

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Сазонова С.Ю.
на диссертацию Ридной Анны Владимировны «Исследование рентгеновских вспышек магнитаров и их связи с быстрыми радиовсплесками по данным эксперимента Конус-Винд», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

В диссертации исследуются магнитары — одни из самых экстремальных объектов во Вселенной. После открытия Е.П. Мазецом с коллегами по ФТИ им. А.И. Иоффе по данным космического эксперимента Конус первого объекта этого класса в марте 1979 года было открыто еще около трех десятков магнитаров, и стало ясно, что это молодые нейтронные звезды со сверхсильными магнитными полями, достигающими 10^{15} Гс. По всей видимости, именно со столь сильным магнитным полем связано явление коротких мощных вспышек рентгеновского и гамма-излучения, регистрируемых от магнитаров, однако какая именно физика стоит за этим, пока остается неясно. Интерес к магнитарам связан еще и с тем, что такие объекты могут быть «центральными машинами» самых экстремальных наблюдаемых космических явлений, таких как гамма-всплески, сверхяркие сверхновые и быстрые синие оптические транзиенты. Магнитары привлекли к себе еще больше внимания после открытия в 2007 году быстрых радиовсплесков (FRB). Преобладает точка зрения — опять же без ясного понимания физической картины, что такие события тоже происходят на магнитарах. Однако из-за сложности наблюдений прямого подтверждения этому долгое время не было, пока наконец 28 апреля 2020 года не был зарегистрирован быстрый радиовсплеск от магнитара SGR 1935+2154. Это знаменитое событие подробно исследуется в диссертационной работе, при этом не менее важно и то, что соискатель исследовал популяционные свойства магнитарных вспышек и ограничения на испускание таких вспышек источниками FRB. Диссертационная работа практически целиком основана на уникальных данных непрерывных многолетних наблюдений всего неба в жестком рентгеновском диапазоне российским экспериментом Конус на американском спутнике Винд. В виду всего вышесказанного тема диссертации **исключительно актуальна.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 138 страниц. Во **Введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, описаны новизна исследования и значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения.

В первой главе представлено краткое описание космического эксперимента Конус-Винд, данные которого используются в последующих главах.

Вторая глава посвящена исследованию вспышечной активности магнитара SGR 1935+2154 начиная с момента его открытия в 2014 г. по конец 2022 г. За это время прибор Конус-Винд зарегистрировал 70 вспышек рентгеновского излучения, что позволило систематически исследовать временные и спектральные свойства, а также энергетику таких событий.

Третья глава посвящена более подробному изучению одного из 70 всплесков от SGR 1935+2154, а именно вспышке промежуточной длительности (которые встречаются гораздо реже коротких всплесков), зарегистрированной 12 апреля 2015 года. В частности, изучена спектральная эволюция по ходу вспышки.

В четвертой главе представлены результаты исследования рентгеновской вспышки магнитара SGR 1935+2154, зарегистрированной прибором Конус-Винд 28 апреля 2020 г. Представлены доказательства того, что это уникальное событие связано с быстрым радиовсплеском FRB 200428, и что свойства этого события кардинально отличаются от свойств обычных всплесков SGR 1935+2154 и других магнитаров. Подчеркивается важность этого открытия для понимания природы быстрых радиовсплесков.

В пятой главе исследуется всплеск другого магнитара — 1E 1547.0–5408, который был зарегистрирован не только прибором Конус-Винд, но и инструментами Swift-BAT и XMM-Newton. Показано, что эта вспышка рентгеновского излучения связана с двумя короткими слабыми радиоимпульсами, обнаруженными телескопом Parkes. По своим физическим свойствам это событие занимает промежуточное положение между обычными (очень слабыми) радиоимпульсами магнитаров и мощными FRB-подобными событиями типа SGR 1935+2154/FRB 200428.

В шестой главе по данным Конус-Винд проведен поиск сопутствующего жесткого рентгеновского излучения от 721 быстрого радиовсплеска, зарегистрированных разными телескопами с 2001 по 2022 год. Статистически значимый сигнал обнаружить не удалось, но для всех исследованных событий получены верхние пределы на поток рентгеновского излучения, а для 18 FRB с известными красными смещениями родительских галактик получены также ограничения на полное энерговыделение и пиковую светимость в широком рентгеновском диапазоне. Эти ограничения важны для дальнейшего развития моделей быстрых радиовсплесков.

В Заключении суммированы результаты диссертационной работы.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить большой объем и тщательность проделанной работы по обработке и интерпретации наблюдательных данных. Полученные научные результаты получены с применением апробированных методов обработки данных прибора Конус-Винд и **хорошо обоснованы**. Многие из обсуждаемых магнитарных вспышек наблюдались также другими космическими экспериментами, и полученные по ним данные кросс-коррелировались и использовались в совместном анализе, что дополнительно повышает уверенность в надежности результатов. Результаты диссертационной работы опубликованы в семи статьях в рецензируемых журналах, индексируемых Белым списком Российского центра научной информации и/или входящих в международную базу цитирований Web of Science, из них четыре — в международных изданиях первого квартиля. Особенно стоит отметить статью 2021 года в Nature Astronomy, которая на текущий момент собрала уже более 250 ссылок в астрофизической литературе (согласно базе NASA ADS). Соискатель внес **решающий или значительный личный вклад** во все публикации. Кроме того, результаты диссертации докладывались на семи конференциях.

Все результаты диссертационной работы характеризуются **существенной новизной**. Особенно стоит отметить открытие и детальное исследование по данным эксперимента Конус-Винд вспышки жесткого рентгеновского излучения магнитара SGR 1935+2154, что позволило доказать непосредственную связь этого события с быстрым радиовсплеском FRB 200428 и тем самым впервые продемонстрировать, что мощные короткие радиовсплески могут рождаться в магнитарах. Это один из самых ярких астрофизических результатов, полученных в мире за последнее десятилетие.

Результаты диссертационной работы имеют **высокую значимость** для астрофизики высоких энергий. Полученные статистические данные о характеристиках 70 рентгеновских вспышек магнитара SGR 1935+2154, открытие вспышки жесткого рентгеновского излучения от SGR 1935+2154 одновременно с мощным быстрым радиовсплеском, обнаружение связанных друг с другом рентгеновского всплеска и слабых радиоимпульсов от магнитара 1E 1547.0-5408, полученные верхние пределы на сопутствующее рентгеновское излучение для более 700 быстрых внегалактических радиовсплесков существенно обогащают наблюдательную базу для развития теоретических моделей магнитаров и источников быстрых радиовсплесков. Результаты работы будут полезными также при планировании следующего поколения наземных и космических экспериментов в гамма-, рентгеновской и радиоастрономии.

У оппонента есть ряд **замечаний** к диссертации:

1) В диссертации практически нет рисунков, показывающих широкополосные рентгеновские спектры вспышек магнитаров, хотя рентгеновская спектроскопия (в основном по данным прибора Конус-Винд) является одной из центральных тем проведенного исследования.

Конечно, в тексте приведены все необходимые подробности, касающиеся методов обработки данных и используемых спектральных моделей, а также протабулированы измеренные спектральные характеристики, однако соответствующих графиков нет, за исключением рисунка 3.4 со спектром промежуточной вспышки магнитара SGR 1935+2154. На мой взгляд, это досадное упущение, так как представление рентгеновских спектров в графическом виде позволяет легко увидеть нюансы подгонки спектральных моделей и качества используемых данных и вообще является обычной практикой в рентгеновской астрономии. Я, конечно, не имею в виду, что нужно было показывать все исследованные спектры, но наиболее представительные из них, конечно, было бы полезно продемонстрировать.

2) Продолжая эту тему, отмечу, что, согласно таблице 2.4, для нескольких всплесков магнитара SGR 1935+2154 качество аппроксимации спектра оказалось не вполне удовлетворительным. Например, это относится к событию №24, для которого получено значение $\chi^2=66$ на 33 степени свободы. Стоило бы более подробно обсудить такие случаи, так как они могут вскрыть недостатки использованных эмпирических моделей и указать пути для их усовершенствования.

3) Вызывает некоторое удивление точное измерение (судя по приведенным погрешностям) температур двух компонент при фитировании спектров моделью 2BB. Если для более горячей компоненты это нетрудно понять, так как она определяется надежно регистрируемым завалом в спектре на высоких энергиях, то для более холодной компоненты точное определение температуры в районе $kT=5$ кэВ при том, что нижняя граница энергетического диапазона прибора Конус-Винд лежит существенно выше (около 20 кэВ), кажется нетривиальной задачей. Стоило бы обсудить надежность определения температур в модели 2BB с учетом (наверняка) имеющихся погрешностей в калибровках прибора и эволюции его характеристик за долгий период эксплуатации в космосе. В этой связи можно также отметить аналогию между применением двухтемпературной модели к всплескам магнитаров и аналогичной модели (правда, с более низкими температурами) — при описании рентгеновских спектров аккрецирующих нейтронных звезд: в последнем случае, как известно, возникает проблема неоднозначного выделения в суммарном спектре двух тепловых компонент, связанных с аккреционным диском и пограничным слоем (см., Revnivtsev et al., MNRAS, 2013).

4) В разделе 2.4 в числе измеренных физических характеристик 70 всплесков магнитара SGR 1935+2154 приводятся интегральные и пиковые потоки. Было бы полезно явным образом перевести эти потоки в энерговыделения и светимости с учетом неопределенности в расстоянии до объекта (3-14 кпк) и обсудить полученную статистику в общем контексте магнитаров и других внегалактических транзиентных явлений. Аналогичное замечание относится к таблице

4.4, где приведены интегральные потоки всплесков с жестким спектром от четырех магнитаров. Для всех этих объектов есть оценки расстояний, что позволяет сравнить энерговыделения всплесков. Конечно, эти расстояния одного порядка и характеризуются существенными неопределенностями, а значит соотношение энерговыделений будет примерно таким же, как соотношение интегральных потоков, но это следовало бы хотя бы упомянуть.

5) В таблице 3.1 приводятся значения величин L_1 и L_2 . Не очень понятно, это светимости или интегральные энерговыделения. Скорее всего, светимости, но тогда указаны неправильные единицы измерений (эрг вместо эрг/с).

Все эти замечания не являются существенными, в основном относятся к презентации результатов и не влияют на высокое научное значение диссертации.

Диссертация отвечает всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Ридная Анна Владимировна заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия». Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией экспериментальной астрофизики,
ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий
ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



С.Ю. Сазонов

Контактные данные:

тел.: +7 495 3335357, эл. почта: sazonov@cosmos.ru

Адрес места работы: 117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32,

ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук

Подпись С.Ю. Сазонова заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН,
кандидат физико-математических наук



А.М. Садовский

1 декабря 2025 г.

