stat указана в скобках после тестовой статистики χ^2 .

Интервал (с)	α	E_p (кэВ)	Flux (10–500 keV) (10^{-6} эрг/см ² /с)	χ^2 [pgstat]/dof
0.0–0.064	$-0.4^{+0.6}_{-0.5}$	$82.5^{+13.1}_{-9.9}$	$5.8^{+0.8}_{-0.7}$	24.7 [23.5]/30
0.0–0.064	$-1.9^{+0.1}_{-0.1}$	...	$7.1^{+0.9}_{-0.8}$	62.5 [53.4]/31
0.0–0.256	$-0.7^{+0.5}_{-0.4}$	$84.6^{+12.7}_{-10.0}$	$2.4^{+0.3}_{-0.2}$	54.7 [36.3]/39
0.0–0.064	$-2.0^{+0.1}_{-0.1}$	...	$2.8^{+0.3}_{-0.3}$	142.8 [73.4]/40

Таблица 4.3: Результаты спектрального анализа с использованием тепловых моделей (BB и 2BB). Статистика аппроксимации PG-stat указана в скобках после тестовой статистики χ^2 .

Интервал (с)	kT ₁ (кэВ)	Norm ₁	kT ₂ (кэВ)	Norm ₂	χ^2 [pgstat]/dof
0.0–0.064	$13.6^{+2.2}_{-2.3}$	$9.3^{+5.6}_{-3.0}$	$35.5^{+12.4}_{-7.1}$	$0.2^{+0.3}_{-0.1}$	25.6 [24.0]/29
0.0–0.064	$19.5^{+1.7}_{-1.5}$	$3.6^{+1.3}_{-1.0}$	...	...	41.6 [43.5]/31
0.0–0.256	$11.2^{+3.2}_{-3.7}$	$6.3^{+5.4}_{-2.3}$	$31.2^{+6.3}_{-4.5}$	$0.1^{+0.2}_{-0.1}$	57.3 [39.7]/38
0.0–0.256	$19.5^{+1.5}_{-1.4}$	$1.4^{+0.4}_{-0.3}$	...	...	68.7 [73.3]/40

Для интегрального спектра фотонный индекс модели CPL составляет $\alpha = -0.72 \pm 0.47$, а пиковая энергия в спектре νF_ν равна $E_p = 85 \pm 15$ кэВ (все ошибки спектральных параметров указаны на уровне 90%). При использовании модели 2BB температуры мягкой и жесткой компонент оцениваются как 11^{+3}_{-4} кэВ и 31^{+12}_{-7} кэВ соответственно. Спектры двух компонентов радиоимпульсов, обнаруженных CHIME/FRB, существенно различаются: первый импульс преимущественно регистрируется на частотах ниже 600 МГц, тогда как второй — на более высоких частотах, что подтверждается отсутствием детектирования первого импульса на частоте 1.4 ГГц телескопом STARE2. Напротив, рентгеновское излучение, зафиксированное Конус-Винд, не проявляет

заметных спектральных изменений между двумя пиками (см. Рис. 4.3). Это свидетельствует о том, что спектральные характеристики радиоимпульсов магнитара не имеют прямой связи с поведением сопровождающих их жестких рентгеновских всплесков.

Интегральный поток всплеска S , измеренный в диапазоне 20-500 кэВ, составил $(9.7 \pm 1.1) \times 10^{-7}$ эрг/см². Пиковые потоки в первом и втором рентгеновских импульсах на временном масштабе 4 мс равны $(7.5 \pm 1.2) \times 10^{-6}$ эрг/см²/с и $(9.1 \pm 1.5) \times 10^{-6}$ эрг/см²/с соответственно. При расстоянии до источника 10 кпк полная энергия, выделенная в рентгеновском диапазоне, оценивается как $E_X \approx 1.2 \times 10^{40}$ эрг, а пиковая изотропная рентгеновская светимость — как $L_X \approx 1.1 \times 10^{41}$ эрг/с. Эти значения типичны для ярких коротких всплесков магнитаров.

На основе данных Конус-Винд и оценок радиоэнергетики ($L_r \approx 7 \times 10^{36} - 4 \times 10^{38}$ эрг с⁻¹, $E_r \approx 3 \times 10^{34} - 2 \times 10^{35}$ эрг), отношение радио- к пиковой рентгеновской светимости L_r/L_X составляет $\sim 10^{-5} - 10^{-3}$, а отношение радио- к рентгеновской энергии $E_r/E_X \sim 10^{-6} - 10^{-5}$. Примечательно, что отношение L_r/L_X для вспышки 28 апреля имеет тот же порядок величины, что и в случае внегалактических FRB с $L_r \approx 10^{38} - 10^{42}$ эрг/с, если связывать их с гигантскими вспышками магнитаров, для которых характерна $L_X \approx 10^{44} - 10^{47}$ эрг/с.

4.4 Сравнительный анализ характеристик

FRB 200428 демонстрирует поразительное сходство с внегалактическими FRB по большинству характеристик. Однако на момент его обнаружения светимость FRB 200428 была примерно в тридцать раз ниже, чем у самого слабого из известных тогда внегалактических FRB. С течением времени разрыв в энергетических характеристиках между галактическими и внегалактическими источниками постепенно стирается. В частности, ближайший к нам повторный FRB 200120Е демонстрирует активность с изотропным энерговыделением в диапазоне $10^{32} - 10^{33}$ эрг, что на два-три порядка ниже, чем у галактического источника FRB 200428 [173]. Таким образом, FRB 200428 гармонично вписывается в общую популяцию внегалактических источников

и укрепляет гипотезу, согласно которой магнитары являются их вероятными источниками.

Сопутствующая радиовсплеску рентгеновская вспышка, напротив, выделяется своей уникальной характеристикой — аномальной спектральной жёсткостью. Хотя форма рентгеновского спектра и энергетические параметры данного события соответствуют типичным характеристикам коротких всплесков от магнитаров, его излучение простирается до значительно более высоких энергий $\gtrsim 250$ кэВ, тогда как для большинства всплесков SGR 1935+2154 характерны энергии $\lesssim 100$ кэВ. Пиковая энергия спектра $E_p \approx 85$ кэВ, является рекордной среди всех всплесков, наблюдавшихся от этого источника, включая наиболее яркую промежуточную вспышку длительностью около 1.7 секунды, подробно описанную в Главе 3. Вероятность того, что всплеск, ассоциированный с FRB 200428, обладает таким значением E_p в объединённой выборке из 41 всплеска, зарегистрированных Fermi-GBM [174], и 21 всплеска, зафиксированных Конус-Винд (на момент публикации), составляет всего 2×10^{-10} (Рис. 4.4). Это подчёркивает исключительную природу события 28 апреля по сравнению с остальной популяцией всплесков.

Этот факт, а также отсутствие обнаружения радиоизлучения от ~ 100 типичных (с мягким спектром) всплесков наблюдавшихся от SGR 1935+2154 [133, 135, 175], может указывать на связь между яркими радиовсплесками, подобными FRB, и атипичными рентгеновскими всплесками с более жестким спектром. Эта идея получает дополнительное подтверждение из статистики жестких рентгеновских вспышек, наблюдаемых в более широкой выборке магнитаров. Космический аппарат Конус-Винд работает в межпланетном пространстве с ноября 1994 года, имея практически беспрепятственный обзор всего неба (см. Главу 1). Среди примерно 320 относительно ярких ($S \gtrsim 4 \times 10^{-7}$ эрг/см²), коротких всплесков, обнаруженных Конус-Винд от 6 активных магнитаров за более чем 30 лет, только 5 событий имеют жесткий спектр со значениями E_p , схожими или выше, чем у всплеска 28 апреля (Таб. 4.4 и Рис. 4.5). К сожалению, радионаблюдений, проведённых одновременно с этими всплесками, не было найдено, поэтому ни один из них не может быть исключён как кандидат на галактический аналог FRB.

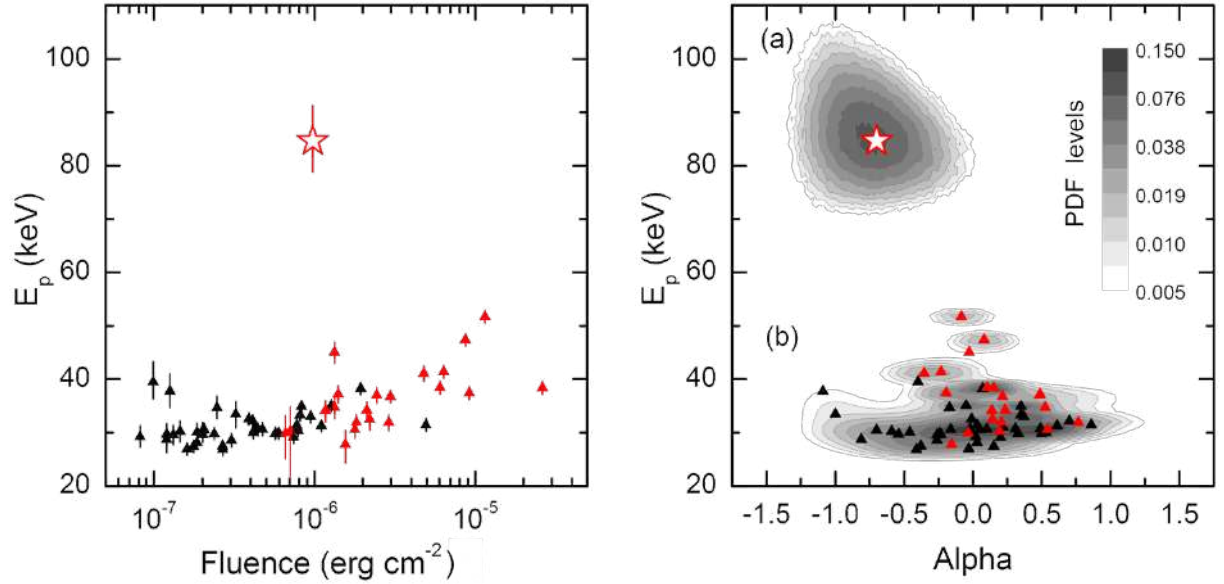


Рисунок 4.4: Слева: Зависимость E_p от интегрального потока S . Красным цветом обозначены короткие всплески, зарегистрированные Конус-Винд в 2015–2020 годах; красной звездой отмечен всплеск 28 апреля. Чёрные символы обозначают всплески, зарегистрированные *Fermi*-GBM в 2014–2016 годах [174]. Энергетические потоки измерялись в диапазоне 20 – 500 кэВ для всплесков Конус-Винд и 8 – 200 кэВ для всплесков GBM соответственно. Все ошибки приведены на уровне 68%. Справа: двумерные функции плотности вероятности (PDF) для параметров модели CPL в плоскости $\alpha - E_p$ для всплески 28 апреля (i) и объединённой выборки из 21 всплески Конус-Винд и 41 всплески GBM (ii) (красные и чёрные точки соответственно). Всплеска 28 апреля имеет наивысшее значение E_p (~ 85 кэВ) среди всех всплесков от SGR 1935+2154, тогда как её интегральный поток и α находятся в пределах наблюдаемых значений. Вероятность того, что E_p всплески, связанной с FRB, соответствует объединённой выборке всплесков SGR 1935+2154, составляет $\sim 2 \times 10^{-10}$, что подчёркивает её уникальность по сравнению с остальной популяцией.

Оценка частоты таких спектрально жестких всплесков по данным *Конус-Винд* составляет $\sim 0.03/\text{год}/\text{магнитар}$, что согласуется с оценкой частоты радиовсплесков, подобных FRB 200428, с энергией $E_r > 10^{34}$ эрг, составляющей $(0.007 - 0.04/\text{год}/\text{магнитар})$, полученной из наблюдений CHIME [132]. Стоит отметить, что жёсткая вспышка, обнаруженная 25 января 2009 года от магнитара 1E 1547.0–5408, имела схожую двухпиковую кривую блеска со вспышкой 28 апреля, с почти идентичным расстоянием между двумя пиками, и радиопульсации также были зарегистрированы от этого источника примерно через 8 часов после вспышки [176].

Таблица 4.4: Пиковые энергии E_p (модель CPL) и энергетические потоки всплесков магнитаров с жестким спектром, зарегистрированных *Конус-Винд*.

Дата	Время триггера	Источник	E_p (кэВ)	S (10^{-6} эрг/см ²)
19981022[177] ^{a,b}	15:40:46.627	SGR 1900+14	110 ± 30	$0.39^{+0.04}_{-0.04}$
19990110[177] ^{a,b}	08:39:01.078	SGR 1900+14	75 ± 6	$0.80^{+0.05}_{-0.06}$
19980618[178] ^b	01:42:33.495	SGR 1627-41	$\sim 100 - 150$	~ 700
20090125[179, 180] ^c	08:43:37.781	1E 1547.0–5408	$\sim 70 - 100$	~ 250
20090129[181] ^d	09:17:07.224	1E 1547.0–5408	$\sim 90 - 100$	~ 50
20200428	14:34:24.084	SGR 1935+2154	85^{+7}_{-6}	$0.97^{+0.04}_{-0.04}$

Примечания:

Ошибки даны на уровне 68%. Интегральные потоки вычислены в диапазоне 20–500 кэВ.

^a Два жестких всплеска от SGR 1900+14 также были зарегистрированы BATSE [182].

^b Параметры были оценены с использованием модели ОТТВ.

^c Всплеск также был зарегистрирован *INTEGRAL* [183, 156].

^d Всплеск также был обнаружен *Fermi*-GBM

(<https://gamma-ray.nsstc.nasa.gov/gbm/science/magnetars.html>).

Одновременное обнаружение FRB и рентгеновской вспышки от магнитара в Млечном Пути открывает новую захватывающую главу в эпохе современной астрономии транзиентных явлений. Дальнейшее выявление подобных событий, а также наблюдения близких к нам источников FRB в разных диапазонах электромагнитного спектра, позволят получить уникальную инфор-

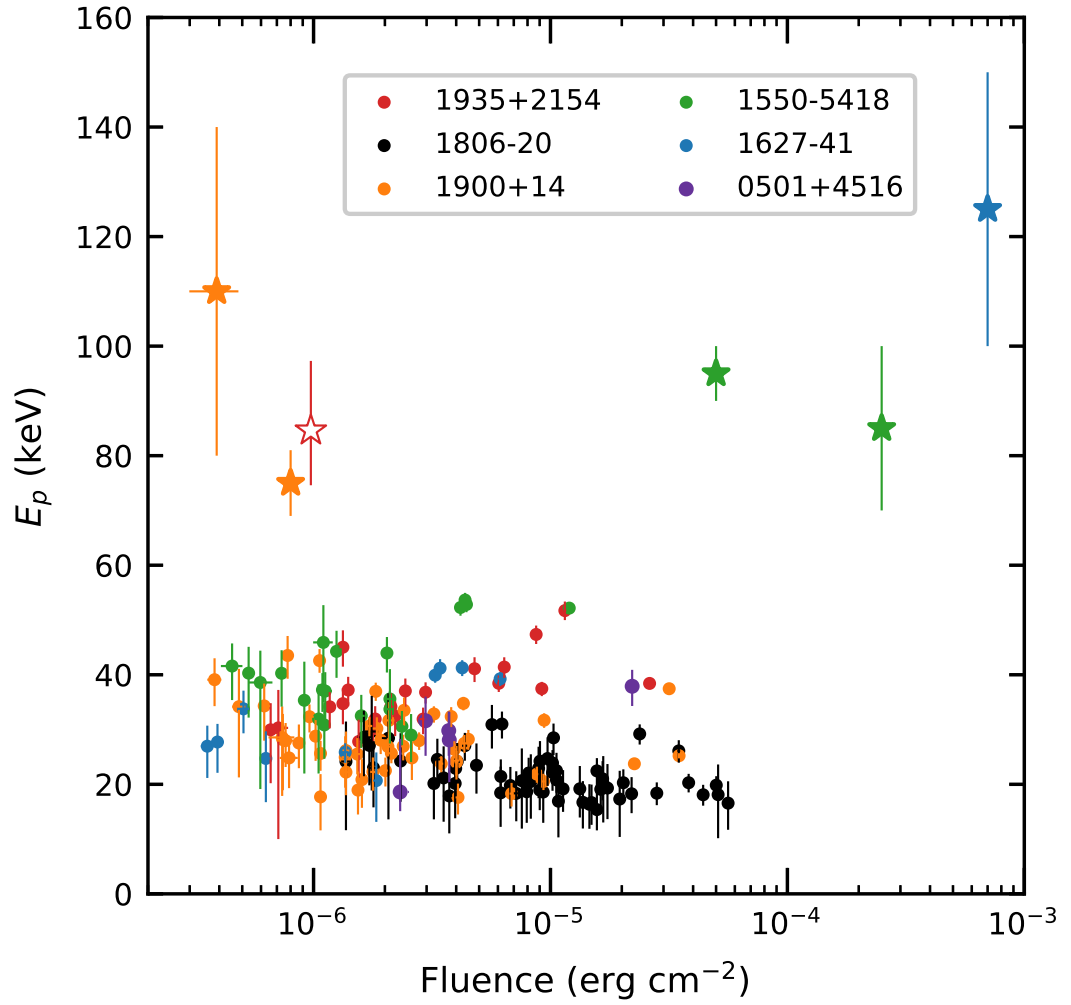


Рисунок 4.5: Пиковые энергии E_p от интегральных потоков для 320 ярких магнитарных вспышек, зарегистрированных Конус-Винд с ноября 1994 года. Шесть вспышек, отмеченных звездами, имеют необычно высокие значения E_p (см. Таб. 4.4): две вспышки от SGR 1900+14 (оранжевым), одна от SGR 1627-41 (синим), две от 1E 1547.0–5408 (зеленым) и событие 28 апреля (красным). Погрешности указаны на уровне 68%. Для чрезвычайно ярких вспышек от SGR 1627-41 и 1E 1547.0–5408 (отмеченных звездами) погрешности отражают систематические неопределенности из-за высокого уровня счета, которые превышают статистические ошибки.

мацию о процессах, происходящих в области излучения и, таким образом, уточнить модели FRB.

4.5 Последующие одновременные детектирования

В октябре 2022 года от SGR 1935+2154 было зарегистрировано еще две вспышки с одновременным детектированием в радио- и жестком рентгеновском диапазонах. Всплески в радиодиапазоне гораздо более слабые, чем FRB 200428, с интегральными потоками около 10 кЯн мс [136, 138] и 15 Ян мс [142]. Данные Конус-Винд доступны только для первого более яркого всплеска, который инструмент зарегистрировал в фоновом режиме. Спектр всплеска характеризуется пиковой энергией $E_p \sim 40$ кэВ, что лишь слегка превышает типичные значения для всплесков SGR 1935+2154 [140]. Во время второго всплеска Конус-Винд находился в режиме перезаписи данных триггера в бортовую память, в этом режиме доступны только данные в канале G2 (80 – 320 кэВ) и с более грубым временным разрешением ~ 4 с, не позволяющие увидеть слабое, не жесткое и короткое событие, подобное короткому всплеску от магнитара. Спектральный анализ данных, полученных инструментом *Insight*-HXMТ, зарегистрировавшим всплеск в рентгеновском диапазоне, пока не опубликован [143].

4.6 Заключение

В данной главе представлено исследование уникального события — вспышки магнитара SGR 1935+2154 от 28 апреля 2020 года, ассоциированной с радиовсплеском FRB 200428, которое стало первым наблюдательным подтверждением давно гипотезируемой связи FRB и магнитаров. Проанализированы временные, спектральные и энергетические характеристики всплеска. Сравнение с другими всплесками от SGR 1935+2154 и от других магнитаров подчеркивает пекулярность события, а его изучение и накопление статисти-

ки подобных событий открывает новые перспективы для понимания природы FRB и физики магнитаров.

В главе получены следующие результаты:

1. Получено первое наблюдательное подтверждение связи магнитаров и FRB, а также первое отождествление FRB с транзиентным явлением, наблюдаемым вне радиодиапазона. Максимумы рентгеновских пиков (14:34:24.427 и 14:34:24.455 UT) совпадают с радиопиками (14:34:24.42650 и 14:34:24.45547 UT) с точностью ± 2 мс, дополнительно подтверждая общий физический источник.
2. Проанализирован временной профиль всплеска и получены его временные характеристики, со значениями типичными для коротких всплесков магнитаров.
3. Спектральный анализ показал, что спектр всплеска лучше всего описывается моделями CPL ($\alpha \approx -0.7$, $E_p \approx 85$ кэВ) и 2BB ($kT_1 \approx 11$ кэВ, $kT_2 \approx 31$ кэВ). Энергии фотонов превышают 250 кэВ, что значительно выше типичных значений ($\lesssim 100$ кэВ) для всплесков SGR 1935+2154. Пиковая энергия $E_p \approx 85$ кэВ является рекордной для данного магнитара. Вероятность такого значения в объединённой выборке из 62 всплесков (21 от *Конус-Bund*, 41 от *Fermi-GBM*) составляет $\sim 2 \times 10^{-10}$, подчёркивая уникальность события.
4. Отсутствие спектральных изменений между рентгеновскими пиками, в отличие от радиоимпульсов (первый пик < 600 МГц, второй на более высоких частотах), указывает на отсутствие прямой связи между спектральными характеристиками радио- и рентгеновского излучения.
5. Интегральный поток в диапазоне 20 – 500 кэВ составляет $S \sim 9.7 \times 10^{-7}$ эрг/см², пиковые потоки для двух импульсов $\sim 7.5 \times 10^{-6}$ эрг/см²/с и 9.1×10^{-6} эрг/см²/с. При расстоянии до источника 10 кпк полная энергия $E_X \sim 1.2 \times 10^{40}$ эрг, а пиковая светимость $L_X \sim 1.1 \times 10^{41}$ эрг/с, что типично для ярких коротких всплесков магнитаров.

6. Среди ~ 320 ярких всплесков от шести магнитаров, зарегистрированных Конус-Винд за более 30 лет наблюдений, только пять имеют спектральную жёсткость, сравнимую или превышающую E_p вспышки 28 апреля. Частота таких событий на основе данных Конус-Винд оценивается как ~ 0.03 /год/магнитар, что согласуется с частотой FRB-подобных радиовсплесков, оцененной на основе данных CHIME ($0.007 - 0.04$ /год/магнитар).

По материалам Главы 4 на защиту выносится следующее положение:

- Первое одновременное детектирование магнитарной вспышки, сопровождавшейся быстрым радиовсплеском FRB 200428, подтверждающее связь между магнитарами и FRB. Свойства события среди вспышек от магнитара SGR 1935+2154 и других магнитаров, наблюдаемых в эксперименте Конус-Винд.

Результаты отражены в публикации:

- A. Ridnaia et al. A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst // Nat. Astron., v.5, 4, 2021, p. 372 - 377

Глава 5

Рентгеновские и радиовспышки магнитара 1E 1547.0–5408

Обнаружение FRB 200428 от галактического магнитара SGR 1935+2154, сопровождавшегося рентгеновским всплеском, стало важным событием, стимулировавшим интенсивный поиск аналогичных мультиволновых явлений у других магнитаров. К сожалению, архивные радионаблюдения удалось найти пока лишь для всплеска магнитара 1E 1547.0-5408, зарегистрированного 3 февраля 2009 года во время интенсивного периода активности источника. В данной главе представлен анализ этого архивного события на основе данных *Конус-Вунд*, *Swift*-BAT, *XMM-Newton* и *Parkes*.

5.1 Введение

Магнитар 1E 1547.0-5408 ¹ был впервые обнаружен в 1980 году с помощью спутника *Einstein* [185]. Лишь спустя почти три десятилетия, благодаря наблюдениям долговременной переменности в рентгеновском диапазоне и возможной ассоциации с остатком сверхновой SNR G327.24-0.13, объект был предложен в качестве кандидата в магнитары [27]. Он был окончательно идентифицирован как магнитар после обнаружения пульсаций с периодом ~ 2.07 с в радиодиапазоне [186], которые впоследствии были также зафиксированы в рентгеновском диапазоне [187]. Оценка дипольного магнитного поля составила $B \sim 6.4 \times 10^{14}$ Гс [188].

Вспышечная активность 1E 1547.0-5408 была впервые зарегистрирована в октябре 2008 года с использованием инструментов *Swift*-BAT и *Fermi*-GBM [189, 190]. Затем 22 января 2009 года магнитар продемонстрировал экс-

¹Также известный как SGR 1550-5418 [184]

тремальный эпизод вспышечной активности, сопровождавшийся самым значительным увеличением рентгеновской светимости за всю историю наблюдений этого источника. Поток мягкого рентгеновского излучения возрос в ~ 260 раз по сравнению с уровнем, наблюдавшимся в 2006 году. Во время этого эпизода был зарегистрирован «лес вспышек» из около 200 всплесков в течение нескольких часов [191, 156]. Это событие инициировало масштабную кампанию мониторинга с участием ряда рентгеновских обсерваторий, включая *XMM-Newton*, *Chandra*, *INTEGRAL*, *Swift*, *Suzaku* и *Fermi*. В ходе наблюдений было сделано впечатляющее открытие: вокруг магнитара были обнаружены расширяющиеся рентгеновские кольца, образованные рассеянием фотонов, испущенных во время яркого всплеска 22 января 2009 года, на различных слоях межзвёздной пыли [192]. Это позволило оценить расстояние до источника, которое составило приблизительно 4–5 кпк.

Конус-*Винд* зарегистрировал 28 триггерных событий, связанных с магнитаром 1E 1547.0-5408, все из которых произошли во время эпизода активности источника в 2009 году.

5.2 Наблюдения в рентгеновском диапазоне

Конус-*Винд* зарегистрировал вспышку 3 февраля 2009 года в момент времени $T_0 = 19:33:02.351$ UT (70 382.351 с с начала суток). Скорректированное с учетом времени распространения сигнала от *Винд* до Земли геоцентрическое время срабатывания триггера составило $T_{0,\text{Earth}} = 19:33:05.303$ UT (70 385.303 с). Для сопоставления времен прихода всплеска в рентгеновском и радио-диапазонах они были приведены к барицентру Солнечной системы с использованием эфемерид JPL-DE405. В барицентрической динамической шкале времени (TDB) соответствующее время составило 19:31:28.65 TDB.

Всплеск также был зарегистрирован инструментом *Swift*-BAT, однако источник находился вне поле зрения BAT, что не позволило получить спектральные данные. В мягком рентгеновском диапазоне магнитар наблюдался телескопом *XMM-Newton* в период с 3 по 4 февраля 2009 года. Временные профили всплеска, полученные *XMM-Newton*, *Swift*-BAT, Конус-*Винд* представлены на Рис. 5.1.

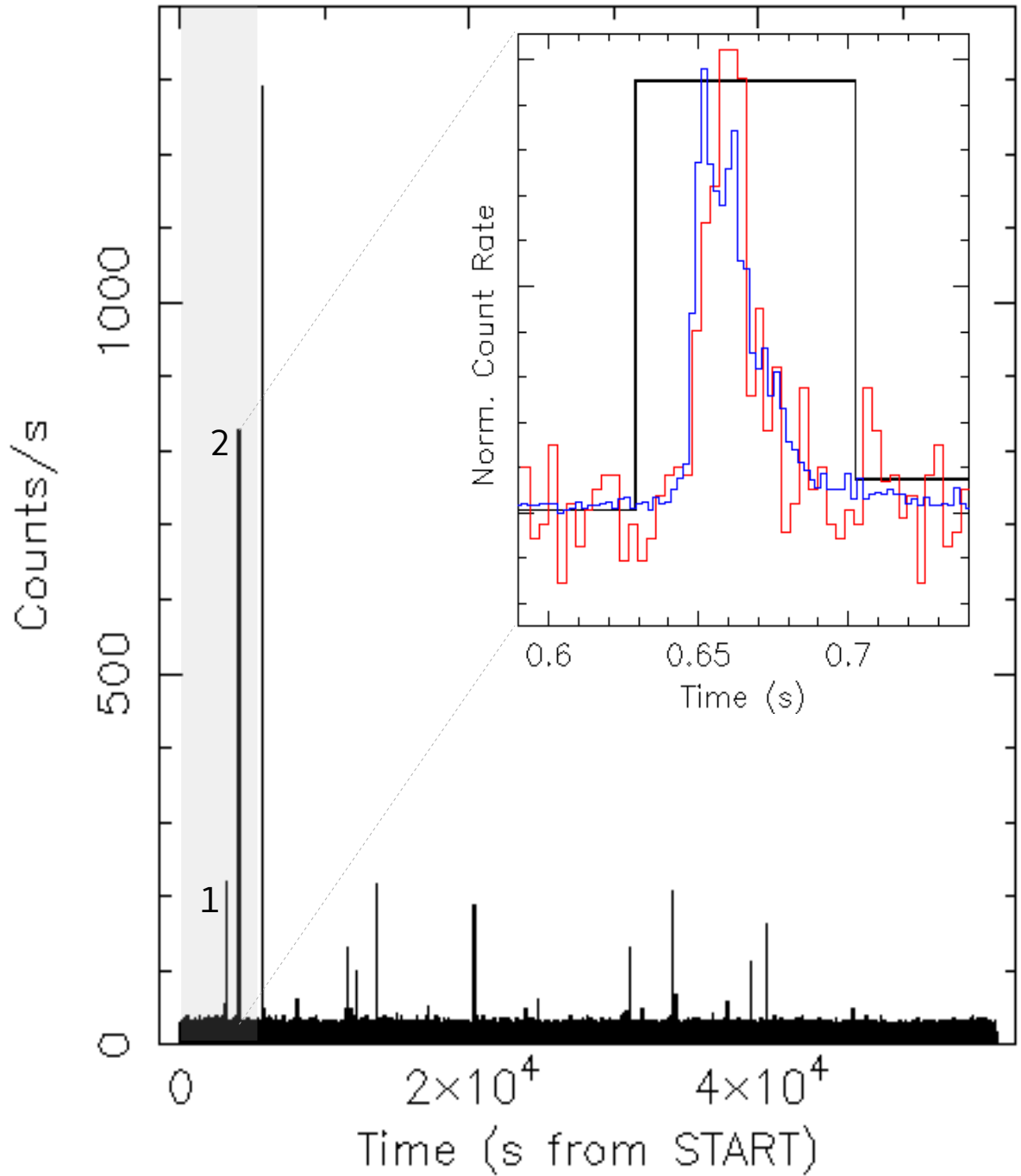


Рисунок 5.1: Временной профиль в диапазоне 2–10 кэВ, полученный с помощью инструмента EPIС-rp телескопа *XMM-Newton* с временным разрешением 0.5 с, где серая область обозначает интервал времени, охваченный наблюдениями радиотелескопа Parkes. Обнаруженные рентгеновские всплески в интервале пересечения с радионаблюдениями отмечены как «1» и «2». Увеличенная область показывает всплеск «2», зарегистрированный EPIС-rp в диапазоне 2–10 кэВ (чёрная линия; временное разрешение 73.4 мс), *Swift*-BAT в диапазоне 15–100 кэВ (красная линия; временное разрешение 3 мс) и *Конус-Винд* в диапазоне 20–350 кэВ (синяя линия; временное разрешение 2 мс).

Профиль всплеска 1E 1547.0–5408 в данных Конус-Винд (Рис. 5.2) демонстрирует четко выраженную двухпиковую структуру. Всплеск характеризуется резким нарастанием интенсивности (< 10 мс), начинающимся в момент $T_0 - 0.016$ с, достигающим максимума примерно в $T_0 - 0.008$ с, за которым следует второй пик в $T_0 + 0.002$ с, после чего интенсивность постепенно затухает до фонового уровня к $T_0 + 0.078$ с. Полная длительность всплеска, определенная на уровне 5σ в объединенном энергетическом диапазоне G1+G2 (20–320 кэВ), составляет $T_{100} = 0.094$ с. Длительности T_{90} и T_{50} составляют 0.044 ± 0.010 с и 0.014 ± 0.003 с соответственно.

За время вспышки был накоплен один многоканальный энергетический спектр в интервале от T_0 до $T_0 + 0.064$ с. Спектральный анализ, как и ранее, проводился в пакете XSPEC с применением моделей 2BB и CPL. Для аппроксимации применялась статистика PG-stat, при этом спектральные каналы группировались с минимальным числом отсчётов не менее одного на канал, что обеспечивало корректность статистического анализа. Ограниченные ошибки параметров удалось получить только для модели CPL, которая демонстрирует хорошее соответствие данным (PG-stat/dof = 19.41/22). Для этой модели фотонный индекс составил $\alpha = -0.40^{+0.59}_{-0.64}$, а пиковая энергия в спектре νF_ν достигла $E_p = 40 \pm 6$ кэВ (все ошибки спектральных параметров указаны на уровне 68%).

Также был проведён совместный анализ спектров Конус-Винд и XMM-Newton EPIC-MOS, при котором к модели спектра Конус-Винд применялся поправочный коэффициент кросс-калибровки, учитывающий мёртвое время прибора и долю отсчётов всплеска с вычтенным фоном, зарегистрированных за время накопления спектра. Модель 2BB с поглощением дала хорошее соответствие ($\chi^2_\nu = 1.6$ при 16 степенях свободы) при фиксированном значении колонковой плотности водорода $N_H = 4.2 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ [193]. Полученные значения параметров составили: $kT_1 = 4.1 \pm 0.2$ кэВ, $R_1 = 65 \pm 4$ км, $kT_2 = 14.3 \pm 0.8$ кэВ, $R_2 = 5.5 \pm 0.8$ км. На основе этой модели был рассчитан болометрический поток 2.6×10^{-6} эрг/см². Наблюдаемые потоки в диапазонах 2–10 кэВ и 20–100 кэВ составили 3.1×10^{-7} эрг/см² и 1.5×10^{-6} эрг/см² соответственно. Модель CPL с поглощением дала значительно худшее соответствие данным ($\chi^2_\nu = 2.2$ при 17 степенях свободы).

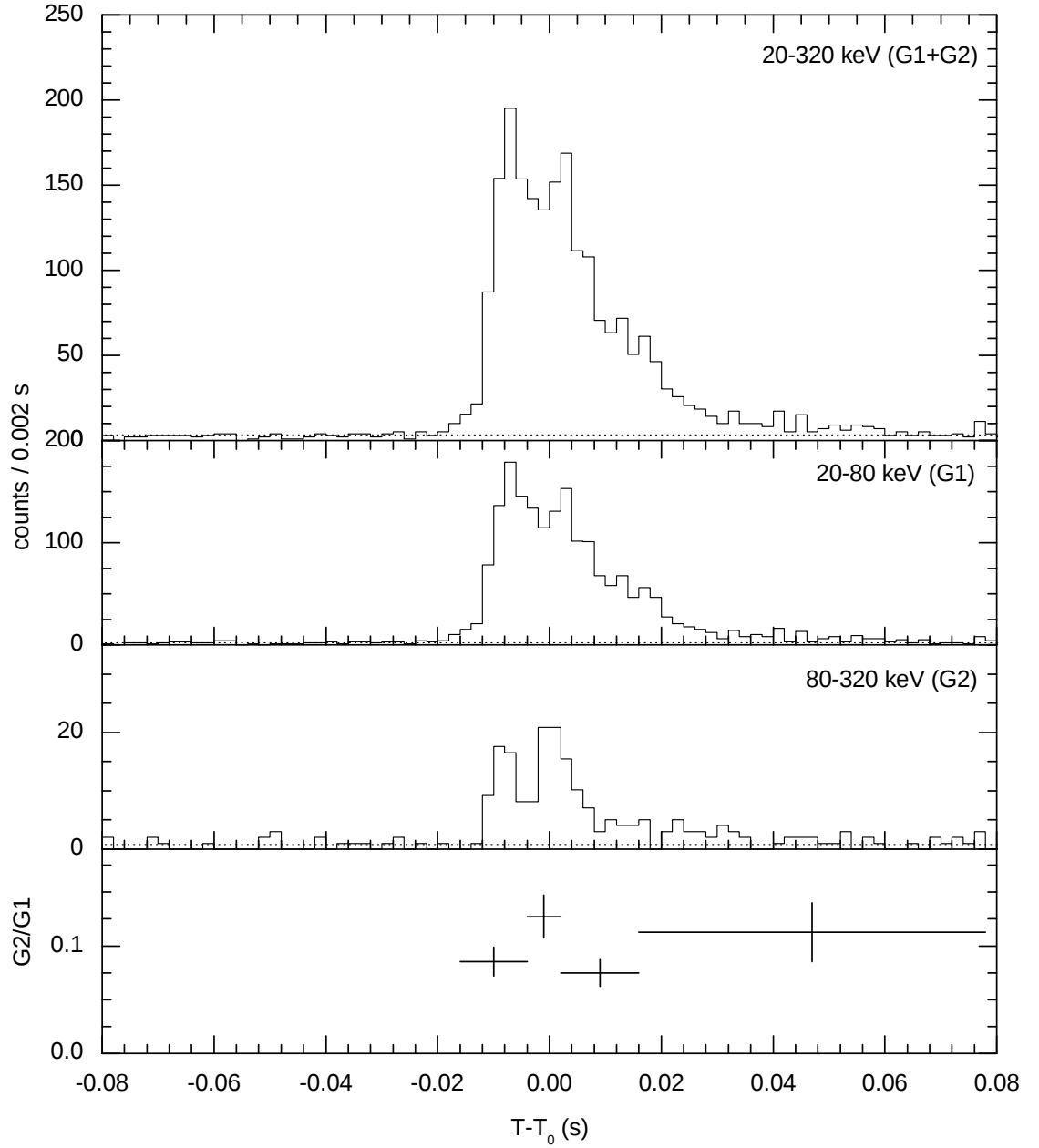


Рисунок 5.2: Временной профиль всплеска 3 февраля 2009 года по данным Конус-Винд в трех диапазонах: G1 (20 – 80 кэВ), G2 (80 – 320 кэВ) и объединенном диапазоне G1+G2 (20 – 320 кэВ). Горизонтальными пунктирными линиями отмечены уровни фонового счета. На нижней панели приведено отношение жесткости G2/G1 (доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 68%).

5.3 Радионаблюдения

Наблюдения магнитара 1E 1547.0–5408 в радиодиапазоне проводились с использованием 64-метрового радиотелескопа Parkes, начиная с 18:28:58 UT (3 февраля), что соответствует примерно пяти минутам после начала наблюдений телескопом *XMM-Newton*. Данные собирались в течение 1.5 часов на центральной частоте 6.6 ГГц. Во время наблюдения периодические пульсации не были обнаружены, однако были зарегистрированы два одиночных радиоимпульса (Рис. 5.3) в моменты времени 19:31:29.82 TDB (импульс А) и 19:31:34.05 TDB (импульс В). Указанные времена скорректированы с учётом задержки, вызванной дисперсией (использовалась мера дисперсии $DM = 830 \pm 50$ пк/см³ [186]), для частоты наблюдения. Погрешность меры дисперсии приводит к неопределённости во времени прихода всплесков, составляющей 4.4 мс. Все времена указаны для бесконечной частоты.

Импульс А был настолько интенсивным, что вызвал насыщение приёмного тракта AFB на протяжении примерно 0.2 с. Это отчётливо видно на красной кривой на Рис. 5.3, где импульс А имеет плоскую вершину, а базовая линия после него демонстрирует значительное искажение. Импульс В также был близок к уровню насыщения, что можно предположить на основе значения его пиковой точки и меньшего (по сравнению с импульсом А) искажения базовой линии. Для импульса А указанное выше время прихода соответствует середине насыщенного участка, а для импульса В — пиковой точке профиля.

Из-за насыщения приемной системы радиотелескопа точное определение потока импульса А оказалось невозможным, и был получен его нижний предел, равный 200 Ян мс. Однако благодаря одновременным наблюдениям с использованием приемной системы DFB3, команде телескопа удалось получить приблизительную оценку пиковой плотности потока насыщенного импульса. В данных DFB3 отношение сигнал/шум для импульса А в три раза превышает аналогичный показатель для импульса В. Поскольку импульс В нааходился на грани порога насыщения системы AFB, можно предположить, что интенсивность импульса А примерно в три раза превышала предел насы-

щения АFB. На основе этих данных поток импульса А был оценен примерно в 0.6 кЯн·мс.

5.4 Обсуждение

Во время полуторачасовых совместных архивных наблюдений магнитара 1E 1547.0–5408 в радио- и рентгеновском диапазонах, проведенных в период его интенсивной активности в 2009 году были зарегистрированы два ярких одиночных радиоимпульса. Первое событие (импульс А) с интегральным потоком ~ 0.6 кЯн·мс и длительностью ~ 200 мс произошло примерно через 1 с (половину периода вращения) после рентгеновской вспышки (вспышка «2»). Эта вспышка, характеризующаяся двухпиковым временным профилем с разделением между пиками в ~ 10 мс, имеет болометрический поток 2.6×10^{-6} эрг/см² и длительность ~ 94 мс. Радиовсплески не совпадают по фазе ни с экстраполированными радиопульсациями, зарегистрированными за шесть дней до этого (25 января [176]), ни с рентгеновскими пульсациями, демонстрируя фазовый сдвиг ~ 0.2 относительно обоих. Эти данные свидетельствуют о возможной связи между рентгеновскими и радио- всплесками.

Вероятность случайного совпадения (близкого по времени детектирования) одного из двух радиоимпульсов, произошедших в интервале ~ 1.2 с с одним из двух рентгеновских всплесков, зафиксированными в окне одновременных радио- и рентгеновских наблюдений может быть оценена следующим образом. Временное разрешение кривой блеска телескопа *XMM-Newton* составляет 0.5 с и соответствует ширине насыщенного радиоимпульса на фоновом уровне. Это позволило разделить интервал наблюдений на $\mathcal{N} \approx 10\,800$ временных бинов. В качестве консервативной оценки вероятности случайного совпадения было принято отношение N_c — общего числа конфигураций, при которых один случайный радиоимпульс может следовать за рентгеновским всплеском в пределах ≤ 3 бинов, к $\mathcal{N}$ — общему числу бинов. Значение $N_c = 12$ было рассчитано как произведение числа попыток (2 радиоимпульса), числа целей (2 рентгеновских всплеска) и числа допустимых бинов на попытку (3). Это соответствует максимальной вероятности случайного совпадения 1.1×10^{-3} (3.3σ). Аналогичным образом, при учёте задержки в два

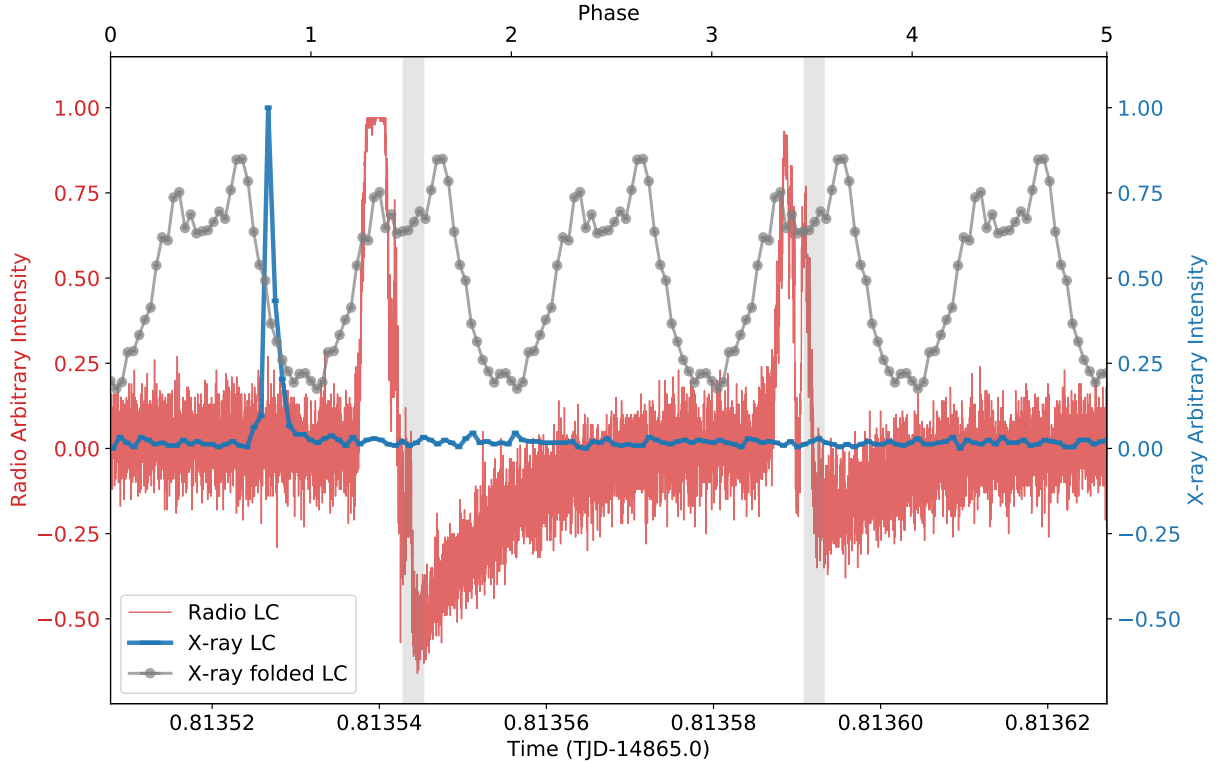


Рисунок 5.3: Одновременные наблюдения в рентгеновском и радио-диапазонах магнитара 1E 1547.0-5408, проведённые 3 февраля 2009 года, вблизи момента яркого рентгеновского всплеска (всплеск «2» на Рис. 5.1) и двух радиоимпульсов (импульсы А и В). Синяя линия представляет временной профиль всплеска, серая линия — свёрнутый временной профиль, полученные с использованием данных *XMM-Newton*. Радионаблюдения телескопа Parkes показаны красным цветом. Серые заштрихованные области соответствуют фазовым интервалам ожидаемых пиков радиопульсаций, экстраполированных на основе наблюдений Parkes от 25 января 2009 года. Плоская вершина первого радиосигнала (импульс А) и снижение интенсивности радиосигнала ниже среднего уровня шума после обеих пульсаций являются артефактами, вызванными насыщением приёмной аппаратуры.

бина ($\lesssim 1$ с) между пиком рентгеновского всплеска и началом радиоимпульса вероятность составила 7.3×10^{-4} (3.5σ). Что подкрепляет предполагаемую связь между рентгеновскими и радио- всплесками.

Сравнение рентгеновских всплесков, сопровождавшихся яркими радиоимпульсами, от магнитаров SGR 1935+2154 и 1E 1547.0–5408, зарегистрированных Конус-Винд, показало что оба события демонстрируют типичные для своих источников энергетические параметры и временные масштабы. Спектр всплеска SGR 1935+2154 отличался аномальной жесткостью, нетипичной для всплесков этого источника (см. Рис 2.7), и входил в 2% самых жестких магнитарных всплесков, когда-либо зарегистрированных Конус-Винд. В то же время спектр всплеска 1E 1547.0–5408 вполне типичный для популяции магнитаров.

Энергия, высвобожденная в ярких радиовсплесках SGR 1935+2154 и 1E 1547.0–5408, составила 3×10^{34} эрг и 8.4×10^{30} эрг соответственно, с соотношением радио- к рентгеновской энергии $E_r/E_X \sim 10^{-5}$ для SGR 1935+2154 и $\sim 10^{-9}$ для 1E 1547.0–5408. В обоих случаях эти вспышки были значительно ярче, чем стандартные одиночные радиоимпульсы магнитаров (обычно ниже нескольких Ян; например, [194]), но «слабые» по сравнению с FRB, хотя последние охватывают широкий диапазон энергий [72].

Общая картина, складывающаяся на основе анализа совместных наблюдений радио- и рентгеновских вспышек от 1E 1547.0–5408, а также ярких и слабых радио- и рентгеновских вспышек SGR 1935+2154 (см. Главу 4) указывает на существование широкого диапазона энергий радиовспышек магнитаров. В некоторых случаях эти вспышки могут напоминать FRB, а в других – быть ближе к типичной феноменологии одиночных импульсов радиоимпульсаров. Однако рентгеновские аналоги таких радиовспышек пока не поддаются простому прогнозированию и, вероятно, зависят от специфических параметров вспышки, большинство из которых все еще не полностью изучены.

5.5 Заключение

В данной главе представлен анализ рентгеновского всплеска от магнитара 1E 1547.0–5408, зарегистрированного 3 февраля 2009 года тремя рент-

геновскими экспериментами, включая *Конус-Винд*. Полученные временные, спектральные и энергетические параметры всплеска полностью соответствуют типичным характеристикам коротких всплесков магнитаров. В архивном совместном наблюдении, проведенным радиотелескопом Parkes было обнаружено два ярких одиночных радиоимпульса, один из которых случился через ~ 1 с после рентгеновского всплеска, что указывает на связь между данными мультиволновыми явлениями.

В главе получены следующие результаты:

1. Проведен временной и спектральный анализ рентгеновского всплеска от 1E 1547.0–5408, зарегистрированного 3 февраля 2009 года. Всплеск характеризуется выраженной двухпиковой структурой с общей длительностью ~ 0.094 с. Спектр всплеска, полученный с помощью эксперимента *Конус-Винд*, наилучшим образом аппроксимируется моделью CPL с параметрами $\alpha \sim -0.40$ и $E_p \sim 40$ кэВ. Совместный анализ данных *Конус-Винд* и *XMM-Newton* (EPIC-MOS) демонстрирует наилучшее соответствие модели 2BB с учетом поглощения при фиксированной колонковой плотности водорода $N_H = 4.2 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, где параметры составляют $kT_1 \sim 4.1$ кэВ, $R_1 \sim 65$ км, $kT_2 \sim 14.3$ кэВ, $R_2 \sim 5.5$ км. Все полученные характеристики подчеркивают типичность данного события для популяции коротких всплесков магнитаров.
2. Анализ совместного радионаблюдения выявил два ярких одиночных радиоимпульса от магнитара 1E 1547.0–5408 и отсутствие регулярных радиопульсаций. Наиболее интенсивный радиоимпульс, обладающий интегральным потоком ~ 0.6 кЯн·мс и длительностью ~ 200 мс, произошел спустя ~ 1 с после рентгеновского всплеска. Радиоимпульсы не совпадают по фазе с экстраполированными радиопульсациями, зарегистрированными шестью днями ранее (25 января 2009 года). Оценка вероятности случайного совпадения этих событий составляет $\sim 1.1 \times 10^{-3}$, указывая на их возможную физическую связь.
3. По энергетическим характеристикам радиовсплеск занимает промежуточное положение между типичными радиоимпульсами магнитаров и яр-

кими FRB-подобными всплесками, указывая на широкий диапазон радиосветимостей магнитаров.

По материалам Главы 5 на защиту выносится следующее положение:

- Результаты анализа рентгеновского всплеска магнитара 1E 1547.0–5408, зарегистрированного 3 февраля 2009 года инструментами *Конус-Bund*, *Swift-BAT*, *XMM-Newton*, для которого присутствует архивное радионаблюдение телескопа Parkes.

Результаты отражены в публикации:

- G. L. Israel, .., A. Ridnaia et al. X-Ray and Radio Bursts from the Magnetar 1E 1547.0-5408 // *Astrophys. J.*, v.907, 1, 2021, ArtNo: #7

Глава 6

Поиск возможного жесткого рентгеновского излучения, сопровождающего FRB

Хотя FRB проявляют себя исключительно в радиодиапазоне, их загадочная природа, выраженная в разнообразии морфологии импульсов, спектральных индексов и поляризационных характеристик, стимулировала систематические поиски их многоволновых аналогов по всему электромагнитному спектру. Эти усилия, охватывающие оптический, ультрафиолетовый, рентгеновский и гамма-диапазоны, а также области высоких энергий предоставляют ценные эмпирические ограничения для теоретических моделей, уточняя механизмы генерации FRB и их связь с компактными астрофизическими объектами, такими как магнитары.

В настоящей главе представлены результаты архивного поиска сопутствующего жесткого рентгеновского излучения для более чем 700 опубликованных FRB с использованием непрерывных данных эксперимента *Конус-Винд*, охватывающих весь период активных наблюдений FRB. Данная работа опирается на значительный рост числа известных FRB за последние годы и полное небесное покрытие, обеспечиваемое *Конус-Винд*, что создает уникальную возможность для выявления высокоэнергетических транзиентных сигналов. Структура главы следующая: во введении подчеркивается необходимость многоволновых исследований для прояснения источников FRB и механизмов их излучения. В разделе 6.2 описана используемая выборка из 721 FRB, отобранных из базы TNS. В разделе 6.3 изложена методология поиска и определения верхних пределов, а в разделе 6.4 представлены результаты и их обсуждение.

6.1 Введение

Феномен FRB продолжает оставаться одной из наиболее интригующих загадок современной астрофизики. Благодаря значительному прогрессу в развитии наблюдательных технологий и использованию высокочувствительных радиотелескопов, таких как Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME), Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP), Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST) и других, к настоящему времени зарегистрировано около тысячи ¹ FRB, включая как однократные, так и повторяющиеся всплески. Однако, несмотря на накопление обширного объема наблюдательных данных, природа источников FRB и физические механизмы, ответственные за их излучение, остаются неизвестными.

С момента открытия феномена в 2007 году было предложено множество теоретических моделей, объясняющих природу FRB [100]. Однако ни одна из них не способна в полной мере объяснить наблюдаемое многообразие характеристик этих событий, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований, включая многоволновые наблюдения и координированные многоканальные кампании. Значительный прорыв был достигнут с обнаружением FRB 200428, ассоциированного с галактическим магнитаром SGR 1935+2154, которое сопровождалось рентгеновским всплеском (см. Глава 4). Это событие существенно укрепило гипотезу о магнитарном происхождении FRB и открыло перспективы для поиска их высокоэнергетических аналогов [111]. В октябре 2022 года были зарегистрированы дополнительные совпадающие радио- и рентгеновские события от того же источника, характеризующиеся более слабым радиоизлучением, большей длительностью и мягкими рентгеновскими спектрами, типичными для магнитаров. Данные наблюдения подчеркивают необходимость поиска высокоэнергетических аналогов внегалактических FRB. Такие исследования могут помочь установить, сопровождаются ли все FRB высокоэнергетическим излучением или только некоторые из них, что позволит глубже понять окружающие условия и физические процессы, лежащие в основе этих явлений.

¹см. <http://www.wis-tns.org/>

На сегодняшний день, за исключением упомянутых событий от магнитара SGR 1935+2154, не зарегистрировано ни одного другого транзиента вне радиодиапазона, ассоциированного с FRB. Наличие или отсутствие одновременного или запаздывающего излучения в различных диапазонах длин волн критически важно для уточнения механизмов излучения и идентификации источников FRB. В последние годы были проведены обширные многоволновые поиски аналогов FRB в различных диапазонах электромагнитного спектра, однако без обнаруженного детектирования [195]. В высокоэнергетической области спектра систематические исследования опирались на архивные данные спутников *Fermi* (GBM [196], LAT [197]), *INTEGRAL* (IBIS/ISGRI [198]), *AstroSat* (CZTI [199]), *Insight-HXMT* (HE [200]), *AGILE* (MCAL, GRID [201]), а также мультинструментальных кампаний [202, 203]. Однако большинство этих работ основывалось на небольших выборках FRB, доступных на момент выхода работ (менее 50 источников), или сосредоточивалось на отдельных объектах, что ограничивает их статистическую мощность.

6.2 Выборка FRB

Для проведения поиска сопутствующего излучения были использованы общедоступные данные о FRB, зарегистрированных в базе Transient Name Server [TNS, 204], которая по состоянию на 27 апреля 2022 года включала 799 событий и являлась наиболее полным каталогом имеющихся событий. Из исходной выборки были исключены шесть событий из-за неполноты данных, таких как отсутствие координат FRB или времени регистрации сигнала, а также 25 событий из-за отсутствия соответствующих данных Конус-Винд в необходимые временные интервалы. Кроме того, из анализа были исключены 14 повторных источников, для которых зарегистрировано менее шести всплесков на источник и отсутствовала точная локализация. В результате итоговая выборка составила 721 событие, зарегистрированное с использованием 14 радиотелескопов (см. Таб. 6.1) в период с 25 января 2001 года по 5 января 2022 года. Выборка включает 573 однократных FRB и 148 всплесков от восьми повторных источников: FRB 121102A, FRB 180814A, FRB 180916B, FRB 181030A, FRB 190303A, FRB 190711A, FRB 200120E и FRB 201124A.

Полный перечень рассмотренных событий и их измеренные параметры доступны на сайте лаборатории². На Рис. 6.1 представлено распределение меры дисперсии (DM) для итоговой выборки FRB. Для оценки верхних пределов на отношение потока энергии в радиодиапазоне к рентгеновскому потоку были использованы данные, представленные в первом каталоге CHIME/FRB [83].

Таблица 6.1: Список радиотелескопов с количеством обнаруженных FRB, включённых в рассматриваемую выборку.

Телескоп	FRB	Диапазон (ГГц)	Расположение
Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME)	566	0.4 – 0.8	Канада
Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP)	47	0.7 – 1.8	Австралия
National Astronomy and Ionosphere Center, NAIC (Arecibo)	12	0.1 – 11	Пуэрто-Рико
Parkes Observatory	33	0.6 – 26	Австралия
Molonglo Observatory Synthesis Telescope (MOST)	17	0.6 – 1.2	Австралия
Robert C. Byrd Green Bank Telescope (GBT)	15	0.3 – 110	США
Deep Synoptic Array-110 (DSA-110)	1	1.3 – 1.5	США
Effelsberg 100-m Radio Telescope	4	0.4 – 95	Германия
Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST)	2	0.1 – 3	Китай
Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT)	4	0.2 – 1.4	Индия
Большая сканирующая антенна (БСА)	10	0.109 – 0.111	Россия
Sardinia Radio Telescope (SRT)	3	0.3 – 116	Италия
Very Large Array (VLA)	4	0.1 – 50	США
Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT)	3	0.1 – 8.3	Нидерланды

6.3 Методика анализа

Для поиска излучения, связанного с FRB, для каждого события определялось время сигнала T_0 в данных эксперимента *Конус-Винд*. Для этого рассчитывались две временные поправки: частотно-зависимая задержка, обусловленная дисперсией радиосигнала, при которой излучение более низкой частоты запаздывает относительно излучения на более высокой (бесконечной) частоте, и задержка, связанная с временем распространения сигнала между положениями *Конус-Винд* и радиотелескопа. Суммарная величина этих поправок варьировалась от нескольких миллисекунд до сотен секунд, со средним (медианным) значением 9.2 (4.9) с. Затем осуществлялся поиск

²<http://www.ioffe.ru/LEA/FRB/>

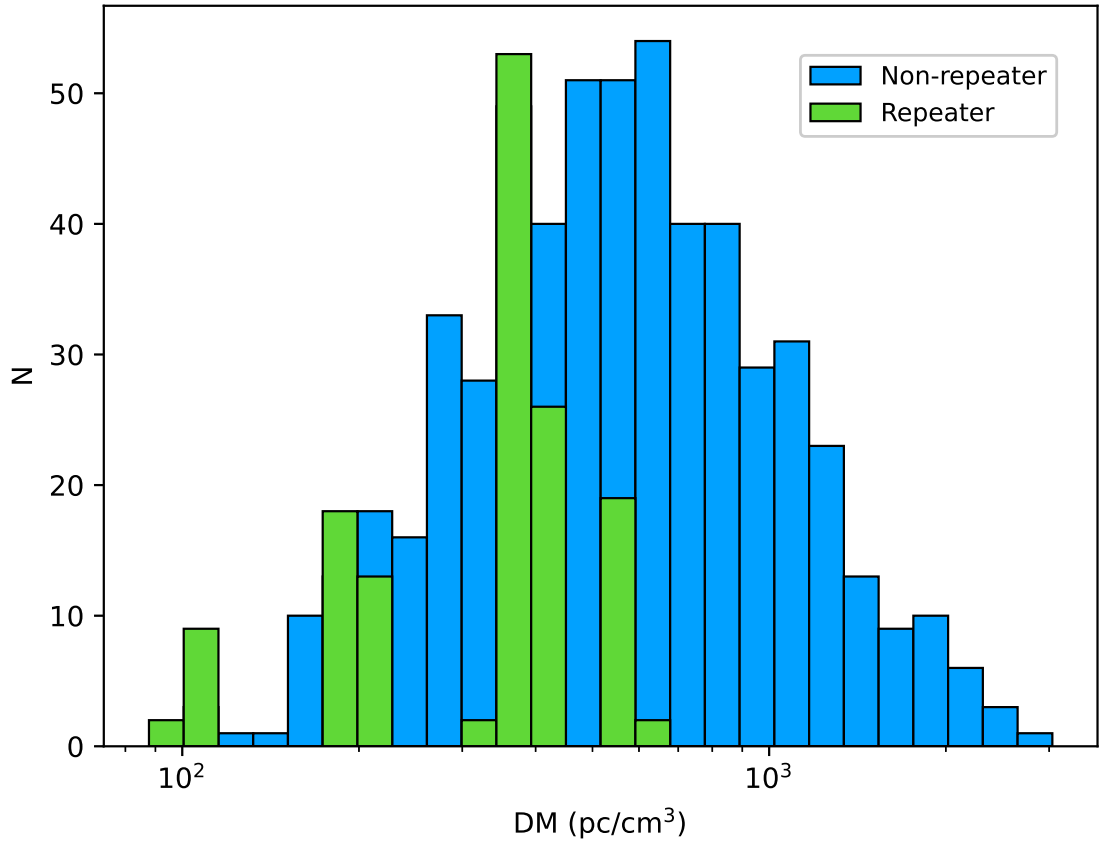


Рисунок 6.1: Распределение меры дисперсии (DM) для итоговой выборки из 581 FRB: 573 однократных события и 148 всплесков от восьми репитеров. 18 источников FRB, которые были ассоциированы с родительскими галактиками, имеют диапазон расстояний от 3.6 Мпк до 4 Гпк.

значимого сигнала, превышающего фоновый уровень (на уровне $> 5\sigma$), в интервале длительностью 400 с, центрированном на T_0 . Выбор длительности интервала поиска в 400 с был обоснован, с одной стороны, наблюдением галактического FRB 200428, сопровождавшегося одновременным излучением в жёстком рентгеновском диапазоне, а с другой – теоретическими предсказаниями слабого высокоэнергетического излучения на временных масштабах порядка нескольких секунд после радиосигнала [110, 205]. Поиск проводился в шести комбинациях энергетических каналов (G1, G2, G3, G1+G2, G2+G3, G1+G2+G3) на временных масштабах от 2.944 до 100 с, в соответствии с методологией, описанной в [145]. Для оценки фонового уровня использовалась линейная аппроксимация, рассчитанная на основе двух временных интервалов: до ($T_0 - 1000$ с, $T_0 - 250$ с) и после ($T_0 + 250$ с, $T_0 + 1000$ с) интервала поиска.

6.3.1 Верхние пределы на интегральный и пиковый потоки

В случае отсутствия значимого сигнала для каждого события определялись верхние пределы на пиковый и интегральный потоки с использованием четырех спектральных моделей (см. Таб. 6.2). Эти модели представляют типичные спектры коротких и длинных гамма-всплесков (GRB; [206, 207]), мощные начальные импульсы гигантских вспышек магнитаров (MGF; [208]), а также спектр рентгеновской вспышки, связанной с FRB 200428 (Глава 4).

Верхний предел на поток определялся как верхняя граница доверительного интервала для потока от источника в соответствии с методологией, описанной в [209]. Для оценки верхнего предела C_{ub} на количество отсчётов от источника для конкретного временного профиля, измеренного в энергетическом диапазоне ΔE , использовался бин с максимальной скоростью счёта. Для данного бина C_{max} - наблюдаемое количество отсчётов, C_{bg} - оцененное количество фоновых отсчётов, а σ_{bg} - погрешность оценки фона. Верхний предел C_{ub} (соответствующий уровню доверия CL , в данном анализе $CL = 0.9$) определялся таким образом, чтобы вероятность наблюдения $C > C_{max}$ при гауссовом распределении отсчетов с $\mu = \sigma^2 = (C_{ub} + C_{bg} + \sigma_{bg}^2)$ равнялась CL

(см. Рис. 6.2). При этом было установлено, что вклад члена σ_{bg}^2 в σ^2 составляет менее одного процента, что позволяет пренебречь им в расчетах.

Верхний предел на количество отсчётов от источника затем пересчитывался в верхний предел на интегральный или пиковый поток в стандартном энергетическом диапазоне эксперимента Конус-Винд (20–1500 кэВ) с использованием коэффициента преобразования отсчётов в энергию k . Этот коэффициент зависит от энергетического диапазона ΔE , спектральной модели, положения FRB на небесной сфере (угла падения излучения на детектор) и отклика детектора Конус-Винд. Максимальное значение kC_{ub} или $kC_{ub}/2.944$ принималось как верхний предел на интегральный поток для коротких событий (длительностью менее 2.944 с) или на пиковый поток для длительных событий соответственно.

Таблица 6.2: Четыре спектральные модели, используемые в вычислении верхних пределов.

Описание	Модель	Параметры		
		α	β	E_p (кэВ)
Типичные длинные GRB	Band	-1.0	-2.5	300
Типичные короткие GRB	CPL	-0.5	...	500
MGF (GRB 200415A)	CPL	-0.6	...	1190
SGR/FRB 200428	CPL	-0.72	...	85

6.3.2 Стековый анализ

Существующие теоретические модели предсказывают существенно различающиеся характеристики высокоэнергетических аналогов FRB, при этом в большинстве моделей ожидается, что сопровождающее излучение слишком слабое, чтобы быть обнаруженным современными инструментами (см., например, [210]). Если принять, что параметры, определяющие излучение в жёстком рентгеновском/мягком гамма-диапазоне, одинаковы для всех FRB, возможно использовать метод стекового анализа. Этот метод позволяет выявлять слабые источники, находящиеся ниже порога детектирования, за счет

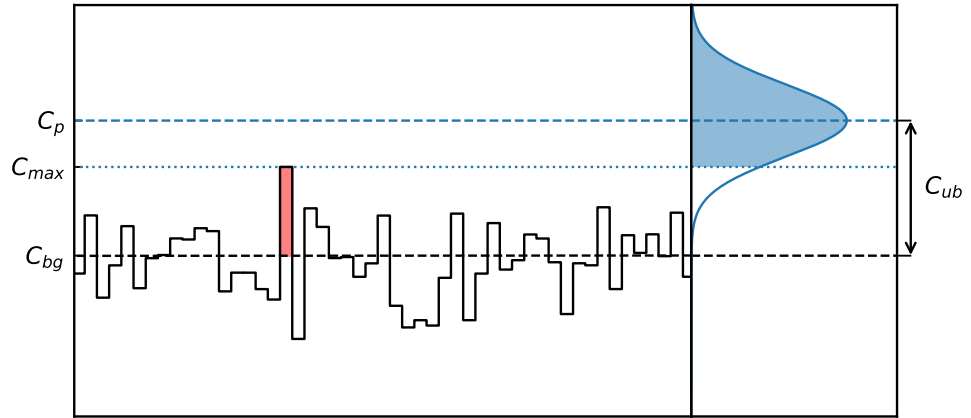


Рисунок 6.2: Иллюстрация определения оценки верхнего предела как минимальной интенсивности источника, при которой вероятность его обнаружения достигает заданного уровня значимости (90%): для бина с максимальной наблюдаемой скоростью счета C_{max} (заштрихованного) оценивается фоновая скорость счета C_{bg} (пунктирная линия). Верхний предел на отсчеты источника C_{ub} (соответствующий 90% уровню значимости) определяется таким образом, что вероятность наблюдения $C > C_{max}$, при условии, что отсчеты имеют гауссово распределение с $\mu = \sigma^2 = (C_{bg} + C_{ub})$, равна 0.9.

объединения сигналов от множества индивидуально не обнаруживаемых событий, что существенно снижает уровень статистического шума.

Стековый анализ данных эксперимента *Конус-Винд* проводился путём суммирования скоростей счёта с вычтенным фоновым сигналом для временных профилей отдельных событий, центрированных на моменте времени T_0 , с последующей нормировкой на число суммированных событий. Для оценки верхних пределов суммированного временного профиля применялась методика, аналогичная описанной в разделе 6.3.1, с той разницей, что верхний предел R_{ub} определялся для скоростей счёта, а не для количества отсчётов C_{ub} . Были рассчитаны два набора верхних пределов: первый — на основе бина с максимальной скоростью счёта (при гипотезе о значительной задержке, превышающей 3 с, между радиовсплеском и его высокоэнергетическим аналогом), второй — на основе бина, включающего момент T_0 (случай без задержки).

Анализ проводился отдельно для всплесков от каждого повторного источника в выборке, а также для неповторяющихся FRB.

6.4 Результаты

6.4.1 Обнаруженные кандидаты

Проведенный поиск выявил два потенциальных транзиентных события, совпадающих по времени с FRB 160206A и FRB 171019A (Рис. 6.3). Первое событие было идентифицировано как гамма-всплеск GRB 160206B, который также был зарегистрирован и локализован инструментом *Fermi*-GBM (триггер 476446756/bn160206430). Однако локализация данного гамма-всплеска не соответствует положению FRB, находящемуся далеко за пределами 3σ области локализации GBM.

Во втором случае эклиптическая широта транзиента, определенная по отклику детекторов *Конус-Винд* [211], не согласуется с положением FRB 171019A. Кроме того, положение FRB не затенено Землей для телескопа *Swift* и находится на границе поля зрения инструмента BAT. В таком случае, гамма-всплеск, связанный с FRB, мог бы проявиться в данных BAT как

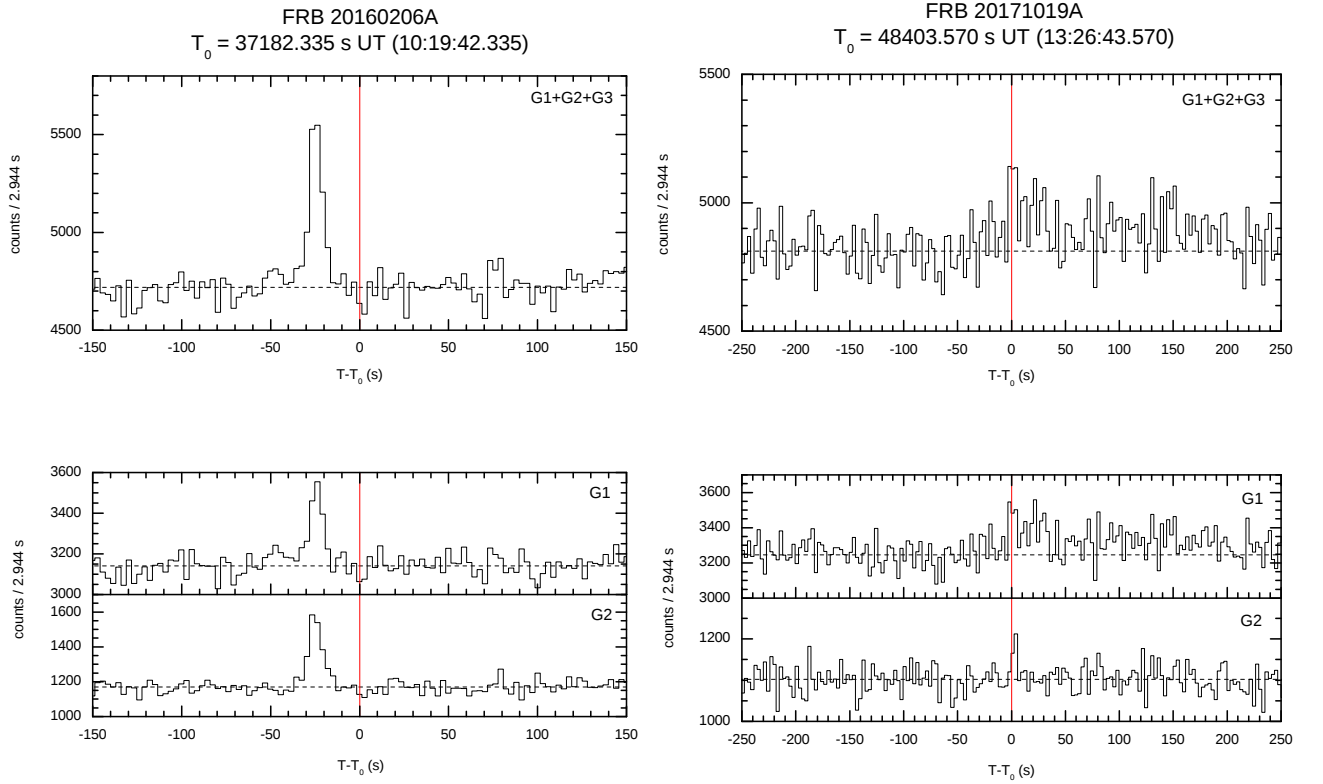


Рисунок 6.3: Транзиенты, обнаруженные для FRB 160206A (12σ , слева) и FRB 171019A (5.3σ , справа). Красной линией отмечено ожидаемое время прихода сигнала в данных Конус-Винд, скорректированное с учетом поправок на дисперсию и распространение сигнала.

избыток скорости счёта. Анализ данных BAT за период, соответствующий времени FRB 171019A ³, не выявил значимого увеличения скорости счёта на уровне 5σ . Это, в сочетании с формой временного профиля в данных Конус-Винд и откликом его детекторов, указывает на то, что данный транзиент, вероятно, является случайно совпавшим по времени гамма-всплеском.

На основании вышеперечисленного сделан вывод, что оба обнаруженных транзиентных события не имеют физической связи с соответствующими FRB. Согласно данным непрерывных наблюдений эксперимента Конус-Винд в период с ноября 1994 года по август 2017 года [212], средняя частота обнаружения гамма-всплесков в данных Конус-Винд составляет около 0.8 GRB в день. При такой частоте ожидаемое число гамма-всплесков, зарегистрированных Конус-Винд за общее время экспозиции поиска (~ 3.25 дня), составляет 2^{+3}_{-2} (95% CI), что находится в полном согласии с числом наблюдавшихся событий.

³https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/swift/data/obs/2017_10/00780203000/bat/rate/

6.4.2 Верхние пределы

Проведенный поиск не выявил значимого излучения в жёстком рентгеновском и мягком гамма-диапазоне, связанного с 721 FRB, зарегистрированным в базе TNS. Полученные верхние пределы на высокоэнергетическое излучение представлены в Таб. 6.3. Стековый анализ данных позволил установить верхние пределы, которые в среднем в 20 раз (и в 25 раз для верхних пределов, рассчитанных с использованием бина, включающего T_0) строже, чем индивидуальные верхние пределы. Результаты анализа суммированы на Рис. 6.4.

Таблица 6.3: Верхние пределы на интегральный/пиковый поток в диапазоне 20–1500 кэВ.

Спектральная модель	Диапазон верхних пределов (10^{-7} эрг/см ²)
Типичные длинные GRB*	1 – 4
Типичные короткие GRB	5 – 10
MGF, GRB 200415A	9 – 20
SGR/FRB 200428	1 – 7

* Для длинных всплесков приведены верхние пределы на пиковый поток в единицах 10^{-7} эрг/см²/с.

Для FRB с измеренными красными смещениями родительских галактик были определены верхние пределы на изотропный эквивалент полного энергосыделения E_{iso} и пиковой светимости L_{iso} , представленные в Таб. 6.4. Верхние пределы рассчитывались для каждой из четырёх спектральных моделей, однако в Таб. 6.4 приведены значения E_{iso} для типичного спектра коротких гамма-всплесков и L_{iso} для типичного спектра длинных гамма-всплесков. В среднем верхние пределы, полученные с использованием спектральной модели MGF, оказываются в два раза менее строгими, тогда как для модели SGR/FRB 200428 они в ~ 2.5 раза более строгие. Для повторных FRB, представлены значения стекового анализа (значения, рассчитанные с использованием бина T_0 , указаны в скобках).

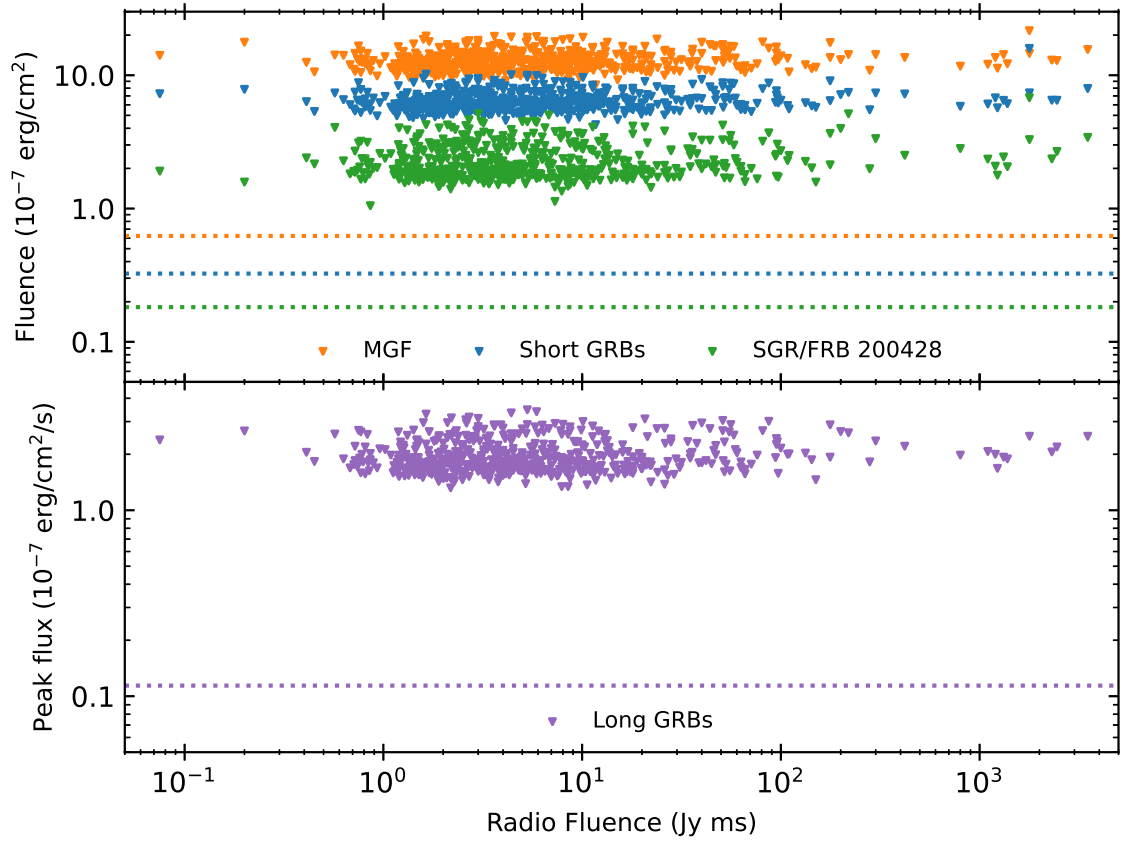


Рисунок 6.4: Верхние пределы на интегральный поток в диапазоне 20–1500 кэВ (верхняя панель) для коротких всплесков, обладающих спектрами, характерными для коротких гамма-всплесков, начальных импульсов гигантских вспышек магнитаров и рентгеновской вспышки, связанной с FRB 200428, а также на пиковый поток (нижняя панель) для длинных всплесков, определенные для 581 FRB из рассматриваемой выборки. Пунктирные линии иллюстрируют результаты стекового анализа для однократных FRB.

Таблица 6.4: Верхние пределы на изотропный эквивалент полного энергосвечения (типичный спектр коротких GRB) и пиковой светимости (типичный спектр длинных GRB) для FRB с измеренными красными смещениями родительских галактик. Для повторных FRB приведены верхние пределы, полученные в результате стекового анализа.

FRB	Повторный	z	E_{iso} (10^{49} эрг)	L_{iso} (10^{49} эрг/с)
180924B	-	0.3212 ^b	21.76	7.44
181112A	-	0.4755 ^c	38.44	15.05
190102C	-	0.2913 ^b	12.21	4.32
190523A	-	0.6600 ^b	66.64	36.54
190608B	-	0.1178 ^b	2.74	1.07
190611B	-	0.3778 ^b	28.17	9.80
190614D	-	0.60 ^d	65.34	30.12
190714A	-	0.2365 ^b	13.05	5.23
191001A	-	0.2340 ^b	8.40	3.29
191228A	-	0.2432 ^b	14.38	5.67
200430A	-	0.1608 ^b	3.92	1.54
200906A	-	0.3688 ^b	24.65	10.61
121102A	+	0.1927 ^b	1.58 (0.38)	0.64 (0.16)
180916B	+	0.0337 ^b	0.02 (0.001)	$67.19 (4.67) \times 10^{-4}$
181030A	+	0.0039 ^e	$6.51(1.11) \times 10^{-4}$	$1.96 (0.34) \times 10^{-4}$
190711A	+	0.5220 ^b	28.31 (6.43)	14.59 (2.53)
200120E ^a	+	(3.6 Мпк) ^f	$1.96 (0.38) \times 10^{-5}$	$1.18 (0.27) \times 10^{-5}$
201124A	+	0.0979 ^b	0.32 (0.23)	0.12 (0.08)

^a FRB на расстоянии 3.6 Мпк с формально отрицательным красным смещением.

^b [98] ^c [213] ^d [214] ^e [215] ^f [216]

На основе полученных верхних пределов на интегральный и пиковый поток, а также данных о радиопотоках из первого каталога CHIME/FRB, были рассчитаны нижние пределы на отношение потоков в радио- и рентгеновском диапазонах η_{FRB} . Указанные радиопотоки представляют собой нижние пределы ввиду предполагаемой при их оценке чувствительности телескопа в центре поля зрения [83]. Распределение значений η_{FRB} для повторных и од-

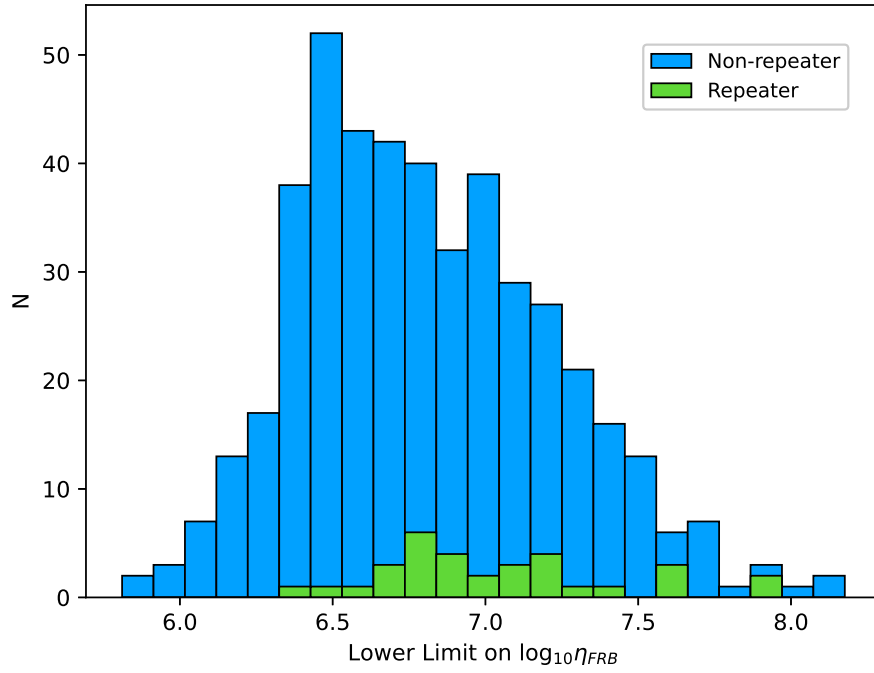


Рисунок 6.5: Распределение нижних пределов на отношение интегральных потоков в радио- и рентгеновском диапазонах для FRB, у которых измерены радиопотоки с помощью CHIME/FRB. Пределы выражены в единицах $\text{Ян мс эрг}^{-1} \text{ см}^2$.

нократных FRB из объединённой выборки TNS и CHIME/FRB представлено на Рис. 6.5.

Приведенные в данной главе результаты, полученные на основе одной из наиболее обширных выборок FRB, имеющихся на сегодняшний день, согласуются с выводами предшествующих исследований. В работе [202] был проведен поиск высокоэнергетических аналогов для 23 FRB в данных GBM, LAT и BAT и установлено $\eta_{FRB} \geq 10^5 - 10^7 \text{ Ян мс эрг}^{-1} \text{ см}^2$, что сопоставимо с значениями, вычисленными в настоящей главе. Поиск гамма-излучения длительностью 1–200 с, совпадающего по времени с FRB, был осуществлён в работе [196] в кумулятивных временных профилях GBM. Они получили строгий верхний предел $\eta_{FRB} > 10^8 \text{ Ян мс эрг}^{-1} \text{ см}^2$.

Обе перспективные категории моделей FRB («ближние» и «дальние») предсказывают сопутствующее излучение в высокоэнергетическом диапазоне и определяют соотношение между энергией такого излучения и энергией са-

мого FRB [110, 217, 218]. Чтобы сопоставить полученные результаты с теоретическими предсказаниями, были вычислены пределы на соотношение интегральных потоков в радио- и рентгеновском диапазонах, выраженные в безразмерных единицах. Используя значения радиопотоков и ширину частотной полосы из литературы (см. таблицу 6.5), для 12 однократных FRB с известными расстояниями получено $E_{\text{radio}}/E_{\text{iso}} \geq 10^{-11} - 10^{-9}$. Несмотря на различия во временных шкалах и энергетических диапазонах в анализах разных авторов, эти значения согласуются с соотношениями, вычисленными для различных выборок FRB с помощью разных инструментов ($10^{-10} - 10^{-7}$, [195]) и лишь приближаются к теоретически ожидаемым значениям (от 10^{-6} [106] до 10^{-5} [110, 218]). Тем не менее следует учитывать, что истинные соотношения интегральных потоков могут существенно отличаться от наблюдаемых из-за эффектов направленности излучения. Для более строгого ограничения моделей необходимы статистические пределы на такие соотношения для обширной выборки FRB.

Таблица 6.5: Радиопотоки для однократных FRB с измеренными красными смещениями.

FRB	Поток (Ян мс)	Инструмент	Центральная частота (МГц)	Ширина полосы (МГц)
180924B ^a	16 ± 1	ASKAP	1320	336
181112A ^b	26 ± 3	ASKAP	1295	336
190102C ^c	14 ± 1	ASKAP	1295	336
190523A ^d	≥ 280	DSA-10	1411	152.6
190608B ^c	26 ± 4	ASKAP	1295	336
190611B ^c	10 ± 2	ASKAP	1295	336
190614D ^e	0.62 ± 0.07	VLA	1400	1024
190714A ^f	8 ± 2	ASKAP	1272.5	336
191001A ^g	143 ± 15	ASKAP	920.5	336
191228A ^h	40^{+50}_{-10}	ASKAP	1272.5	336
200430A ⁱ	35 ± 4	ASKAP	864.5	336
200906A ^j	59^{+25}_{-10}	ASKAP	864.5	336

^a [219] ^b [213] ^c [220] ^d [221] ^e [214] ^f [222] ^g [223] ^h [224] ⁱ [225] ^j [98]

К сожалению, внегалактические расстояния и ожидаемая слабость сопутствующего излучения FRB делают их недоступными для обнаружения современными телескопами, работающими на частотах выше радиодиапазона. Наиболее близкие и яркие FRB являются перспективными кандидатами для многоволновых наблюдений, которые могут существенно ограничить количественные модели их излучения. На данный момент лишь два внегалактических FRB находятся в относительной близости: FRB 181030A из спиральной галактики с активным звездообразованием NGC 3252 на расстоянии 20 Мпк [215] и FRB 200120E из шарового скопления в M81 на расстоянии 3.6 Мпк [216].

Стековый анализ данных по девяти всплескам от FRB 181030A и шести от FRB 200120E позволил установить наиболее строгие верхние пределы: $E_{\text{iso}} \leq 6.5 \times 10^{45}$ эрг и $E_{\text{iso}} \leq 2.0 \times 10^{44}$ эрг для коротких всплесков от FRB 181030A и FRB 200120E соответственно. Эти пределы исключают яркие MGF в качестве возможных источников данных FRB, но допускают короткие всплески магнитаров с типичными энергиями ниже 10^{42} эрг.

Полученные верхние пределы для локализованных FRB исключают гамма-всплески с $E_{\text{iso}} \geq 7 \times 10^{50}$ эрг, составляющие $\sim 97\%$ наблюдаемой популяции по данным Конус-Винд [207, 226]), как возможные источники сопутствующего излучения. Происхождение FRB от вспышек магнитаров согласуется с полученными пределами как по интенсивности излучения, так и по соотношениям интегральных потоков в радио- к жесткому рентгеновскому диапазону. Для большинства рассмотренных событий не исключены внегалактические MGF с изотропной энергией, сравнимой с GRB 200415A ($E_{\text{iso}} \sim 1.3 \times 10^{46}$ эрг) или GRB 051103 ($E_{\text{iso}} \sim 5.3 \times 10^{46}$ эрг) [208]. MGF с соотношением интегральных потоков, близким к полученному для гигантской вспышки 2004 года от магнитара SGR 1806-20 ($\eta_{\text{GF}} < 10^7$ Ян мс эрг $^{-1}$ см 2 ; [227]), частично согласуются с $\eta_{\text{FRB}} \geq 10^6 - 10^8$ Ян мс эрг $^{-1}$ см 2 . Событие SGR/FRB 200428 с соотношением $\sim 7 \times 10^{11}$ Ян мс эрг $^{-1}$ см 2 ($\sim 10^{-5}$ в безразмерных единицах) [132, 169] значительно превышает полученные нижние пределы на такое соотношение.

Как обнаружение, так и отсутствие сопутствующего излучения FRB в многоволновых и многоканальных наблюдательных кампаниях имеет важ-

ное значение. Как и для других транзиентных явлений, таких как гамма-всплески, сбор наблюдательных данных в максимально широком энергетическом диапазоне критически важен для понимания этих загадочных явлений. Поиск высокоэнергетических аналогов FRB в эксперименте *Конус-Винд* продолжится, и с ростом числа известных FRB мы вскоре сможем ужесточить существующие пределы, что позволит надежнее ограничить теоретические модели.

6.5 Заключение

В данной главе представлены методология и результаты архивного поиска транзиентных событий вблизи опубликованных FRB с использованием многолетних данных эксперимента *Конус-Винд*.

В главе получены следующие результаты:

1. Не обнаружено значимых ассоциаций жесткого рентгеновского излучения (20–1500 кэВ) с FRB для 721 радиовсплеска, зарегистрированного в базе TNS.
2. Рассчитаны верхние пределы на интегральный поток (для коротких событий с длительностью менее 2.944 с) или пиковый поток (для длинных) в диапазоне 20–1500 кэВ. Рассмотрены четыре спектральные модели, характеризующие типичные спектры коротких и длинных гамма-всплесков, гигантских вспышек магнитаров и рентгеновского всплеска, ассоциированного с FRB 200428. В зависимости от спектральной модели пределы составляют $(0.1 - 2) \times 10^{-6}$ эрг/см².
3. Стековый анализ (анализ усредненных временных профилей) выполнен для 573 однократных FRB и для каждого из восьми повторных источников. Стековый анализ подтвердил отсутствие коллективного сигнала и позволил ужесточить верхние пределы.
4. Для 18 FRB с измеренными красными смещениями родительских галактик рассчитаны верхние пределы на изотропный эквивалент полного

энерговыведения и пиковой светимости. Наиболее строгие пределы удалось получить для ближайшего к нам FRB 200120E (3.6 Мпк): $E_{\text{iso}} \leq 2.0 \times 10^{44}$ эрг, $L_{\text{iso}} \leq 1.2 \times 10^{44}$ эрг/с.

5. Установлены нижние пределы на отношение $E_{\text{radio}}/E_{\text{iso}} \geq 10^{-11} - 10^{-9}$, что согласуется с предыдущими исследованиями, но только приближается к теоретическим предсказаниям ($10^{-6} - 10^{-5}$).

По материалам Главы 6 на защиту выносится следующее положение:

- Верхние пределы на высокоэнергетическое транзиентное излучение в данных Конус-Винд для 721 радиовсплеска от 581 FRB.

Результаты отражены в публикациях:

- A. Ridnaia et al. A targeted search for FRB counterparts with Konus-Wind // Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v.527, 3, 2024, p. 5580 - 5587;
- A. V. Ridnaia et al. Search for gamma-ray counterparts to FRBs in Konus-Wind data // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 16 (1.2), 2023, p. 474-479;

Заключение

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. Проведено исследование вспышечной активности магнитара SGR 1935+2154 на основе данных наблюдений эксперимента *Конус-Винд* за период с момента открытия источника в 2014 году по конец 2022 года. Для 70 зарегистрированных ярких всплесков определены индивидуальные характеристики, включая длительность, спектральные параметры, интегральные и пиковые потоки энергии. Получены статистические распределения и зависимости между параметрами. Сходство анализируемых событий с всплесками других магнитаров подчеркивает унифицированность механизма их излучения.
2. Проведен детальный анализ первой промежуточной вспышки магнитара SGR 1935+2154, являющейся самым ярким (по интегральному потоку) и продолжительным событием среди всех зарегистрированных от данного источника всплесков. Получена IPN-локализация, временные, спектральные и энергетические характеристики вспышки. Проведен поиск QPO и установлены верхние пределы на амплитуду пульсирующего излучения.
3. Исследовано уникальное событие — вспышка магнитара SGR 1935+2154, произошедшая 28 апреля 2020 года и сопровождавшаяся радиовсплеском FRB 200428, свойства которого чрезвычайно схожи с характеристиками быстрых радиовсплесков. Анализ кривых блеска в жестком рентгеновском и радио-диапазонах выявил двухпиковую структуру, при этом максимумы рентгеновских импульсов совпадают с радиопиками с точностью до 2 мс, что убедительно свидетельствует об общем физическом источнике излучения в обоих спектральных диапазонах. Данное событие представляет собой первое наблюдательное подтверждение возможной связи между FRB

и магнитарами, выдвинутой ранее в теоретических моделях. В результате проведенного анализа получены временные, спектральные и энергетические характеристики всплеска в рентгеновском диапазоне, являющиеся ценным материалом для дальнейшего исследования механизмов излучения.

4. Проведено сравнение характеристик всплеска, ассоциированного с FRB 200428, с параметрами других всплесков, зарегистрированных от магнитара SGR 1935+2154, а также от других магнитаров в эксперименте *Конус-Винд*. Подчеркнута пекулярность данного события, проявляющаяся в его спектральной жесткости. Установлено, что пиковая энергия $E_p \sim 85$ кэВ является рекордной для данного магнитара. Вероятность обнаружения такого значения в объединённой выборке всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных приборами *Конус-Винд* и *Fermi-GBM* оценивается на уровне $\sim 2 \times 10^{-10}$, что подчёркивает уникальность события. Среди ~ 320 ярких всплесков от шести магнитаров, зарегистрированных *Конус-Винд* за более 30 лет наблюдений, лишь пять демонстрируют спектральную жёсткость, сравнимую или превосходящую E_p вспышки от 28 апреля. Совместных архивных радионаблюдений для данных жестких вспышек не найдено.
5. Для всплеска от магнитара 1E 1547.0–5408, зарегистрированного 3 февраля 2009 года были найдены архивные радионаблюдения, проведенные радиотелескопом Parkes, в которых обнаружено два ярких одиночных радиоимпульса, один из которых случился через ~ 1 с после рентгеновского всплеска. Проведен анализ события по данным *Конус-Винд*, полученные временные, спектральные и энергетические параметры всплеска полностью соответствуют типичным характеристикам коротких всплесков магнитаров. Общая картина, складывающаяся на основе анализа совместных наблюдений радио- и рентгеновских вспышек от 1E 1547.0–5408 и SGR 1935+2154 указывает на широкий диапазон энергий радиовспышек магнитаров. В некоторых случаях эти вспышки могут напоминать FRB, а в других – быть ближе к типичной феноменологии одиночных импульсов радиопульсаров.

6. С использованием многолетних данных эксперимента *Конус-Винд* проведен поиск сопутствующего транзиентного излучения для 721 радиовсплеска от 573 одиночных и 8 повторных FRB. Значимых отождествлений не обнаружено и для каждого события получены верхние пределы на сопутствующее излучение в предположении четырех модельных спектров, описывающих типичные спектры коротких и длинных гамма-всплесков, гигантских вспышек магнитаров и рентгеновского всплеска, ассоциированного с FRB 200428. Наиболее жесткие ограничения получены для ближайшего FRB 200120E, однако и они не исключают короткие всплески магнитаров с типичными энергиями ниже 10^{42} эрг в качестве возможных источников сопутствующего излучения.

Благодарности

Автор выражает глубочайшую признательность своему научному руководителю, Дмитрию Дмитриевичу Фредериксу за профессиональное и внимательное руководство, неоценимую поддержку и ценные рекомендации, которые сопровождали каждый этап выполнения диссертационной работы и обеспечили ее успешное завершение. Особую благодарность автор выражает своему первому научному руководителю, Андрею Михайловичу Быкову, за вдохновляющую веру в силы автора и неизменную моральную поддержку и заботу на всем научном пути.

От всей души автор благодарит коллектив лаборатории Экспериментальной Астрофизики, в особенности Дмитрия Свинкина и Александру Лысенко, за теплую и вдохновляющую рабочую атмосферу, ценные советы и плодотворные научные дискуссии, существенно обогатившие исследование. Автор искренне благодарен своим учителям и преподавателям, в частности Ксении Петровне Левенфиш, за увлекательное знакомство с нейтронными звездами, которое заложило основу для научного интереса. Автор искренне признателен Петру Сергеевичу Штернину за консультации, которые значительно облегчили процесс подготовки работы к защите.

Отдельные слова благодарности автор адресует своей семье и друзьям за их безграничную любовь, понимание и поддержку, которые стали надежной опорой в самые непростые моменты.

Литература

1. Kouveliotou C., Dieters S., Strohmayer T. et al. [An X-ray pulsar with a superstrong magnetic field in the soft \$\gamma\$ -ray repeater SGR1806 - 20](#) // Nature. — 1998. — Vol. 393, no. 6682. — P. 235–237.
2. Mazets E. P., Golenetskii S. V. [Recent Results from the Gamma-Ray Burst Studies in the KONUS Experiment](#) // Astrophys. Space Sci. — 1981. — Vol. 75, no. 1. — P. 47–81.
3. Mazets E. P., Golentskii S. V., Ilinskii V. N. et al. [Observations of a flaring X-ray pulsar in Dorado](#) // Nature. — 1979. — Vol. 282, no. 5739. — P. 587–589.
4. Cline T. L., Desai U. D., Pizzichini G. et al. [Detection of a fast, intense and unusual gamma-ray transient.](#) // Astrophys. J. — 1980. — Vol. 237. — P. L1–L5.
5. Mazets E. P., Golenetskij S. V., Guryan Y. A. [Soft gamma-ray bursts from the source B1900+14](#) // Soviet Astronomy Letters. — 1979. — Vol. 5. — P. 343.
6. Laros J. G., Fenimore E. E., Klebesadel R. W. et al. [A New Type of Repetitive Behavior in a High-Energy Transient](#) // Astrophys. J. — 1987. — Vol. 320. — P. L111.
7. Gregory P. C., Fahlman G. G. [An extraordinary new celestial X-ray source](#) // Nature. — 1980. — Vol. 287, no. 5785. — P. 805–806.
8. Fahlman G. G., Gregory P. C. [An X-ray pulsar in SNR G109.1-1.0](#) // Nature. — 1981. — Vol. 293, no. 5829. — P. 202–204.
9. Seward F. D., Charles P. A., Smale A. P. [A 6 Second Periodic X-Ray Source in Carina](#) // Astrophys. J. — 1986. — Vol. 305. — P. 814.
10. Israel G. L., Mereghetti S., Stella L. [The Discovery of 8.7 Second Pulsations from the Ultrasoft X-Ray Source 4U 0142+61](#) // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 433. — P. L25.
11. Sugizaki Mutsumi, Nagase Fumiaki, Torii Ken'ichi et al. [Discovery of an 11-s X-Ray Pulsar in the Galactic-Plane Section of the Scorpius Constellation](#) // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 1997. — Vol. 49. — P. L25–L30.

12. Hellier C. [A ROSAT observation of the X-ray pulsars X0142+614 and X0146+612](#). // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1994. — Vol. 271. — P. L21–L24.
13. Mereghetti S., Stella L. [The Very Low Mass X-Ray Binary Pulsars: A New Class of Sources?](#) // Astrophys. J. — 1995. — Vol. 442. — P. L17.
14. van Paradijs J., Taam R. E., van den Heuvel E. P. J. [On the nature of the 'anomalous' 6-s X-ray pulsars](#) // Astron. Astrophys. — 1995. — Vol. 299. — P. L41.
15. Hulleman F., van Kerkwijk M. H., Kulkarni S. R. [An optical counterpart to the anomalous X-ray pulsar 4U0142+61](#) // Nature. — 2000. — Vol. 408, no. 6813. — P. 689–692.
16. Kern B., Martin C. [Optical pulsations from the anomalous X-ray pulsar 4U0142+61](#) // Nature. — 2002. — Vol. 417, no. 6888. — P. 527–529.
17. Duncan Robert C., Thompson Christopher. [Formation of Very Strongly Magnetized Neutron Stars: Implications for Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. — 1992. — Vol. 392. — P. L9.
18. Thompson Christopher, Duncan Robert C. [Neutron Star Dynamos and the Origins of Pulsar Magnetism](#) // Astrophys. J. — 1993. — Vol. 408. — P. 194.
19. Thompson Christopher, Duncan Robert C. [The Soft Gamma Repeaters as Very Strongly Magnetized Neutron Stars. II. Quiescent Neutrino, X-Ray, and Alfvén Wave Emission](#) // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 473. — P. 322.
20. Murakami T., Tanaka Y., Kulkarni S. R. et al. [X-ray identification of the soft \$\gamma\$ -ray repeater 1806 - 20](#) // Nature. — 1994. — Vol. 368, no. 6467. — P. 127–129.
21. Rothschild R. E., Kulkarni S. R., Lingenfelter R. E. [Discovery of an X-ray source coincident with the soft \$\gamma\$ -ray repeater 0525 - 66](#) // Nature. — 1994. — Vol. 368, no. 6470. — P. 432–434.
22. Vasisht G., Kulkarni S. R., Frail D. A., Greiner J. [Supernova Remnant Candidates for the Soft gamma -Ray Repeater 1900+14](#) // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 431. — P. L35.
23. Kouveliotou C., Strohmayer T., Hurley K. et al. [Discovery of a Magnetar Associated with the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14](#) // Astrophys. J. — 1999. — Vol. 510, no. 2. — P. L115–L118.

24. Gavriil F. P., Kaspi V. M., Woods P. M. [Magnetar-like X-ray bursts from an anomalous X-ray pulsar](#) // Nature. — 2002. — Vol. 419, no. 6903. — P. 142–144.
25. Olausen S. A., Kaspi V. M. [The McGill Magnetar Catalog](#) // Astrophys. J. Suppl. — 2014. — Vol. 212, no. 1. — P. 6.
26. Munro Michael P., Clark J. Simon, Crowther Paul A. et al. [A Neutron Star with a Massive Progenitor in Westerlund 1](#) // Astrophys. J. — 2006. — Vol. 636, no. 1. — P. L41–L44.
27. Gelfand Joseph D., Gaensler B. M. [The Compact X-Ray Source 1E 1547.0-5408 and the Radio Shell G327.24-0.13: A New Proposed Association between a Candidate Magnetar and a Candidate Supernova Remnant](#) // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 667, no. 2. — P. 1111–1118.
28. Nakano Toshio, Murakami Hiroaki, Makishima Kazuo et al. [Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586](#) // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2015. — Vol. 67, no. 1. — P. 9.
29. Rea N., Esposito P., Turolla R. et al. [A Low-Magnetic-Field Soft Gamma Repeater](#) // Science. — 2010. — Vol. 330, no. 6006. — P. 944.
30. Rea N., Israel G. L., Esposito P. et al. [A New Low Magnetic Field Magnetar: The 2011 Outburst of Swift J1822.3-1606](#) // Astrophys. J. — 2012. — Vol. 754, no. 1. — P. 27.
31. Rea Nanda, De Grandis Davide. [Magnetars](#) // arXiv e-prints. — 2025. — P. arXiv:2503.04442.
32. Esposito Paolo, Rea Nanda, Israel Gian Luca. [Magnetars: A Short Review and Some Sparse Considerations](#) // Timing Neutron Stars: Pulsations, Oscillations and Explosions / Ed. by Tomaso M. Belloni, Mariano Méndez, Chengmin Zhang. — Vol. 461 of Astrophysics and Space Science Library. — 2021. — P. 97–142.
33. Götz D., Rea N., Israel G. L. et al. [Long term hard X-ray variability of the anomalous X-ray pulsar 1RXS J170849.0-400910 discovered with INTEGRAL](#) // Astron. Astrophys. — 2007. — Vol. 475, no. 1. — P. 317–321.
34. Woods Peter M., Kouveliotou Chryssa, Finger Mark H. et al. [The Prelude to and Aftermath of the Giant Flare of 2004 December 27: Persistent and Pulsed X-Ray Properties of SGR 1806-20 from 1993 to 2005](#) // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 654, no. 1. — P. 470–486.

35. Younes George, Lander Samuel K., Baring Matthew G. et al. [Pulse Peak Migration during the Outburst Decay of the Magnetar SGR 1830-0645: Crustal Motion and Magnetospheric Untwisting](#) // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 924, no. 2. — P. L27.
36. Negro Michela, Younes George, Wadiasingh Zorawar et al. [The role of magnetar transient activity in time-domain and multimessenger astronomy](#) // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* — 2024. — Vol. 11. — P. 1388953.
37. Thompson Christopher, Duncan Robert C. [The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1995. — Vol. 275, no. 2. — P. 255–300.
38. Lyutikov Maxim. [Explosive reconnection in magnetars](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 346, no. 2. — P. 540–554.
39. Muş Sinem Şaşmaz, Sinem, Göğüş Ersin et al. [Burst Tails from SGR J1550-5418 Observed with the Rossi X-Ray Timing Explorer](#) // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 807, no. 1. — P. 42.
40. Hurley K., Cline T., Mazets E. et al. [A giant periodic flare from the soft \$\gamma\$ -ray repeater SGR1900+14](#) // *Nature.* — 1999. — Vol. 397, no. 6714. — P. 41–43.
41. Mazets E. P., Cline T. L., Aptekar' R. L. et al. [Activity of the soft gamma repeater SGR 1900 + 14 in 1998 from Konus-Wind observations: 2. The giant August 27 outburst](#) // *Astronomy Letters.* — 1999. — Vol. 25, no. 10. — P. 635–648.
42. Hurley K., Boggs S. E., Smith D. M. et al. [An exceptionally bright flare from SGR 1806-20 and the origins of short-duration \$\gamma\$ -ray bursts](#) // *Nature.* — 2005. — Vol. 434, no. 7037. — P. 1098–1103.
43. Frederiks D. D., Golenetskii S. V., Palshin V. D. et al. [Giant flare in SGR 1806-20 and its Compton reflection from the Moon](#) // *Astronomy Letters.* — 2007. — Vol. 33, no. 1. — P. 1–18.
44. Beniamini Paz, Wadiasingh Zorawar, Trigg Aaron et al. [Extragalactic Magnetar Giant Flares: Population Implications, Rates, and Prospects for Gamma-Rays, Gravitational Waves, and Neutrinos](#) // *Astrophys. J.* — 2025. — Vol. 980, no. 2. — P. 211.
45. Coti Zelati Francesco, Rea Nanda, Pons José A. et al. [Systematic study of magnetar outbursts](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 474, no. 1. — P. 961–1017.

46. Rodríguez Castillo Guillermo A., Israel Gian Luca, Esposito Paolo et al. [Pulse phase-coherent timing and spectroscopy of CXOU J164710.2-45521 outbursts](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 441, no. 2. — P. 1305–1316.
47. Mignani Roberto P. [Optical, ultraviolet, and infrared observations of isolated neutron stars](#) // Advances in Space Research. — 2011. — Vol. 47, no. 8. — P. 1281–1293.
48. Chrimes A. A., Levan A. J., Fruchter A. S. et al. [New candidates for magnetar counterparts from a deep search with the Hubble Space Telescope](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2022. — Vol. 512, no. 4. — P. 6093–6103.
49. Testa V., Rea N., Mignani R. P. et al. [Adaptive optics, near-infrared observations of magnetars](#) // Astron. Astrophys. — 2008. — Vol. 482, no. 2. — P. 607–615.
50. Chrimes A. A., Levan A. J., Fruchter A. S. et al. [Where are the magnetar binary companions? Candidates from a comparison with binary population synthesis predictions](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2022. — Vol. 513, no. 3. — P. 3550–3563.
51. Dhillon V. S., Marsh T. R., Hulleman F. et al. [High-speed, multicolour optical photometry of the anomalous X-ray pulsar 4U 0142+61 with ULTRACAM](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2005. — Vol. 363, no. 2. — P. 609–614.
52. Dhillon V. S., Marsh T. R., Littlefair S. P. et al. [Optical pulsations from the anomalous X-ray pulsar 1E1048.1-5937](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2009. — Vol. 394, no. 1. — P. L112–L116.
53. Dhillon V. S., Marsh T. R., Littlefair S. P. et al. [The first observation of optical pulsations from a soft gamma repeater: SGR 0501+4516](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011. — Vol. 416, no. 1. — P. L16–L20.
54. Rea N., Testa V., Israel G. L. et al. [Correlated Infrared and X-ray variability of the transient Anomalous X-ray Pulsar XTE J1810-197](#) // Astron. Astrophys. — 2004. — Vol. 425. — P. L5–L8.
55. Lyman J. D., Levan A. J., Wiersema K. et al. [The Fast Radio Burst-emitting Magnetar SGR 1935+2154-Proper Motion and Variability from Long-term Hubble Space Telescope Monitoring](#) // Astrophys. J. — 2022. — Vol. 926, no. 2. — P. 121.
56. Wang Zhongxiang, Chakrabarty Deepto, Kaplan David L. [A debris disk around an isolated young neutron star](#) // Nature. — 2006. — Vol. 440, no. 7085. — P. 772–775.

57. Hare Jeremy, Pavlov George G., Posselt Bettina et al. [Probing the Spectrum of the Magnetar 4U 0142+61 with JWST](#) // Astrophys. J. — 2024. — Vol. 972, no. 2. — P. 176.
58. Beloborodov Andrei M., Thompson Christopher. [Corona of Magnetars](#) // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 657, no. 2. — P. 967–993.
59. Zane Silvia, Nobili Luciano, Turolla Roberto. [The magnetar emission in the IR band: the role of magnetospheric currents](#) // High-Energy Emission from Pulsars and their Systems / Ed. by Diego F. Torres, Nanda Rea. — Vol. 21 of Astrophysics and Space Science Proceedings. — 2011. — P. 329.
60. Camilo F., Reynolds J., Johnston S. et al. [The Magnetar 1E 1547.0-5408: Radio Spectrum, Polarimetry, and Timing](#) // Astrophys. J. — 2008. — Vol. 679, no. 1. — P. 681–686.
61. Lazaridis K., Jessner A., Kramer M. et al. [Radio spectrum of the AXP J1810-197 and of its profile components](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Vol. 390, no. 2. — P. 839–846.
62. Levin Lina, Bailes Matthew, Bates Samuel et al. [A Radio-loud Magnetar in X-ray Quiescence](#) // Astrophys. J. — 2010. — Vol. 721, no. 1. — P. L33–L37.
63. Archibald R. F., Burgay M., Lyutikov M. et al. [Magnetar-like X-Ray Bursts Suppress Pulsar Radio Emission](#) // Astrophys. J. — 2017. — Vol. 849, no. 2. — P. L20.
64. Greiner Jochen, Mazzali Paolo A., Kann D. Alexander et al. [A very luminous magnetar-powered supernova associated with an ultra-long \$\gamma\$ -ray burst](#) // Nature. — 2015. — Vol. 523, no. 7559. — P. 189–192.
65. Bernardini Maria Grazia. [Gamma-ray bursts and magnetars: Observational signatures and predictions](#) // Journal of High Energy Astrophysics. — 2015. — Vol. 7. — P. 64–72.
66. Rowlinson A., O’Brien P. T., Metzger B. D. et al. [Signatures of magnetar central engines in short GRB light curves](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — Vol. 430, no. 2. — P. 1061–1087.
67. Gompertz B. P., O’Brien P. T., Wynn G. A. [Magnetar powered GRBs: explaining the extended emission and X-ray plateau of short GRB light curves](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 438, no. 1. — P. 240–250.
68. Dessart Luc, Hillier D. John, Waldman Roni et al. [Superluminous supernovae: \$^{56}\text{Ni}\$ power versus magnetar radiation](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 426, no. 1. — P. L76–L80.

69. Dall’Osso Simone, Stella Luigi. [Millisecond Magnetars](#) // Astrophysics and Space Science Library / Ed. by Sudip Bhattacharyya, Alessandro Pappitto, Dipankar Bhattacharya. — Vol. 465 of Astrophysics and Space Science Library. — 2022. — P. 245–280.
70. Popov Sergey B., Postnov K. A. [Hyperflares of SGRs as an engine for millisecond extragalactic radio bursts](#) // Evolution of Cosmic Objects through their Physical Activity / Ed. by H. A. Harutyunian, A. M. Mickaelian, Y. Terzian. — 2010. — P. 129–132.
71. Popov S. B., Postnov K. A., Pshirkov M. S. [Fast radio bursts](#) // Physics Uspekhi. — 2018. — Vol. 61, no. 10. — P. 965.
72. Zhang Bing. [The physics of fast radio bursts](#) // Reviews of Modern Physics. — 2023. — Vol. 95, no. 3. — P. 035005.
73. Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A. et al. [A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin](#) // Science. — 2007. — Vol. 318, no. 5851. — P. 777.
74. Thornton D., Stappers B., Bailes M. et al. [A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances](#) // Science. — 2013. — Vol. 341, no. 6141. — P. 53–56.
75. Burke-Spolaor S., Bailes Matthew, Ekers Ronald et al. [Radio Bursts with Extragalactic Spectral Characteristics Show Terrestrial Origins](#) // Astrophys. J. — 2011. — Vol. 727, no. 1. — P. 18.
76. Petroff E., Keane E. F., Barr E. D. et al. [Identifying the source of perytons at the Parkes radio telescope](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Vol. 451, no. 4. — P. 3933–3940.
77. Pleunis Ziggy, Good Deborah C., Kaspi Victoria M. et al. [Fast Radio Burst Morphology in the First CHIME/FRB Catalog](#) // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 923, no. 1. — P. 1.
78. Pleunis Z., Michilli D., Bassa C. G. et al. [LOFAR Detection of 110-188 MHz Emission and Frequency-dependent Activity from FRB 20180916B](#) // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 911, no. 1. — P. L3.
79. Gajjar V., Siemion A. P. V., Price D. C. et al. [Highest Frequency Detection of FRB 121102 at 4-8 GHz Using the Breakthrough Listen Digital Backend at the Green Bank Telescope](#) // Astrophys. J. — 2018. — Vol. 863, no. 1. — P. 2.

80. Pearlman Aaron B., Majid Walid A., Prince Thomas A. et al. [Multiwavelength Radio Observations of Two Repeating Fast Radio Burst Sources: FRB 121102 and FRB 180916.J0158+65](#) // Astrophys. J.— 2020.— Vol. 905, no. 2.— P. L27.
81. Majid Walid A., Pearlman Aaron B., Nimmo Kenzie et al. [A Dual-band Radio Observation of FRB 121102 with the Deep Space Network and the Detection of Multiple Bursts](#) // Astrophys. J.— 2020.— Vol. 897, no. 1.— P. L4.
82. Scholz P., Cook A., Cruces M. et al. [Simultaneous X-Ray and Radio Observations of the Repeating Fast Radio Burst FRB \$\sim\$ 180916.J0158+65](#) // Astrophys. J.— 2020.— Vol. 901, no. 2.— P. 165.
83. CHIME/FRB Collaboration, Amiri Mandana, Andersen Bridget C. et al. [The First CHIME/FRB Fast Radio Burst Catalog](#) // Astrophys. J. Suppl.— 2021.— Vol. 257, no. 2.— P. 59.
84. Chime/Frb Collaboration, Andersen Bridget C., Bandura Kevin et al. [CHIME/FRB Discovery of 25 Repeating Fast Radio Burst Sources](#) // Astrophys. J.— 2023.— Vol. 947, no. 2.— P. 83.
85. Zhang Yong-Kun, Wang Pei, Feng Yi et al. [FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A. II. Energy Distribution](#) // Research in Astronomy and Astrophysics.— 2022.— Vol. 22, no. 12.— P. 124002.
86. Zhang Junshuo, Wu Qin, Cao Shuo et al. [Detection of hyper-activity of FRB 20240114A with FAST](#) // The Astronomer's Telegram.— 2024.— Vol. 16505.— P. 1.
87. Chime/Frb Collaboration, Amiri M., Andersen B. C. et al. [Periodic activity from a fast radio burst source](#) // Nature.— 2020.— Vol. 582, no. 7812.— P. 351–355.
88. Pastor-Marazuela Inés, Connor Liam, van Leeuwen Joeri et al. [Chromatic periodic activity down to 120 megahertz in a fast radio burst](#) // Nature.— 2021.— Vol. 596, no. 7873.— P. 505–508.
89. Rajwade K. M., Mickaliger M. B., Stappers B. W. et al. [Possible periodic activity in the repeating FRB 121102](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc.— 2020.— Vol. 495, no. 4.— P. 3551–3558.
90. Cruces M., Spitler L. G., Scholz P. et al. [Repeating behaviour of FRB 121102: periodicity, waiting times, and energy distribution](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc.— 2021.— Vol. 500, no. 1.— P. 448–463.

91. Braga C. A., Cruces M., Cassanelli T. et al. [FRB 20121102A monitoring: Updated periodicity in the L band](#) // Astron. Astrophys. — 2025. — Vol. 693. — P. A40.
92. CHIME/FRB Collaboration, Andersen Bridget C., Bandura Kevin et al. [Sub-second periodicity in a fast radio burst](#) // Nature. — 2022. — Vol. 607, no. 7918. — P. 256–259.
93. Pastor-Marazuela Inés, van Leeuwen Joeri, Bilous Anna et al. [A fast radio burst with submillisecond quasi-periodic structure](#) // Astron. Astrophys. — 2023. — Vol. 678. — P. A149.
94. Bhardwaj M., Gaensler B. M., Kaspi V. M. et al. [A Nearby Repeating Fast Radio Burst in the Direction of M81](#) // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 910, no. 2. — P. L18.
95. Caleb Manisha, Nanayakkara Themiya, Stappers Benjamin et al. [A fast radio burst from the first 3 billion years of the Universe](#) // arXiv e-prints. — 2025. — P. arXiv:2508.01648.
96. Heintz Kasper E., Prochaska J. Xavier, Simha Sunil et al. [Host Galaxy Properties and Offset Distributions of Fast Radio Bursts: Implications for Their Progenitors](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 903, no. 2. — P. 152.
97. Gordon Alexa C., Fong Wen-fai, Kilpatrick Charles D. et al. [The Demographics, Stellar Populations, and Star Formation Histories of Fast Radio Burst Host Galaxies: Implications for the Progenitors](#) // Astrophys. J. — 2023. — Vol. 954, no. 1. — P. 80.
98. Bhandari Shivani, Heintz Kasper E., Aggarwal Kshitij et al. [Characterizing the Fast Radio Burst Host Galaxy Population and its Connection to Transients in the Local and Extragalactic Universe](#) // Astron. J. — 2022. — Vol. 163, no. 2. — P. 69.
99. Mannings Alexandra G., Fong Wen-fai, Simha Sunil et al. [A High-resolution View of Fast Radio Burst Host Environments](#) // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 917, no. 2. — P. 75.
100. Platts E., Weltman A., Walters A. et al. [A living theory catalogue for fast radio bursts](#) // Phys. Rep. — 2019. — Vol. 821. — P. 1–27.
101. Katz J. I. [How Soft Gamma Repeaters Might Make Fast Radio Bursts](#) // Astrophys. J. — 2016. — Vol. 826, no. 2. — P. 226.
102. Lyutikov Maxim, Popov Sergey. [Fast Radio Bursts from reconnection events in magnetar magnetospheres](#) // arXiv e-prints. — 2020. — P. arXiv:2005.05093.

103. Lyubarsky Yuri. [Fast Radio Bursts from Reconnection in a Magnetar Magnetosphere](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 897, no. 1. — P. 1.
104. Kumar Pawan, Lu Wenbin, Bhattacharya Mukul. [Fast radio burst source properties and curvature radiation model](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Vol. 468, no. 3. — P. 2726–2739.
105. Yang Yuan-Pei, Zhu Jin-Ping, Zhang Bing, Wu Xue-Feng. [Pair Separation in Parallel Electric Field in Magnetar Magnetosphere and Narrow Spectra of Fast Radio Bursts](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 901, no. 1. — P. L13.
106. Lyubarsky Yu. [A model for fast extragalactic radio bursts.](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 442. — P. L9–L13.
107. Waxman Eli. [On the Origin of Fast Radio Bursts \(FRBs\)](#) // Astrophys. J. — 2017. — Vol. 842, no. 1. — P. 34.
108. Beloborodov Andrei M. [A Flaring Magnetar in FRB 121102?](#) // Astrophys. J. — 2017. — Vol. 843, no. 2. — P. L26.
109. Beloborodov Andrei M. [Blast Waves from Magnetar Flares and Fast Radio Bursts](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 896, no. 2. — P. 142.
110. Metzger Brian D., Margalit Ben, Sironi Lorenzo. [Fast radio bursts as synchrotron maser emission from decelerating relativistic blast waves](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Vol. 485, no. 3. — P. 4091–4106.
111. Margalit Ben, Beniamini Paz, Sridhar Navin, Metzger Brian D. [Implications of a Fast Radio Burst from a Galactic Magnetar](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 899, no. 2. — P. L27.
112. Khangulyan D., Barkov Maxim V., Popov S. B. [Fast Radio Bursts by High-frequency Synchrotron Maser Emission Generated at the Reverse Shock of a Powerful Magnetar Flare](#) // Astrophys. J. — 2022. — Vol. 927, no. 1. — P. 2.
113. Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V. et al. [Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft](#) // Space Sci. Rev. — 1995. — Vol. 71, no. 1-4. — P. 265–272.
114. Harten Ronald, Clark Kenn. [The Design Features of the GGS Wind and Polar Spacecraft](#) // Space Sci. Rev. — 1995. — Vol. 71, no. 1-4. — P. 23–40.
115. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. [GEANT4—a simulation toolkit](#) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. — 2003. — Vol. 506, no. 3. — P. 250–303.

116. Terekhov M. M., Aptekar R. L., Frederiks D. D. et al. [The Konus-Wind and Konus-A instrument response functions and the spectral deconvolution procedure](#) // Gamma-Ray Bursts, 4th Hunstville Symposium / Ed. by Charles A. Meegan, Robert D. Preece, Thomas M. Koshut. — Vol. 428 of American Institute of Physics Conference Series. — 1998. — P. 894–898.
117. Xie Sheng-Lun, Cai Ce, Xiong Shao-Lin et al. [Revisit the periodicity of SGR J1935+2154 bursts with updated sample](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2022. — Vol. 517, no. 3. — P. 3854–3863.
118. Stamatikos M., Malesani D., Page K. L., Sakamoto T. [GRB 140705A: Swift detection of a short burst](#). // GRB Coordinates Network. — 2014. — Vol. 16520. — P. 1.
119. Lien A. Y., Barthelmy S. D., Baumgartner W. H. et al. [GRB 140705A: Swift-BAT refined analysis of a possible newly discovered SGR 1935+2154](#). // GRB Coordinates Network. — 2014. — Vol. 16522. — P. 1.
120. Israel G. L., Esposito P., Rea N. et al. [The discovery, monitoring and environment of SGR J1935+2154](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 457, no. 4. — P. 3448–3456.
121. Gaensler B. M. [GRB 140705A / SGR 1935+2154: Probable association with supernova remnant G57.2+0.8](#). // GRB Coordinates Network. — 2014. — Vol. 16533. — P. 1.
122. Kothes R., Sun X., Gaensler B., Reich W. [A Radio Continuum and Polarization Study of SNR G57.2+0.8 Associated with Magnetar SGR 1935+2154](#) // Astrophys. J. — 2018. — Vol. 852, no. 1. — P. 54.
123. Pavlović M. Z., Urošević D., Vukotić B. et al. [The Radio Surface-brightness-to-Diameter Relation for Galactic Supernova Remnants: Sample Selection and Robust Analysis with Various Fitting Offsets](#) // Astrophys. J. Suppl. — 2013. — Vol. 204, no. 1. — P. 4.
124. Surnis Mayuresh. P., Joshi Bhal Chandra, Maan Yogesh et al. [Radio Pulsation Search and Imaging Study of SGR J1935+2154](#) // Astrophys. J. — 2016. — Vol. 826, no. 2. — P. 184.
125. Ranasinghe S., Leahy D. A., Tian Wenwu. [New Distances to Four Supernova Remnants](#) // Open Physics Journal. — 2018. — Vol. 4. — P. 1–13.
126. Mereghetti S., Savchenko V., Ferrigno C. et al. [INTEGRAL Discovery of a Burst with Associated Radio Emission from the Magnetar SGR 1935+2154](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 898, no. 2. — P. L29.

127. Zhou Ping, Zhou Xin, Chen Yang et al. [Revisiting the Distance, Environment, and Supernova Properties of SNR G57.2+0.8 that Hosts SGR 1935+2154](#) // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 905, no. 2. — P. 99.
128. Zhong Shu-Qing, Dai Zi-Gao, Zhang Hai-Ming, Deng Can-Min. [On the Distance of SGR 1935+2154 Associated with FRB 200428 and Hosted in SNR G57.2+0.8](#) // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 898, no. 1. — P. L5.
129. Lin Lin, Göğüş Ersin, Roberts Oliver J. et al. [Fermi/GBM View of the 2019 and 2020 Burst Active Episodes of SGR J1935+2154](#) // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 902, no. 2. — P. L43.
130. Younes George, Güver Tolga, Kouveliotou Chryssa et al. [NICER View of the 2020 Burst Storm and Persistent Emission of SGR 1935+2154](#) // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 904, no. 2. — P. L21.
131. Kaneko Yuki, Göğüş Ersin, Baring Matthew G. et al. [Fermi/GBM Observations of the SGRJ1935+2154 Burst Forest](#) // *Astrophys. J.* — 2021. — Vol. 916, no. 1. — P. L7.
132. 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, no. 7832. — P. 54–58.
133. Bochenek C. D., Ravi V., Belov K. V. et al. [A fast radio burst associated with a Galactic magnetar](#) // *Nature*. — 2020. — Vol. 587, no. 7832. — P. 59–62.
134. Zhang C. F., Jiang J. C., Men Y. P. et al. [A highly polarised radio burst detected from SGR 1935+2154 by FAST](#) // *The Astronomer's Telegram*. — 2020. — Vol. 13699. — P. 1.
135. 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. 414–422.
136. Giri Utkarsh, Andersen Bridget C., Chawla Pragya et al. [Comprehensive Bayesian analysis of FRB-like bursts from SGR 1935+2154 observed by CHIME/FRB](#) // *arXiv e-prints*. — 2023. — P. arXiv:2310.16932.
137. Wang Pei, Li Jian, Ji Long et al. [X-Ray Hardening Preceding the Onset of SGR 1935+2154's Radio Pulsar Phase](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2024. — Vol. 275, no. 2. — P. 39.
138. Dong Fengqiu Adam, Chime/Frb Collaboration. [CHIME/FRB Detection of a Bright Radio Burst from SGR 1935+2154](#) // *The Astronomer's Telegram*. — 2022. — Vol. 15681. — P. 1.

139. Maan Yogesh, Leeuwen Joeri van, Straal Samayra, Pastor-Marazuela Ines. [GBT detection of bright 5 GHz radio bursts from SGR 1935+2154, coincident with X-ray and 600 MHz bursts](#) // The Astronomer's Telegram. — 2022. — Vol. 15697. — P. 1.
140. Frederiks D., Ridnaia A., Svinkin D. et al. [Konus-Wind detection of a short X-ray burst coincident with a bright radio burst from SGR 1935+2154](#) // The Astronomer's Telegram. — 2022. — Vol. 15686. — P. 1.
141. Wang C. W., Xiong S. L., Zhang Y. Q. et al. [GECAM and HEBS detection of a short X-ray burst from SGR J1935+2154 associated with radio burst](#) // The Astronomer's Telegram. — 2022. — Vol. 15682. — P. 1.
142. Huang Y. X., Xu H., Xu Y. H. et al. [An intermediately bright radio burst detected from SGR 1935+2154 in S-band by Yunnan 40m radio telescope](#) // The Astronomer's Telegram. — 2022. — Vol. 15707. — P. 1.
143. Li X. B., Zhang S. N., Xiong S. L. et al. [Insight-HXMT detection of an X-ray burst from SGR J1935+2154 coinciding with the radio burst on 2022-10-21](#) // The Astronomer's Telegram. — 2022. — Vol. 15708. — P. 1.
144. Li X. B., Zhang S. N., Xiong S. L. et al. [Addendum to ATel 15708](#) // The Astronomer's Telegram. — 2022. — Vol. 15714. — P. 1.
145. Svinkin D. S., Aptekar R. L., Golenetskii S. V. et al. [Classification of gamma-ray bursts observed with Konus-Wind](#) // Journal of Physics Conference Series. — Vol. 1400 of Journal of Physics Conference Series. — 2019. — P. 022010.
146. Koshut Thomas M., Paciesas William S., Kouveliotou Chryssa et al. [Systematic Effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 463. — P. 570.
147. Collazzi A. C., Kouveliotou C., van der Horst A. J. et al. [The Five Year Fermi/GBM Magnetar Burst Catalog](#) // Astrophys. J. Suppl. — 2015. — Vol. 218, no. 1. — P. 11.
148. Arnaud K. A. [XSPEC: The First Ten Years](#) // Astronomical Data Analysis Software and Systems V / Ed. by George H. Jacoby, Jeannette Barnes. — Vol. 101 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 1996. — P. 17.
149. Feroci M., Caliendo G. A., Massaro E. et al. [Broadband X-Ray Spectra of Short Bursts from SGR 1900+14](#) // Astrophys. J. — 2004. — Vol. 612, no. 1. — P. 408–413.

150. Olive J. F., Hurley K., Sakamoto Takanori et al. [Time-resolved X-Ray Spectral Modeling of an Intermediate Burst from SGR 1900+14 Observed by HETE-2 FREGATE and WXM](#) // Astrophys. J. — 2004. — Vol. 616, no. 2. — P. 1148–1158.
151. Lin Lin, Kouveliotou Chryssa, Baring Matthew G. et al. [Fermi/Gamma-Ray Burst Monitor Observations of SGR J0501+4516 Bursts](#) // Astrophys. J. — 2011. — Vol. 739, no. 2. — P. 87.
152. Lin Lin, Göğüş Ersin, Baring Matthew G. et al. [Broadband Spectral Investigations of SGR J1550-5418 Bursts](#) // Astrophys. J. — 2012. — Vol. 756, no. 1. — P. 54.
153. van der Horst A. J., Kouveliotou C., Gorgone N. M. et al. [SGR J1550-5418 Bursts Detected with the Fermi Gamma-Ray Burst Monitor during its Most Prolific Activity](#) // Astrophys. J. — 2012. — Vol. 749, no. 2. — P. 122.
154. Pal'shin V. D., Hurley K., Svinkin D. S. et al. [Interplanetary Network Localizations of Konus Short Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. Suppl. — 2013. — Vol. 207, no. 2. — P. 38.
155. Cummmings J. R., Barthelmy S. D., Chester M. M., Page K. L. [Newly discovered SGR 1935+2154: Swift observations](#) // The Astronomer's Telegram. — 2014. — Vol. 6294. — P. 1.
156. Mereghetti S., Götz D., Weidenspointner G. et al. [Strong Bursts from the Anomalous X-Ray Pulsar 1E 1547.0-5408 Observed with the INTEGRAL/SPI Anti-Coincidence Shield](#) // Astrophys. J. — 2009. — Vol. 696, no. 1. — P. L74–L78.
157. Göğüş Ersin, Woods Peter M., Kouveliotou Chryssa et al. [Extended Tails from SGR 1806-20 Bursts](#) // Astrophys. J. — 2011. — Vol. 740, no. 2. — P. 55.
158. Israel G. L., Stella L. [A New Technique for the Detection of Periodic Signals in “Colored” Power Spectra](#) // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 468. — P. 369.
159. Israel G. L., Belloni T., Stella L. et al. [The Discovery of Rapid X-Ray Oscillations in the Tail of the SGR 1806-20 Hyperflare](#) // Astrophys. J. — 2005. — Vol. 628, no. 1. — P. L53–L56.
160. Strohmayer Tod E., Watts Anna L. [Discovery of Fast X-Ray Oscillations during the 1998 Giant Flare from SGR 1900+14](#) // Astrophys. J. — 2005. — Vol. 632, no. 2. — P. L111–L114.

161. Strohmayer Tod E., Watts Anna L. [The 2004 Hyperflare from SGR 1806-20: Further Evidence for Global Torsional Vibrations](#) // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 653, no. 1. — P. 593–601.
162. Miller M. Coleman, Chirenti Cecilia, Strohmayer Tod E. [On the Persistence of QPOs during the SGR 1806-20 Giant Flare](#) // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 871, no. 1. — P. 95.
163. Protassov R., van Dyk D. A., Connors A. et al. [Statistics, Handle with Care: Detecting Multiple Model Components with the Likelihood Ratio Test](#) // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 571. — P. 545–559.
164. Israel G. L., Romano P., Mangano V. et al. [A Swift Gaze into the 2006 March 29 Burst Forest of SGR 1900+14](#) // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 685, no. 2. — P. 1114–1128.
165. Younes G., Kouveliotou C., van der Horst A. J. et al. [Time Resolved Spectroscopy of SGR J1550-5418 Bursts Detected with Fermi/Gamma-Ray Burst Monitor](#) // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 785, no. 1. — P. 52.
166. Paczynski Bohdan. [GB 790305 as a Very Strongly Magnetized Neutron Star](#) // *Acta Astron.* — 1992. — Vol. 42. — P. 145–153.
167. Ridnaia A., Golenetskii S., Aptekar R. et al. [Konus-Wind observation of a very intense bursting activity of SGR 1935+2154](#) // *GRB Coordinates Network.* — 2020. — Vol. 27667. — P. 1.
168. Tavani M., Casentini C., Ursi A. et al. [An X-ray burst from a magnetar enlightening the mechanism of fast radio bursts](#) // *Nature Astronomy.* — 2021. — Vol. 5. — P. 401–407.
169. Ridnaia A., Svinkin D., Frederiks D. et al. [A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst](#) // *Nature Astronomy.* — 2021. — Vol. 5. — P. 372–377.
170. Li C. K., Lin L., Xiong S. L. et al. [HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428](#) // *Nature Astronomy.* — 2021. — Vol. 5. — P. 378–384.
171. Scargle Jeffrey D., Norris Jay P., Jackson Brad, Chiang James. [Studies in Astronomical Time Series Analysis. VI. Bayesian Block Representations](#) // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 764, no. 2. — P. 167.
172. Band D., Matteson J., Ford L. et al. [BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Spectra. I. Spectral Diversity](#) // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 413. — P. 281.

173. Nimmo K., Hessels J. W. T., Snelders M. P. et al. [A burst storm from the repeating FRB 20200120E in an M81 globular cluster](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2023. — Vol. 520, no. 2. — P. 2281–2305.
174. Lin Lin, Göğüş Ersin, Roberts Oliver J. et al. [Burst Properties of the Most Recurring Transient Magnetar SGR J1935+2154](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 893, no. 2. — P. 156.
175. Lin L., Zhang C. F., Wang P. et al. [No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar](#) // Nature. — 2020. — Vol. 587, no. 7832. — P. 63–65.
176. Burgay M., Israel G. L., Possenti A. et al. [Back to radio: Parkes detection of radio pulses from the transient AXP 1E1547.0-5408](#) // The Astronomer's Telegram. — 2009. — Vol. 1913. — P. 1.
177. Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V. et al. [Konus Catalog of Soft Gamma Repeater Activity: 1978 to 2000](#) // Astrophys. J. Suppl. — 2001. — Vol. 137, no. 2. — P. 227–277.
178. Mazets E. P., Aptekar R. L., Butterworth P. S. et al. [Unusual Burst Emission from the New Soft Gamma Repeater SGR 1627-41](#) // Astrophys. J. — 1999. — Vol. 519, no. 2. — P. L151–L153.
179. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. [Konus-wind detection of very bright SGR-like burst on January 25, 2009.](#) // GRB Coordinates Network. — 2009. — Vol. 8851. — P. 1.
180. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. [Konus-wind observation of AXP/SGR 1E1547.0-5408 bursting activity.](#) // GRB Coordinates Network. — 2009. — Vol. 8858. — P. 1.
181. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. [Konus-wind observation of bright burst from AXP/SGR 1E1547.0-5408 on January 29.](#) // GRB Coordinates Network. — 2009. — Vol. 8863. — P. 1.
182. Woods Peter M., Kouveliotou Chryssa, van Paradijs Jan et al. [Hard Burst Emission from the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14](#) // Astrophys. J. — 1999. — Vol. 527, no. 1. — P. L47–L50.
183. Baldwin C., Savchenko V., Beckmann V. et al. [INTEGRAL observes continued activity from AXP 1E1547.0-5408](#) // The Astronomer's Telegram. — 2009. — Vol. 1908. — P. 1.
184. Rea N., Esposito P., Krimm H. A. et al. [The new SGR 1550-5418 is the old AXP 1E1547.0-5408](#) // The Astronomer's Telegram. — 2008. — Vol. 1756. — P. 1.

185. Lamb R. C., Markert T. H. [X-ray emission from supernova remnants near gamma-ray sources.](#) // *Astrophys. J.* — 1981. — Vol. 244. — P. 94–101.
186. Camilo F., Ransom S. M., Halpern J. P., Reynolds J. [1E 1547.0-5408: A Radio-emitting Magnetar with a Rotation Period of 2 Seconds](#) // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 666, no. 2. — P. L93–L96.
187. Halpern J. P., Gotthelf E. V., Reynolds J. et al. [Outburst of the 2 s Anomalous X-Ray Pulsar 1E 1547.0-5408](#) // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 676, no. 2. — P. 1178–1183.
188. Dib Rim, Kaspi Victoria M., Scholz Paul, Gavriil Fotis P. [RXTE Observations of Anomalous X-Ray Pulsar 1E 1547.0-5408 during and after its 2008 and 2009 Outbursts](#) // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 748, no. 1. — P. 3.
189. Israel G. L., Esposito P., Rea N. et al. [The 2008 October Swift detection of X-ray bursts/outburst from the transient SGR-like AXP 1E1547.0-5408](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 408, no. 3. — P. 1387–1395.
190. von Kienlin Andreas, Gruber David, Kouveliotou Chryssa et al. [Detection of Spectral Evolution in the Bursts Emitted during the 2008-2009 Active Episode of SGR J1550-5418](#) // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 755, no. 2. — P. 150.
191. Savchenko V., Neronov A., Beckmann V. et al. [SGR-like flaring activity of the anomalous X-ray pulsar 1E 1547.0-5408](#) // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 510. — P. A77.
192. Tiengo A., Vianello G., Esposito P. et al. [The Dust-scattering X-ray Rings of the Anomalous X-ray Pulsar 1E 1547.0-5408](#) // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 710, no. 1. — P. 227–235.
193. Pintore Fabio, Mereghetti Sandro, Tiengo Andrea et al. [The effect of X-ray dust scattering on a bright burst from the magnetar 1E 1547.0-5408](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 467, no. 3. — P. 3467–3474.
194. Camilo Fernando, Ransom Scott M., Halpern Jules P. et al. [Transient pulsed radio emission from a magnetar](#) // *Nature.* — 2006. — Vol. 442, no. 7105. — P. 892–895.
195. Nicastro Luciano, Guidorzi Cristiano, Palazzi Eliana et al. [Multiwavelength Observations of Fast Radio Bursts](#) // *Universe.* — 2021. — Vol. 7, no. 3. — P. 76.
196. Martone R., Guidorzi C., Margutti R. et al. [A cumulative search for hard X/ \$\gamma\$ -ray emission associated with fast radio bursts in Fermi/GBM data](#) // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 631. — P. A62.

197. Principe G., Di Venere L., Negro M. et al. [Hunting for gamma-ray emission from fast radio bursts](#) // *Astron. Astrophys.* — 2023. — Vol. 675. — P. A99.
198. Mereghetti S., Topinka M., Rigoselli M., Götz D. [INTEGRAL Limits on Past High-energy Activity from FRB 20200120E in M81](#) // *Astrophys. J.* — 2021. — Vol. 921, no. 1. — P. L3.
199. Anumalapudi Akash, Bhalerao Varun, Tendulkar Shriharsh P., Balasubramanian A. [Prompt X-Ray Emission from Fast Radio Bursts—Upper Limits with AstroSat](#) // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 888, no. 1. — P. 40.
200. Guidorzi C., Marongiu M., Martone R. et al. [A search for prompt \$\gamma\$ -ray counterparts to fast radio bursts in the Insight-HXMT data](#) // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 637. — P. A69.
201. Verrecchia F., Casentini C., Tavani M. et al. [AGILE Observations of Fast Radio Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 2021. — Vol. 915, no. 2. — P. 102.
202. Cunningham Virginia, Cenko S. Bradley, Burns Eric et al. [A Search for High-energy Counterparts to Fast Radio Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 879, no. 1. — P. 40.
203. Trudu M., Pilia M., Nicastro L. et al. [Simultaneous and panchromatic observations of the fast radio burst FRB 20180916B](#) // *Astron. Astrophys.* — 2023. — Vol. 676. — P. A17.
204. Gal-Yam A. [The TNS alert system](#) // American Astronomical Society Meeting Abstracts #237. — Vol. 237 of American Astronomical Society Meeting Abstracts. — 2021. — P. 423.05.
205. Lu Wenbin, Kumar Pawan, Zhang Bing. [A unified picture of Galactic and cosmological fast radio bursts](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 498, no. 1. — P. 1397–1405.
206. Svinkin D. S., Frederiks D. D., Aptekar R. L. et al. [The Second Konus-Wind Catalog of Short Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2016. — Vol. 224, no. 1. — P. 10.
207. Tsvetkova A., Frederiks D., Golenetskii S. et al. [The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode](#) // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 850, no. 2. — P. 161.
208. Svinkin D., Frederiks D., Hurley K. et al. [A bright \$\gamma\$ -ray flare interpreted as a giant magnetar flare in NGC 253](#) // *Nature*. — 2021. — Vol. 589, no. 7841. — P. 211–213.

209. Kashyap Vinay L., van Dyk David A., Connors Alanna et al. [On Computing Upper Limits to Source Intensities](#) // Astrophys. J. — 2010. — Vol. 719, no. 1. — P. 900–914.
210. Chen Ge, Ravi Vikram, Lu Wenbin. [The Multiwavelength Counterparts of Fast Radio Bursts](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 897, no. 2. — P. 146.
211. Svinkin D. S., Hurley K., Ridnaia A. V. et al. [The Second Catalog of Interplanetary Network Localizations of Konus Short-duration Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. Suppl. — 2022. — Vol. 259, no. 2. — P. 34.
212. Kozlova A. V., Svinkin D. S., Lysenko A. L. et al. [A search for transient events in Konus-Wind data](#) // Journal of Physics Conference Series. — Vol. 1400 of Journal of Physics Conference Series. — 2019. — P. 022014.
213. Prochaska J. Xavier, Macquart Jean-Pierre, McQuinn Matthew et al. [The low density and magnetization of a massive galaxy halo exposed by a fast radio burst](#) // Science. — 2019. — Vol. 366, no. 6462. — P. 231–234.
214. Law Casey J., Butler Bryan J., Prochaska J. Xavier et al. [A Distant Fast Radio Burst Associated with Its Host Galaxy by the Very Large Array](#) // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 899, no. 2. — P. 161.
215. Bhardwaj M., Kirichenko A. Yu., Michilli D. et al. [A Local Universe Host for the Repeating Fast Radio Burst FRB 20181030A](#) // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 919, no. 2. — P. L24.
216. Kirsten F., Marcote B., Nimmo K. et al. [A repeating fast radio burst source in a globular cluster](#) // Nature. — 2022. — Vol. 602, no. 7898. — P. 585–589.
217. Cooper A. J., Wijers R. A. M. J. [Coherent curvature radiation: maximum luminosity and high-energy emission](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — Vol. 508, no. 1. — P. L32–L36.
218. Yang Yuan-Pei, Zhang Bing. [Fast Radio Bursts and Their High-energy Counterparts from Magnetar Magnetospheres](#) // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 919, no. 2. — P. 89.
219. Bannister K. W., Deller A. T., Phillips C. et al. [A single fast radio burst localized to a massive galaxy at cosmological distance](#) // Science. — 2019. — Vol. 365, no. 6453. — P. 565–570.
220. Macquart J. P., Prochaska J. X., McQuinn M. et al. [A census of baryons in the Universe from localized fast radio bursts](#) // Nature. — 2020. — Vol. 581, no. 7809. — P. 391–395.

221. Ravi V., Catha M., D’Addario L. et al. [A fast radio burst localized to a massive galaxy](#) // Nature. — 2019. — Vol. 572, no. 7769. — P. 352–354.
222. Bhandari S., Kumar P., Shannon R. M., Macquart J. P. [ASKAP detection of FRB 190714](#) // The Astronomer’s Telegram. — 2019. — Vol. 12940. — P. 1.
223. Shannon R. M., Kumar P., Bhandari S., Macquart J. P. [ASKAP detection of FRB 191001](#) // The Astronomer’s Telegram. — 2019. — Vol. 13166. — P. 1.
224. Shannon R. M., Day C., Kumar P., Askap-Craft Collaboration. [ASKAP detection of FRB 191228](#) // The Astronomer’s Telegram. — 2019. — Vol. 13376. — P. 1.
225. Kumar P., Day C. K., Shannon R. M. et al. [ASKAP detection of FRB 200430](#) // The Astronomer’s Telegram. — 2020. — Vol. 13694. — P. 1.
226. Tsvetkova Anastasia, Frederiks Dmitry, Svinkin Dmitry et al. [The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. II. Waiting-Mode Bursts Simultaneously Detected by Swift/BAT](#) // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 908, no. 1. — P. 83.
227. Tendulkar Shriharsh P., Kaspi Victoria M., Patel Chitrang. [Radio Non-detection of the SGR 1806-20 Giant Flare and Implications for Fast Radio Bursts](#) // Astrophys. J. — 2016. — Vol. 827, no. 1. — P. 59.