

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»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: Фредерикс Дмитрий Дмитриевич,
кандидат физико-математических наук,
зав. лаб. экспериментальной
астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: Каминкер Александр Давидович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Сазонов Сергей Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
зав. лаб. экспериментальной астрофизики
отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН

Ведущая организация: Государственный Астрономический Институт
имени П. К. Штернберга Московского
государственного университета
имени М. В. Ломоносова

Защита состоится 17 декабря 2025 года в 15 часов на заседании диссертационного совета 34.01.04.25 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на веб-сайте ФТИ www.ioffe.ru.

Автореферат разослан « » октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

П. С. Штернин

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Магнитары представляют собой класс нейтронных звезд с экстремально сильными магнитными полями (порядка $10^{14} - 10^{15}$ Гс) [1]. Некоторые из них (мягкие гамма-репитеры, SGR), проявляют эпизодическую вспышечную активность в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазоне [2]. 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. Однако особую актуальность тема приобретает в контексте их возможной связи с быстрыми радиовсплесками (FRB) – миллисекундными мощными импульсами радиоизлучения, происхождение которых остается одной из ключевых нерешенных проблем современной астрофизики [3, 4].

Центральным объектом исследования является 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 [5, 6, 7, 8, 9, 10]. 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 радиовсплес-

ками 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

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 существует архивное радионаблюдение телескопа Parkes.
5. Верхние пределы на высокоэнергетическое транзиентное излучение в данных *Конус-Винд* для 721 радиовсплеска от 581 источника FRB.

Апробация работы

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

Структура и объём диссертации

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

Содержание работы

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.

Глава 1 посвящена описанию космического эксперимента *Конус-Винд*, обеспечившего наблюдательные данные для исследования. Эксперимент направлен на изучение транзитных астрофизических явлений в энергетическом диапазоне от ~ 20 кэВ до 18 МэВ. Сцинтилляционный гамма-спектрометр *Конус*, разработанный в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, установлен на космическом аппарате *GGS-Wind*, расположенном вблизи точки Лагранжа L_1 системы Солнце-Земля. Такое расположение обеспечивает наблюдения в условиях исключительно стабильного фона, устраняя затенение Землей и влияние ее радиационных поясов. Прибор оснащён двумя независимыми детекторами NaI(Tl) с эффективной площадью $80 - 160 \text{ см}^2$ в зависимости от энергии и угла падения излучения. Детекторы, ориентированные на полюса эклиптики и расположенные на противоположных сторонах космического аппарата, обеспечивают мониторинг всей небесной сферы. Детекторы функционируют в двух режимах: фоновом и триггерном. В фоновом режиме осуществляется непрерывная запись скоростей счета жестких рентгеновских и гамма-квантов в трёх широких энергетических каналах с фиксированным временным разрешением 2.944 с. Переход в триггерный режим происходит при статистически значимом превышении скорости счёта над фоном (на уровне 9σ) на интервалах 1 с или 140 мс в диапазоне энергий $\sim 80 - 320$ кэВ. В триггерном режиме регистрируются скорости счета в тех же энергетических каналах с временным разрешением от 2 мс до 256 мс в интервале от -0.512 с до ~ 230 с относительно момента срабатывания триггера. Спектральные данные записываются с момента срабатывания триггера с временем накопления спектров от 64 мс (для первых четырех спектров) до 8.192 с.

Глава 2 посвящена изучению вспышечной активности магнитара SGR 1935+2154 на основе данных, полученных с помощью эксперимента *Конус-Винд* в период активности источника начиная с момента его открытия в 2014 г. по конец 2022 г [A1, A2, A3, A4].

В разделе 2.1 представлен обзор характеристик SGR 1935+2154, включая его ключевые параметры: период вращения $P \sim 3.24$ с, темп замедления $\dot{P} \approx 1.43 \times 10^{-11} \text{ с с}^{-1}$, дипольное магнитное поле напряженностью около 2.2×10^{14} Гс и характерный возраст порядка 3600 лет. Описана история обнаружения объекта и его предполагаемая ассоциация с остатком сверхновой G57.2+0.8. Рассмотрена активность магнитара в жестком рентгеновском и радио-диапазонах, особое внимание уделено уникальному событию 28 апреля 2020 года, когда были одновременно зарегистрированы рентгеновская вспышка и радиовсплеск FRB 200428.

В разделе 2.2 описан сформированный набор из 70 вспышек, использованный для анализа.

В разделе 2.3 изложена методика временного анализа кривых блеска событий, и приведены результаты ее применения к исследуемому набору. Для каждого всплеска определены полная длительность события T_{100} , а также времена накопления 50% (T_{50}) и 90% (T_{90}) отсчётов. Короткие всплески характеризуются средним значением $T_{100} \sim 0.3$ с и диапазоном длительностей от 0.05 с до 0.83 с, тогда как промежуточные вспышки имеют среднюю длительность $T_{100} \sim 1.4$ с с разбросом от 1.2 с до 1.7 с. Распределение временных

параметров всплесков от SGR 1935+2154 демонстрирует сходство с наблюдаемыми у других магнитаров. Эволюция временных параметров (на примере T_{90}) за период наблюдений не выявлена, однако в 2021–2022 годах чаще наблюдались промежуточные вспышки и сложная морфология кривых блеска.

Раздел 2.4 посвящен методике и результатам спектрального анализа. Для каждого всплеска выбирались спектры с суммарным временем накопления, максимально близким к полной длительности события. Анализ проводился с использованием пакета XSPEC и двух основных моделей, наилучшим образом описывающих широкополосные спектры магнитаров [11, 12, 13, 14, 15]: 2BB (сумма двух компонент излучения со спектром абсолютно черного тела, `bbbodyrad+bbbodyrad` в XSPEC) и CPL (степенной закон с экспоненциальным обрезанием в области высоких энергий, $f_{CPL}(E) \propto E^\alpha \exp(-\frac{(2+\alpha)E}{E_p})$). Для модели 2BB параметры включали температуры kT_1 , kT_2 и радиусы R_1 , R_2 излучающих областей; для модели CPL — фотонный индекс α и пиковую энергию E_p в спектре νF_ν . Для нормировки спектральных моделей использовался поток в диапазоне (20–500) кэВ. Модель CPL, как более простая и хорошо описывающая спектры большинства всплесков, использовалась для вычисления интегрального и пикового потоков.

Результаты спектрального анализа показали, что 44 спектра хорошо описываются обеими моделями, что подчеркивает их взаимозаменяемость в энергетическом диапазоне $\sim 20 - 250$ кэВ, где формы спектральных функций демонстрируют сходство; для 20 спектров ограниченные оценки параметров и их ошибок удалось получить только для модели CPL (модель 2BB приводила к большим неопределенностям параметров), а для 3 — только с использованием 2BB. В двух случаях, где ни одна из основных моделей не позволила наложить ограничения на их параметры, применена простая двухпараметрическая модель теплового тормозного излучения оптически тонкой плазмы (ОТТВ, эквивалентна модели CPL с $\alpha = -1$), параметры которой использованы в дальнейшем анализе энергетики событий.

Для модели 2BB средние по выборке значения температур составили ~ 6.0 кэВ и ~ 13.0 кэВ. 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 2BB и предполагаемого расстояния до источника 10 кпк, 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 км), тогда как для высокотемпературной — от 0.1 до 11 км (среднее значение ~ 3.0 км). Эти значения указывают на компактность горячих зон, сопоставимых с размерами нейтронной звезды, и более протяженный характер менее горячих областей.

Для модели CPL 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. Фотонный индекс распределен вокруг 0.02 в диапазоне от -1.3 до 1.0 (см. Рис 1). Распределение интегрального энергетического потока S охватывает диапазон $\sim (4 - 30) \times 10^{-6}$ эрг см^{-2} со средним (медианным) значением $3.7(1.9) \times 10^{-6}$ эрг см^{-2} . Пиковый поток F_{peak} варьируется в диапазоне $\sim (0.8 - 4) \times 10^{-5}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ со средним (медианным) значением $1.7(1.6) \times 10^{-5}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

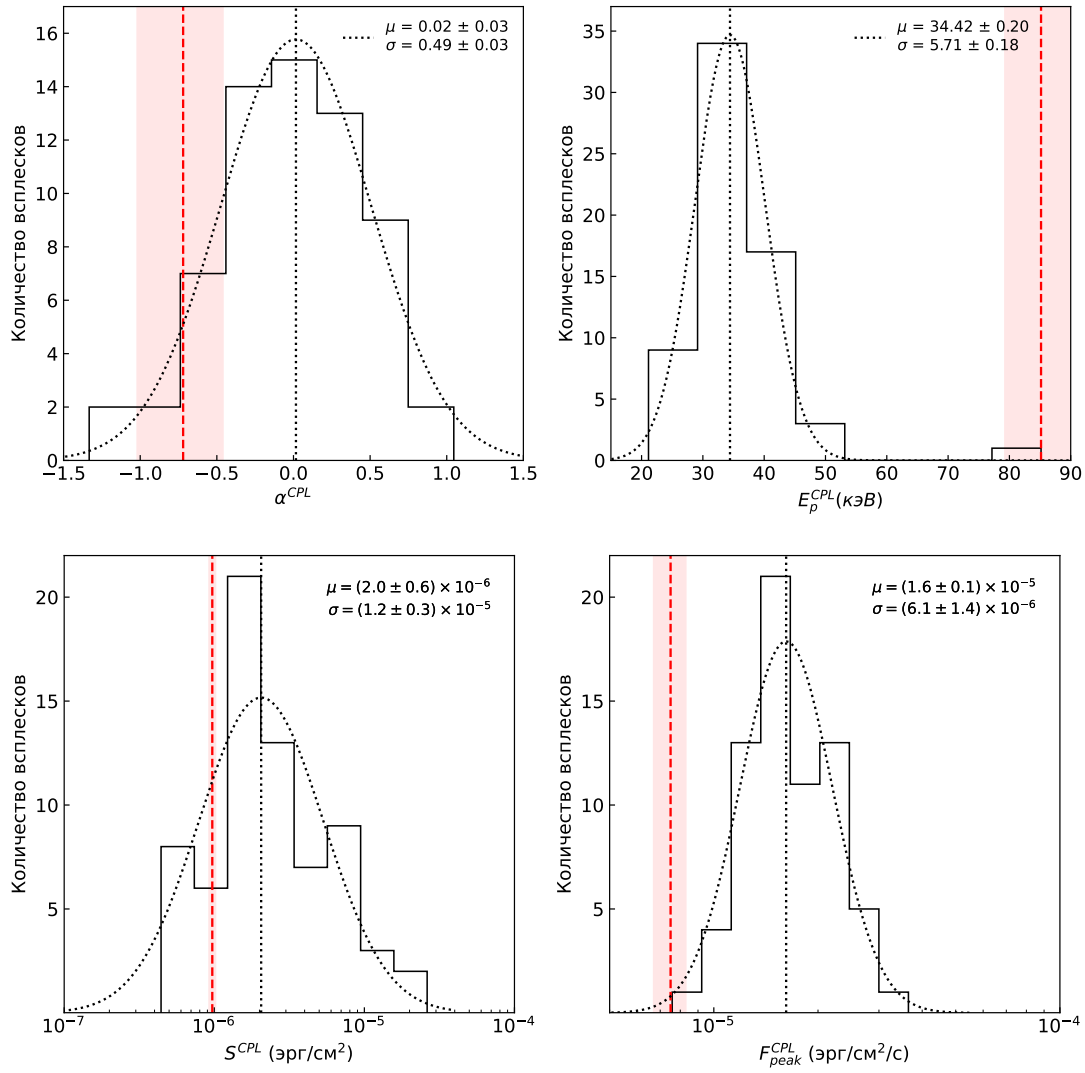


Рис. 1: Распределения спектральных параметров модели CPL (верхняя панель) и интегральных и пиковых энергетических потоков (нижняя панель) для всплесков SGR 1935+2154, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд. Красным цветом указаны области значения параметров с ошибками на уровне значимости 68% для всплеска, связанного с FRB 200428.

Полученные распределения временных, спектральных и энергетических параметров для всей выборки являются типичными среди других магнитаров.

В **Главе 3** проведен детальный анализ первой промежуточной вспышки от магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированной 12 апреля 2015 года. Это событие выделяется как наиболее продолжительное и яркое по интегральному потоку энергии среди всех вспышек от этого источника в данных Конус-Винд [A1, A2].

В разделе 3.1 представлена локализация вспышки, полученная методом триангуляции [16] с использованием данных четырех инструментов межпланетной сети IPN. Площадь области локализации составила 280 квадратных угловых минут. Единственный известный магнитар в этой области — SGR 1935+2154, расположенный на угловом расстоянии $1.97'$ от центра, что подтверждает его связь с событием.

В разделе 3.2 проанализирована кривая блеска вспышки (Рис. 2), характеризующаяся одиночным ярким импульсом без признаков продолжительного модулированного «хвоста», характерного для некоторых промежуточных вспышек [17, 18]. Полная длительность вспышки $T_{100} = 1.742$ с. Значения T_{90} и T_{50} составляют 1.412 ± 0.016 с и 0.654 ± 0.016 с соответственно. Поиск квазипериодических осцилляций (QPO) методом быстрого преобразования Фурье не выявил значимого сигнала. Верхние пределы на амплитуды пульсаций на уровне значимости 3σ , определенные по методике [19], составили более 50% для частот в диапазоне 5–60 Гц и 10–30% для частот 60–250 Гц. По сравнению с амплитудами QPO, обнаруженными в хвостах гигантских вспышек, эти пределы не являются строгими [20, 21, 22, 23].

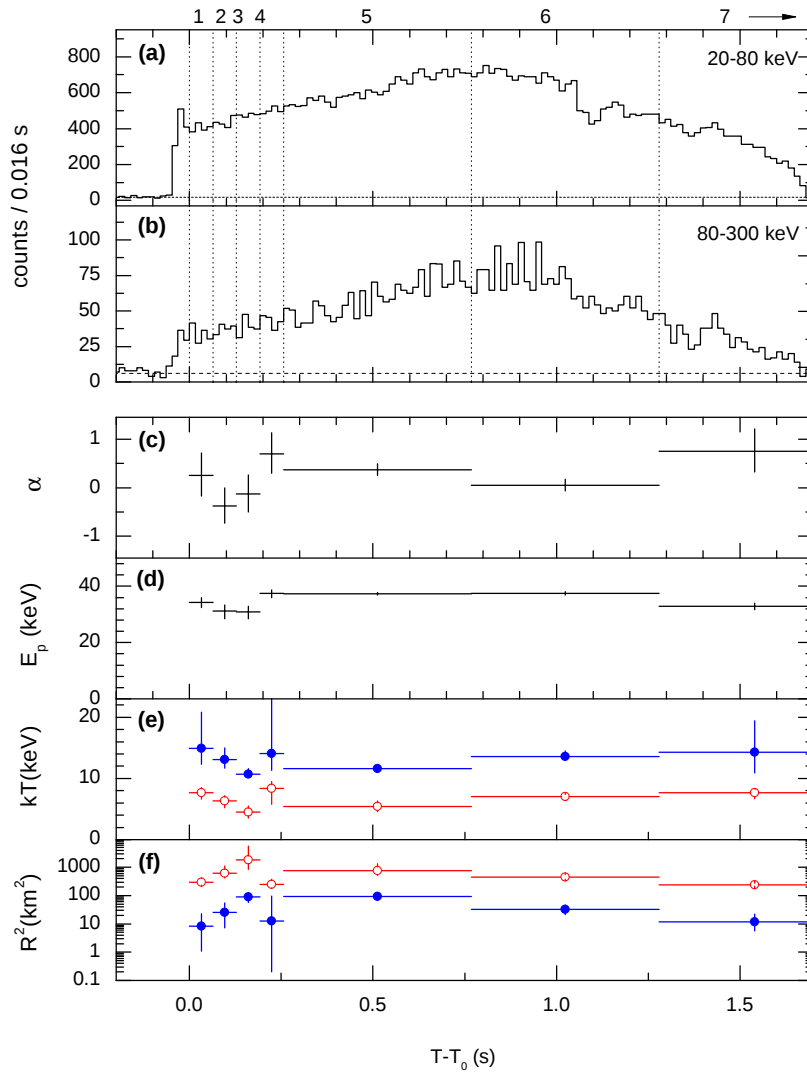


Рис. 2: Кривая блеска первой промежуточной вспышки SGR 1935+2154 в G1 (панель а) и G2 (панель b). Вертикальные пунктирные линии обозначают интервалы накопления спектров; правая граница спектра 7 ($T_0+9.472$ с) не показана. Разрешенные по времени параметры моделей CPL и 2BB приведены на панелях (c)–(f); низко- и высокотемпературные компоненты 2BB обозначены открытыми красными и заполненными синими символами соответственно.

Раздел 3.3 посвящен интегральному и разрешенному по времени спектральному анализу. Для аппроксимации спектров применялись методы минимизации χ^2 и С-статистики (C-stat). При использовании С-статистики доверительные интервалы параметров имеют меньшую ширину по сравнению со статистикой χ^2 для спектров с малым числом отсчетов в высокоэнергетических каналах. Модели 2BB и CPL хорошо описывают интегральный спектр и все семь разрешенных по времени спектров с максимальным значением $\chi^2/\text{dof} = 1.23$. Показано, что данные Конус-Винд не позволяют однозначно предпочесть одну из моделей. Для модели CPL интегральный спектр характеризуется параметрами $\alpha \approx 0.20$ и $E_p \approx 35.7$ кэВ. E_p для отдельных спектров варьируются от ~ 31.7 до ~ 37.5 кэВ, слабо коррелируя с потоком, а фотонный индекс α изменяется в широком диапазоне жестких значений от -0.3 до $+0.7$ без явной зависимости от интенсивности излучения. Для модели 2BB температуры компонент составляют $kT_1 \approx 6.4$ кэВ и $kT_2 \approx 12.4$ кэВ, с радиусами излучающих областей $R_1 \approx 21.3$ км и $R_2 \approx 6.6$ км (для расстояния 10 кпк). Значения kT_1 для отдельных спектров варьируются в диапазоне $\sim 4.5 - 8.5$ кэВ, а kT_2 — в $\sim 11 - 15$ кэВ и характеризуются меньшими относительными флуктуациями по сравнению с kT_1 . Радиусы излучающих областей и соответствующие светимости в целом коррелируют с эволюцией скорости счета. Анализ подтверждает наличие спектральной эволюции в течение вспышки, не объясняемой только статистическими флуктуациями параметров моделей. Полный энергетический поток S вспышки по модели CPL составляет $\sim 2.50 \times 10^{-5}$ эрг см $^{-2}$, а пиковый поток $F_{\text{max}} \sim 2.15 \times 10^{-5}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ на шкале 16 мс. При предположении изотропного излучения на расстоянии 10 кпк определены энергетические характеристики вспышки: полное энерговыделение составляет $\sim 4.0 \times 10^{41}$ эрг, а пиковая светимость $\sim 3.6 \times 10^{41}$ эрг/с. Эти параметры делают данную вспышку наиболее яркой по величине интегрального потока среди всех зарегистрированных событий от SGR 1935+2154.

В **Главе 4** представлен анализ уникального события — вспышки магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированной 28 апреля 2020 года одновременно с радиовсплеском FRB 200428, чьи характеристики близки к внегалактическим FRB [A4]. Это первое наблюдение, подтверждающее связь FRB с магнитарами и единственное, на сегодня, их отождествление с транзиентами вне радиодиапазона.

В разделе 4.1 описана активность магнитара в апреле 2020 года и характеристики FRB 200428. Радиовсплеск, зарегистрированный CHIME/FRB в диапазоне 400-800 МГц, имеет двухпиковую структуру с длительностями компонент ~ 0.6 мс и ~ 0.3 мс, разделенных интервалом ~ 29 мс [24]. Вторая компонента независимо обнаружена STARE2 на частоте 1.4 ГГц с длительностью ~ 0.6 мс [25]. Оценка интегрального энергетического потока 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* [26], *AGILE* [27], Конус-Винд [28] и *Insight-HXMT* [29]. Локализации событий в радио- и рентгеновском диапазонах согласуются с положением SGR 1935+2154, подтверждая их общий источник.

В разделе 4.2 исследована кривая блеска вспышки и определены ее ключевые параметры. Наиболее интенсивная часть вспышки от $T_0 - 0.060$ с до

$T_0 + 0.036$ с включает два отчетливых пика с длительностью 0.016 с и 0.032 с, перекрывающихся по времени с двумя радиоимпульсами FRB 200428 (Рис. 3). Несмотря на более широкие рентгеновские пики по сравнению с субмиллисекундными радиоимпульсами, их максимумы в диапазоне G1 совпадают с геоцентрическими временами радиоимпульсов (с учетом дисперсии) с точностью до ± 2 мс, подтверждая тесную взаимосвязь явлений в двух диапазонах.

В разделе 4.3 изучены спектральные и энергетические характеристики вспышки. Рассмотренные спектральные модели включают простой степенной закон, CPL, двухстепенную функцию Банда [30], а также однокомпонентную и двухкомпонентную (2BB) модели излучения абсолютно черного тела. Интегральный спектр в диапазоне 20–500 кэВ лучше всего описывается моделями CPL (фотонный индекс $\alpha \sim -0.72$, пиковая энергия $E_p \sim 85$ кэВ) и 2BB (температуры $kT_1 \sim 11$ кэВ и $kT_2 \sim 31$ кэВ).

Интегральный энергетический поток всплеска составил $\sim 9.7 \times 10^{-7}$ эрг см^{-2} , пиковые потоки в первом и втором рентгеновских импульсах — $\sim 7.5 \times 10^{-6}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ и $\sim 9.1 \times 10^{-6}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ соответственно. При расстоянии до источника 10 кпк полная энергия, выделенная в рентгеновском диапазоне, $E_X \sim 1.2 \times 10^{40}$ эрг, и пиковая изотропная рентгеновская светимость $L_X \sim 1.1 \times 10^{41}$ эрг с^{-1} , что типично для ярких коротких всплесков магнитаров. Отношение радио- и рентгеновских энергетических параметров ($L_r/L_X \sim 10^{-5} - 10^{-3}$, $E_r/E_X \sim 10^{-6} - 10^{-5}$) сопоставимо с внегалактическими FRB, если связывать их с гигантскими вспышками магнитаров.

В разделе 4.4 подчеркивается уникальность всплеска, ассоциированного с FRB 200428. Радиовсплеск гармонично вписывается в популяцию внегалактических FRB, укрепляя гипотезу, согласно которой магнитары являются их вероятными источниками. Однако рентгеновская вспышка, напротив, выделяется аномальной спектральной жёсткостью: пиковая энергия $E_p \sim 85$ кэВ является рекордной среди всех всплесков SGR 1935+2154 (см. Рис. 4). Вероятность такого значения в объединённой выборке из 62 всплесков (21 от Конус-Винд, 41 от *Fermi*-GBM) составляет $\sim 2 \times 10^{-10}$, подчёркивая исключительную природу события 28 апреля по сравнению с остальной популяцией.

Среди ~ 320 ярких коротких всплесков от шести магнитаров, зарегистрированных Конус-Винд за более чем 30 лет, лишь пять событий имеют сравнимую спектральную жесткость. Частота таких событий (~ 0.03 /год/магнитар) согласуется с частотой радиовсплесков, подобных FRB 200428 (0.007–0.04/год/магнитар) по данным CHIME [24]. Схожая двухпиковая структура наблюдалась у жесткой вспышки, обнаруженной 25 января 2009 года от магнитара 1E 1547.0–5408 с радиоимпульсами, зарегистрированными от этого источника примерно через 8 часов после вспышки [31]. К сожалению, одновременные радионаблюдения для жестких событий отсутствуют.

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 которого присутствует архивное радионаблюдение телескопа Parkes, покрывающее время рентгеновского всплеска [A5].

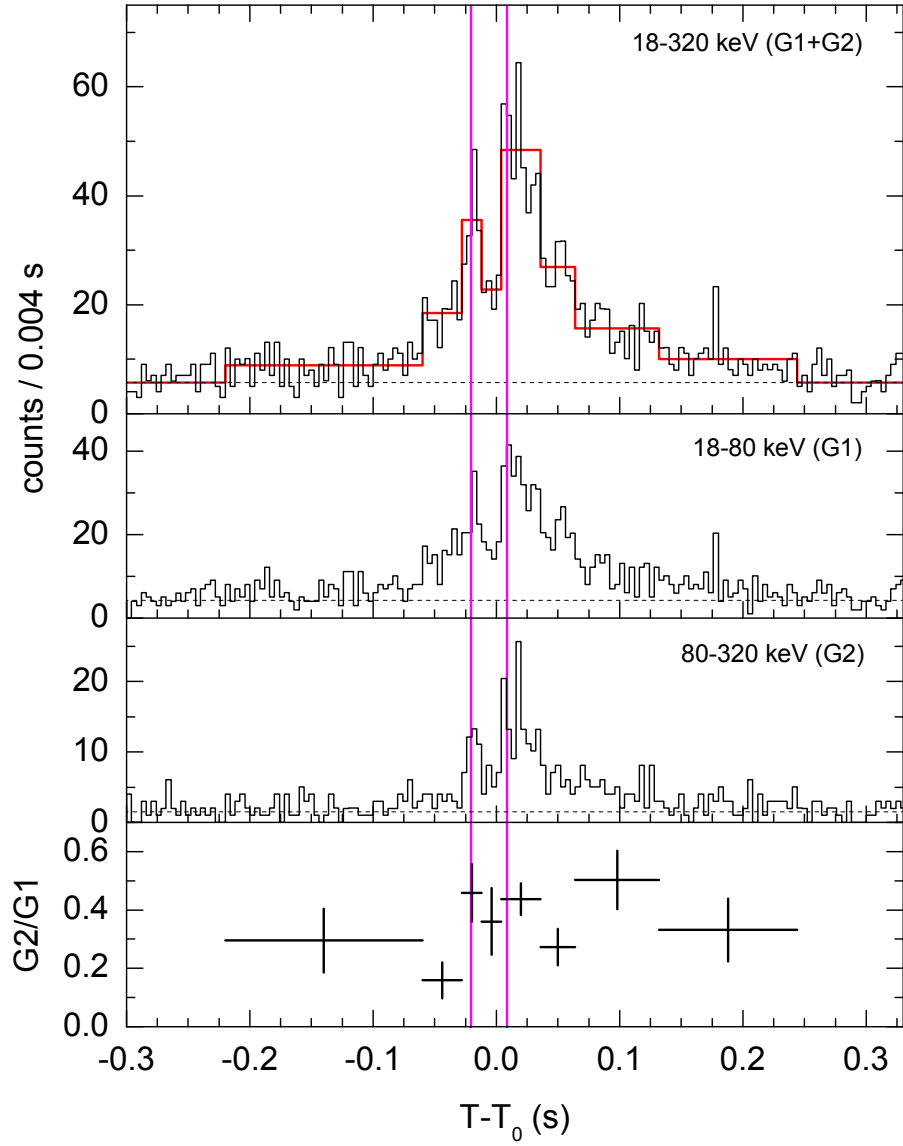


Рис. 3: Кривая блеска вспышки SGR 1935+2154, ассоциированной с FRB 200428, в трех диапазонах: G1, G2 и объединенном G1+G2. Красной линией на верхней панели показано разложение на байесовские блоки. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены уровни фонового счета. На нижней панели приведено отношение жесткости $G2/G1$ (доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 68%). Положения двух максимумов пиков на кривой блеска Конус-Винд в G1 (14:34:24.427 и 14:34:24.455 соответственно) совпадают с точностью до ± 2 мс с поправленными на дисперсию геоцентрическими временами прихода двух радиоконумент, зарегистрированных CHIME/FRB: 14:34:24.42650(2) и 14:34:24.45547(2) соответственно (отмечены вертикальными фиолетовыми линиями).

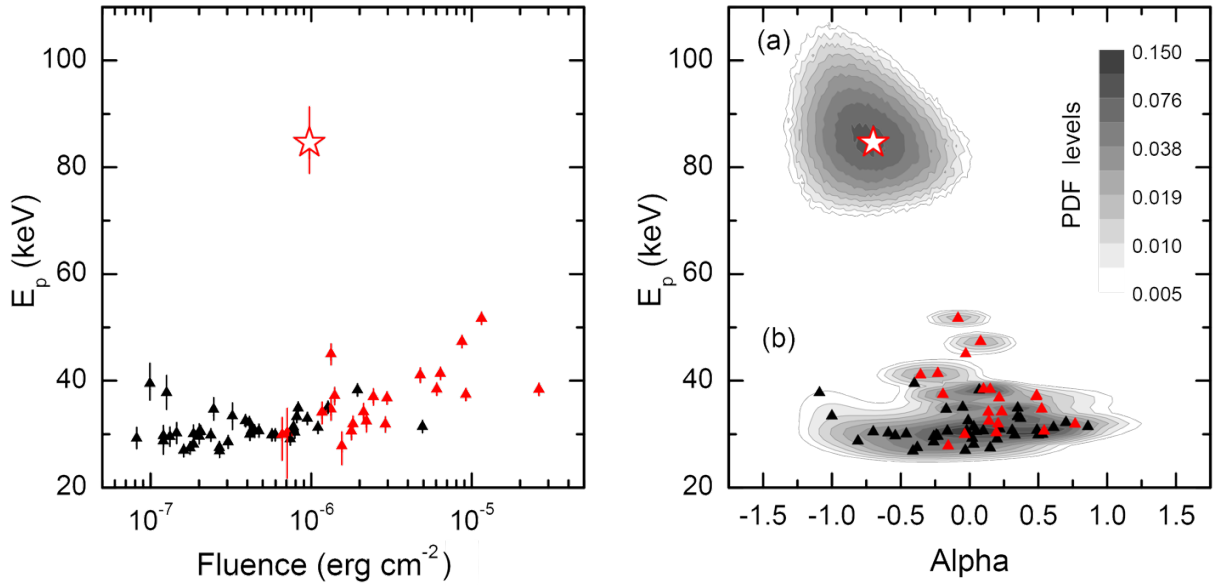


Рис. 4: Слева: Зависимость E_p от интегрального потока S для всплесков SGR 1935+2154. Красным цветом обозначены всплески, зарегистрированные Конус-Винд в 2015–2020 годах; красной звездой отмечен всплеск 28 апреля. Чёрные символы обозначают всплески, зарегистрированные *Fermi*-GBM в 2014–2016 годах. Энергетические потоки измерялись в диапазоне 20–500 кэВ для всплесков Конус-Винд и 8–200 кэВ для всплесков GBM. Все ошибки приведены на уровне 68%. Справа: двухмерные функции плотности вероятности для параметров спектральной модели CPL показаны в плоскости $\alpha - E_p$ для вспышки 28 апреля (i) и объединённой выборки из 21 вспышки Конус-Винд и 41 вспышки GBM (ii).

В разделе 5.1 изложена история открытия и исследования магнитара 1E 1547.0–5408, приведены его основные характеристики и описан эпизод интенсивной вспышечной активности, зарегистрированный в январе 2009 года.

В разделе 5.2 представлен временной и спектральный анализ рентгеновского всплеска. Кривая блеска всплеска 1E 1547.0–5408 в данных *Конус-Bund* имеет четко выраженную двухпиковую структуру с полной длительностью $T_{100} = 0.094$ с. Длительности T_{90} и T_{50} составляют ~ 0.044 с и ~ 0.014 с соответственно. Спектральный анализ показал, что спектр всплеска наилучшим образом аппроксимируется моделью CPL с параметрами $\alpha \sim -0.40$ и $E_p \sim 40$ кэВ. Совместный анализ данных *Конус-Bund* и *XMM-Newton* (EPIC-MOS) демонстрирует наилучшее соответствие модели 2BB с учетом поглощения при фиксированной колонковой плотности водорода $N_H = 4.2 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ [32], 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. На основе этой модели был рассчитан болометрический поток $2.6 \times 10^{-6} \text{ эрг см}^{-2}$. Наблюдаемые потоки в диапазонах 2–10 кэВ и 20–100 кэВ составили $3.1 \times 10^{-7} \text{ эрг см}^{-2}$ и $1.5 \times 10^{-6} \text{ эрг см}^{-2}$ соответственно. Все полученные характеристики подчеркивают типичность данного события для популяции коротких всплесков магнитаров.

Раздел 5.3 описывает радионаблюдения магнитара 1E 1547.0–5408, проведенные 3 февраля 2009 года с использованием 64-метрового радиотелескопа Parkes на частоте 6.6 ГГц. Наблюдения начались в 18:28:58 UT, за $\sim$ час до рентгеновского всплеска, и продолжались 1.5 часа. Периодические пульсации отсутствовали, но зарегистрированы два одиночных радиоимпульса (Рис. 5) в моменты времени 19:31:29.82 TDB (импульс А) и 19:31:34.05 TDB (импульс В). Времена скорректированы с учётом дисперсии с погрешностью 4.4 мс и указаны для бесконечной частоты. Импульс А, произошедший через ~ 1 с (половину периода вращения магнитара) после рентгеновского всплеска, вызвал насыщение приёмного тракта и имеет только примерную оценку потока в 0.6 кЯн·мс.

Раздел 5.4 посвящен исследованию связи рентгеновского всплеска с радиоимпульсом и содержит обсуждение события. Радиоимпульсы не совпадают по фазе с экстраполированными радиопульсациями, зарегистрированными за шесть дней до этого (25 января [31]). Вероятность случайного совпадения рентгеновского всплеска с радиоимпульсом оценивается как низкая ($\sim 1.1 \times 10^{-3}$, 3.3σ), что указывает на их возможную физическую связь. Анализ совместных радио- и рентгеновских наблюдений 1E 1547.0–5408 и SGR 1935+2154 выявляет широкий диапазон энергий радиовспышек магнитаров: от типичных одиночных импульсов радиопульсаров до FRB-подобных всплесков, подчеркивая разнообразие их феноменологии.

В **Главе 6** представлены результаты архивного поиска сопутствующего жесткого рентгеновского излучения для более чем 700 опубликованных FRB с использованием непрерывных данных эксперимента *Конус-Bund*, охватывающих весь период активных наблюдений FRB [A6, A7].

В разделе 6.1 подчеркивается важность многоволновых исследований для выяснения природы источников FRB и механизмов их излучения. Отмечаются работы в высокоэнергетическом диапазоне с использованием данных *Fermi* (GBM, LAT), *INTEGRAL* (IBIS/ISGRI), *AstroSat* (CZTI), *Insight-HXMT* (HE) и других инструментов. Однако эти исследования были ограничены малым числом известных FRB на момент их публикации.

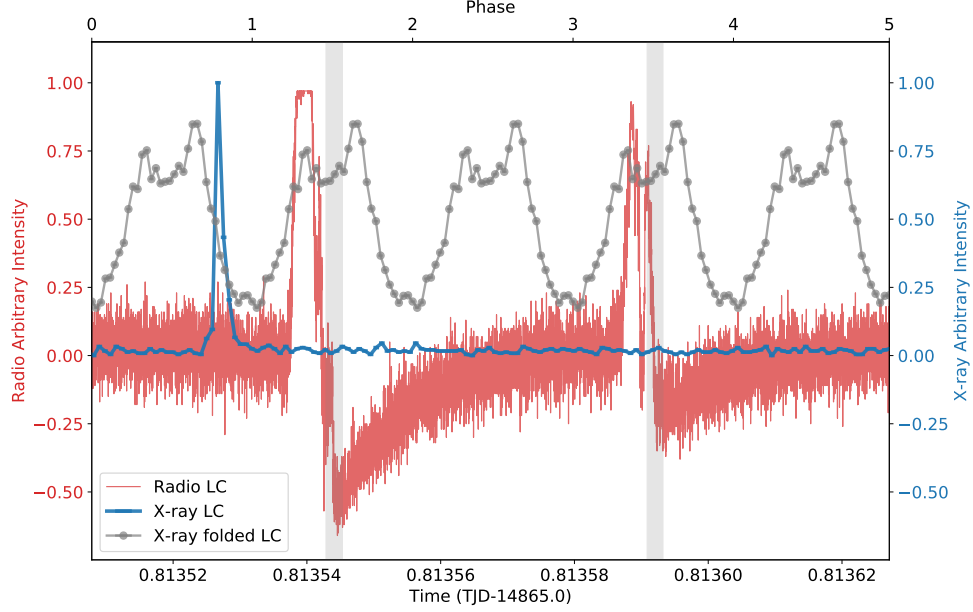


Рис. 5: Одновременные наблюдения в рентгеновском и радио- диапазонах магнитара 1E 1547.0-5408, проведённые 3 февраля 2009 года. Синяя линия представляет рентгеновскую кривую блеска, серая линия — свёрнутую кривую блеска в рентгеновском диапазоне, полученную с использованием данных *XMM-Newton*. Кривая блеска радионаблюдений телескопа Parkes показана 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.

В разделе 6.2 описана выборка из 721 FRB, отобранных из базы TNS, зарегистрированных в период с 25 января 2001 года по 5 января 2022 года с использованием 14 радиотелескопов. В выборку вошли 573 одиночных FRB и 148 всплесков от восьми повторных источников.

Раздел 6.3 описывает методологию поиска и определения верхних пределов. Время сигнала T_0 для каждого FRB корректировалось с учетом дисперсионной задержки радиосигнала и времени распространения сигнала между Конус-Винд и радиотелескопом. Поиск значимого сигнала ($> 5\sigma$) проводился в интервале 400 с вокруг T_0 . При отсутствии детектирования определялись верхние пределы на пиковый и интегральный потоки с использованием четырех спектральных моделей: типичных спектров коротких и длинных гамма-всплесков [33, 34], мощных начальных импульсов гигантских вспышек магнитаров (MGF; [35]) и спектра рентгеновской вспышки, связанной с FRB 200428. Дополнительно применялся стековый анализ (усреднение кривых блеска) для выявления слабых сигналов благодаря сниженному статистическому шуму. Анализ проводился отдельно для одиночных событий и для каждого повторного источника.

В разделе 6.4 представлены результаты и их обсуждение. Проведенный поиск не выявил значимого излучения в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазоне. Верхние пределы на поток сопутствующего высокоэнергетического излучения составили $(0.1 - 2) \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$ в зависимости от

используемой спектральной модели. Стековый анализ не обнаружил коллективного сигнала, но позволил ужесточить верхние пределы в 20-25 раз. Для 18 FRB с измеренными красными смещениями родительских галактик определены верхние пределы на изотропный эквивалент полного энергосвечения E_{iso} и пиковой светимости L_{iso} (см. Таб. 1).

Таблица 1: Верхние пределы на изотропный эквивалент полного энергосвечения и пиковой светимости для FRB с измеренными красными смещениями родительских галактик. Для повторных FRB приведены результаты стекового анализа.

FRB	Повторный	z	E_{iso} (10^{49} эрг)	L_{iso} (10^{49} эрг с^{-1})
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 [36] ^c [37] ^d [38] ^e [39] ^f [40]

Наиболее строгие ограничения получены для ближайшего 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^{-1} . Эти значения исключают гигантские вспышки магнитаров в качестве возможных источников FRB, но допускают короткие всплески магнитаров с энергиями ниже 10^{42} эрг. Нижние пределы на отношение $E_{\text{radio}}/E_{\text{iso}} \geq 10^{-11} - 10^{-9}$ согласуются с предыдущими исследованиями, но лишь приближаются к теоретическим предсказаниям ($10^{-6} - 10^{-5}$).

В **Заключении** излагаются основные результаты работы:

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 [A1, A2, A3, A4].

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 [A1, A2].
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 [A4].
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 [A4].
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 [A5].

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 [A6, A7].

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. 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 (определяющий вклад в работу);
- A2. A. V. Kozlova et al. First intermediate flare from SGR 1935+2154 // *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 769, article id. 012005, 2016 (определяющий вклад в работу);
- A3. A. V. Kozlova et al. Properties of Konus-Wind SGR bursts // *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 932, article id. 012026, 2017 (определяющий вклад в работу);
- A4. 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 (определяющий вклад в работу);
- A5. 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 (соискатель, совместно с Д. Д. Фредериксом, провел подготовку данных, полученных в эксперименте *Конус-Винд*; соискателем лично выполнен временной и спектральный анализ данных, получены энергетические характеристики всплеска);
- A6. 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 (определяющий вклад в работу)

- A7. 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 (определяющий вклад в работу).

Литература, цитируемая в автореферате

1. Kouveliotou C., Dieters S., Strohmayer T. et al. An X-ray pulsar with a superstrong magnetic field in the soft γ -ray repeater SGR1806 - 20 // Nature. — 1998. — Vol. 393, no. 6682. — P. 235–237.
2. Rea Nanda, De Grandis Davide. Magnetars // arXiv e-prints. — 2025. — P. arXiv:2503.04442.
3. Popov S. B., Postnov K. A., Pshirkov M. S. Fast radio bursts // Physics Uspekhi. — 2018. — Vol. 61, no. 10. — P. 965.
4. Zhang Bing. The physics of fast radio bursts // Reviews of Modern Physics. — 2023. — Vol. 95, no. 3. — P. 035005.
5. Lyubarsky Yu. A model for fast extragalactic radio bursts. // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 442. — P. L9–L13.
6. Margalit Ben, Metzger Brian D., Berger Edo et al. Unveiling the engines of fast radio bursts, superluminous supernovae, and gamma-ray bursts // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — Vol. 481, no. 2. — P. 2407–2426.
7. 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.
8. Lyubarsky Yuri. Fast Radio Bursts from Reconnection in a Magnetar Magnetosphere // Astrophys. J. — 2020. — Vol. 897, no. 1. — P. 1.
9. Lyutikov Maxim, Popov Sergey. Fast Radio Bursts from reconnection events in magnetar magnetospheres // arXiv e-prints. — 2020. — P. arXiv:2005.05093.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.

15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.

33. 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.
34. 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.
35. Svinkin D., Frederiks D., Hurley K. et al. A bright γ -ray flare interpreted as a giant magnetar flare in NGC 253 // *Nature*. — 2021. — Vol. 589, no. 7841. — P. 211–213.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.