

На правах рукописи

Лутовинов Александр Анатольевич

**Массивные рентгеновские двойные системы
в обзорах обсерватории *ИНТЕГРАЛ*:
свойства популяции и физические процессы
у поверхности нейтронных звезд**

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН

Бисикало Дмитрий Валерьевич

доктор физико-математических наук
профессор

Шакура Николай Иванович

доктор физико-математических наук

Шибанов Юрий Анатольевич

Ведущая организация:

Главная астрономическая обсерватория РАН (Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 27 декабря 2013 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте космических исследований РАН по адресу: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 22 ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физ.-мат. наук

А.Ю.Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Звездное население галактик, в том числе и нашей Галактики, включает разные популяции рентгеновских источников, наиболее яркими из которых являются двойные звездные системы с компактными объектами (нейтронными звездами и черными дырами). Таким образом, исследование рентгеновских двойных систем служит эффективным способом изучения свойств этих объектов и поведения вещества в экстремальных условиях вокруг них.

Рентгеновские двойные системы можно разделить на два больших класса: маломассивные рентгеновские двойные системы (low-mass X-ray binaries, LMXBs) и массивные рентгеновские двойные системы (high-mass X-ray binaries, HMXBs). Было показано, что популяция ярких HMXBs, существующая в спиральных и неправильных галактиках Локальной Группы, связана с молодым звездным населением и представляет собой массивные двойные системы, в которых один из компаньонов уже проэволюционировал, превратившись в результате вспышки сверхновой в компактный объект (нейтронную звезду или черную дыру). Рентгеновское излучение в такой системе формируется в результате аккреции вещества с оставшегося нормального компаньона на этот компактный объект. Принимая во внимание характерное время эволюции массивных звезд (несколько $\times 10^6 - 10^7$ лет), такие системы относят к молодому населению, в отличие от маломассивных рентгеновских двойных систем, возраст которых оценивается в несколько миллиардов лет.

Естественно ожидать (и это подтверждается наблюдениями), что количество HMXBs в галактике зависит от темпа звездообразования в ней. При этом важно отметить, что для галактик с повышенным темпом звездообразования вклад HMXBs в общее рентгеновское излучение галактики оказывается преобладающим. В то же время в обычных спиральных галактиках (типа Млечного Пути) количество HMXBs и их вклад в общее рентгеновское излучение оказывается значительно меньшим. Последнее связано с тем, что маломассивные двойные системы, как старое население, концентрируются к центру галактики, в то время как массивные двойные системы расположены, в основном, в спиральных рукавах, где идут процессы звездообразования.

Таким образом, кратко основные свойства популяции НМХВs можно сформулировать следующим образом – это расположенные преимущественно в спиральных рукавах двойные системы, в которых оптическим компаньоном является звезда класса O-B, массой $> 8 - 10 M_{\odot}$, возрастом несколько миллионов или десятков миллионов лет.

В последние годы, особенно после запуска на орбиту обсерватории *Chandra*, произошел качественный скачок в изучении рентгеновских двойных систем в соседних галактиках – появилась возможность разрешать их рентгеновское излучение на точечные источники и исследовать свойства как отдельных объектов (правда, в большинстве своем, наиболее ярких), так и разных популяций источников. Однако последнее часто приходится делать косвенными методами, так как для проведения таких исследований необходимо предварительно установить природу рентгеновского источника, но даже чувствительности космического телескопа им. Хаббла и углового разрешения связки "*Chandra-телескоп им. Хаббла*" не хватает для однозначной идентификации и определения природы большинства зарегистрированных в далеких галактиках рентгеновских источников. Поэтому для исследования свойств их популяций применяются косвенные методы, такие как построение функции светимости (luminosity function, LF) объектов, расположенных в разных областях галактики, и оценки вклада разных популяций в общую светимость галактики.

Обычно построение функции светимости двойных систем проводилось и проводится в мягком рентгеновском диапазоне $1 - 10$ кэВ, где чувствительность современных телескопов достаточна, чтобы регистрировать значительное количество объектов в соседних галактиках. С другой стороны, светимость в этом диапазоне энергий составляет небольшую долю от полной светимости обычно жестких массивных рентгеновских двойных систем, что может вносить искажения в полученные зависимости. Поэтому исследование функции светимости двойных систем в жестком рентгеновском диапазоне и ее сравнение с полученными ранее результатами является актуальной проблемой.

Кроме того, необходимо отметить, что массивные рентгеновские двойные системы, в принципе, могут существовать и в балджах галактик – в областях, где идут процессы звездообразования (например, молекулярных облаках), однако пока нет однозначных наблюдательных подтверждений этого. Ответить на этот вопрос, а также на многие другие

вопросы, связанные с эволюцией, физическими и статистическими свойствами массивных рентгеновских двойных систем, используя наблюдения удаленных галактик, весьма затруднительно, а в некоторых случаях невозможно. В частности, это также относится к определению параметров двойных систем, которые играют ключевую роль в эволюции НМХВс. Таким образом, наилучшим образом для изучения свойств массивных рентгеновских двойных систем подходит наша Галактика и, в некоторых аспектах, ближайšie к нам галактики – Большое и Малое Магеллановы Облака.

Несмотря на малое (по галактическим меркам) время жизни массивных рентгеновских двойных систем ($10^6 - 10^7$ лет), проследить эволюцию какой-либо одной из них не представляется возможным. Поэтому необходимо наблюдать и исследовать как можно больше таких систем, в том числе находящихся на разных этапах своего развития, чтобы получить наиболее полную картину их эволюции, в том числе зависимость от массы оптического компаньона, параметров двойной системы и т.д. Для достижения этих целей, в свою очередь, необходимы чувствительные и в то же время максимальные по площади обзоры Галактики. Именно таким является обзор Галактической плоскости обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*, проведенный в 2003–2011 гг.

Вообще, обзоры всего неба и Галактической плоскости в рентгеновских лучах проводились с начала 70-х годов, когда на орбиту была запущена первая специализированная рентгеновская обсерватория *UHURU*. Результатом ее работы стал каталог из почти четырехсот источников разной природы – от белых карликов и звезд с активными коронами до галактик и скоплений галактик. Однако точно определить природу для большей части объектов, открытых в обзоре обсерватории *UHURU*, а также в последующих обзорах, проведенных обсерваториями *HEAO1* и *Ariel-V* в конце 70-х годов, было невозможно из-за невысокой (минуты – десятки угловых минут) точности локализации зарегистрированных объектов.

Обзоры, проводившиеся с помощью рентгеновских телескопов с фокусирующей оптикой (обсерватории *Einstein*, *ASCA*, *XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift*), обладающих высокой чувствительностью и позволяющих измерять положение рентгеновских источников на небе с точностью до долей секунды, в свою очередь, также имеют и ряд недостатков, основными из которых являются: мягкий рентгеновский диапазон энергий, в котором

эти инструменты могут работать, < 10 кэВ, и малое поле зрения – как правило, несколько угловых минут. Например, в беспрецедентном по чувствительности обзоре всего неба обсерватории *ROSAT*, проведенном в диапазоне энергий $0,2 - 2,5$ кэВ, отсутствует большое количество галактических источников, в первую очередь рентгеновских двойных систем с массивными звездами. Это связано с тем, что межзвездное и внутреннее поглощение в двойной системе может практически полностью экранировать рентгеновское излучение компактного объекта в мягком рентгеновском диапазоне энергий. Обзоры галактической плоскости обсерваториями *ASCA* и *XMM-Newton* до некоторой степени свободны от этого недостатка в силу того, что их энергетические диапазоны простираются до $\simeq 10$ кэВ, где влияние поглощения начинает ослабевать. Однако площади этих обзоров невелики и покрывают лишь небольшую часть Галактики, что делает затруднительным исследование глобальных свойств популяций галактических рентгеновских источников по данным только этих обзоров.

Широкое поле зрения инструментов обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, их высокая чувствительность и длительное время работы на орбите позволили провести не только обзор всего неба в жестких рентгеновских лучах, но и выполнить обширную программу глубоких наблюдений всей Галактической плоскости. В результате было открыто около трехсот новых источников рентгеновского излучения, а комбинация последующих наблюдений с помощью обсерваторий *XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift* с данными оптических и инфракрасных наблюдений позволила определить природу большинства из них. В частности, было обнаружено более трех десятков новых массивных рентгеновских двойных систем, в том числе относящихся к новым популяциям галактических объектов в массивных рентгеновских двойных системах – сильнопоглощенным источникам и быстрым рентгеновским транзиентам в двойных системах со сверхгигантами (supergiant fast X-ray transients, SFXTs). Столь значительное увеличение числа известных НМХВс потребовало провести анализ глобальных характеристик популяции этих объектов, как статистических, так и физических.

Цель работы

Целью работы является понимание глобальных характеристик и свойств популяции массивных рентгеновских двойных систем по данным обзора Галактической плоскости обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* – их распределения по светимости и пространственного распределения в Галактике, а также определение параметров и характеристик нейтронных звезд и аккрецируемой материи в таких системах путем комплексного исследования в широком диапазоне энергий.

Научная и практическая ценность работы

По результатам многолетних наблюдений Галактической плоскости обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* построена наиболее глубокая по потоку и статистически полная выборка массивных рентгеновских двойных систем в Галактике. Полученная выборка была использована для измерения плотности их пространственного распределения в Галактике и функции светимости. Определение параметров последней было использовано для предсказания количества массивных рентгеновских двойных систем в будущих обзорах. Кроме того, полученная функция светимости может быть использована при определении вклада массивных рентгеновских двойных систем в общую светимость далеких галактик.

Отработанная в диссертации методика оценки межзвездного поглощения и закона его изменения в направлении на центр Галактики по положению гигантов красного сгущения на диаграмме цвет—видимая величина может быть использована для определения классов звезд-компаньонов в массивных рентгеновских двойных системах, расположенных в этом направлении, и оценки расстояния до них.

В рамках модели излучения аккрецирующих из звездного ветра нейтронных звезд было показано, что на диаграмме $P_{orb} - L_x$ все постоянные массивные рентгеновские двойные системы расположены в так называемой разрешенной области, в то время как все быстрые рентгеновские транзиенты в двойных системах со сверхгигантами в выключенном состоянии находятся в "запрещенной" области диаграммы и только во время вспышек перемещаются в "разрешенную" область, становясь обычными НМХВс. Этот результат уже стал важным аргументом в пользу моделей, объясняющих транзитное поведение этих

объектов блокировкой (скорее всего, магнитной) аккреции на нейтронную звезду, а не неоднородностями звездного ветра.

Атласы спектров и фазовых кривых блеска нескольких десятков рентгеновских пульсаров, а также данные по долговременной переменности периодов импульса и потоков от этих источников могут быть использованы и уже используются при построении моделей аккреции на замагниченные нейтронные звезды. Кроме того, полученные результаты по зависимости параметров циклотронной линии поглощения от светимости рентгеновского пульсара позволили существенно продвинуться в понимании физических процессов, происходящих вблизи областей основного энерговыделения нейтронных звезд, и приступить к разработке новых моделей излучения таких объектов.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на международных научных конференциях IAU Symposium 230 "Populations of High Energy Sources in Galaxies" (Дублин, Ирландия, 2005), "The multicoloured landscape of compact objects and their explosive progenitors" (Чефалу, Италия, 2006), 6th INTEGRAL Workshop "The Obscured Universe" (Москва, Россия, 2006), "Холодные диски, горячие потоки: разные лица аккреции на компактные объекты" (Эстерсунд, Швеция, 2008), "Физика нейтронных звезд" (Санкт-Петербург, Россия, 2008), XXVII Генеральной ассамблее Международного Астрономического Союза (Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2009), 8th INTEGRAL Workshop "The Restless Gamma-Ray Universe" (Дублин, Ирландия, 2010), "Рентгеновская астрофизика до 511 кэВ" (Феррара, Италия, 2011), "Экстремальное и переменное небо на высоких энергиях" (Кальяри, Италия, 2011), "Конференция по науке приборов eRosita и ART-XC обсерватории СРГ" (Казань, Россия, 2012), "9th INTEGRAL Workshop" (Париж, Франция, 2012), Европейской неделе астрономии и космической науки EWASS-2013 (Турку, Финляндия, 2013), всероссийских конференциях ВАК-2007 (Казань, Россия), "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (Москва, Россия, 2005, 2009, 2011, 2012), а также на астрофизических семинарах ИКИ РАН, университета Оулу (Финляндия), Института специальных исследований (Дублин, Ирландия).

По теме диссертации опубликовано 26 статей и 15 астрономических телеграмм об открытиях новых источников.

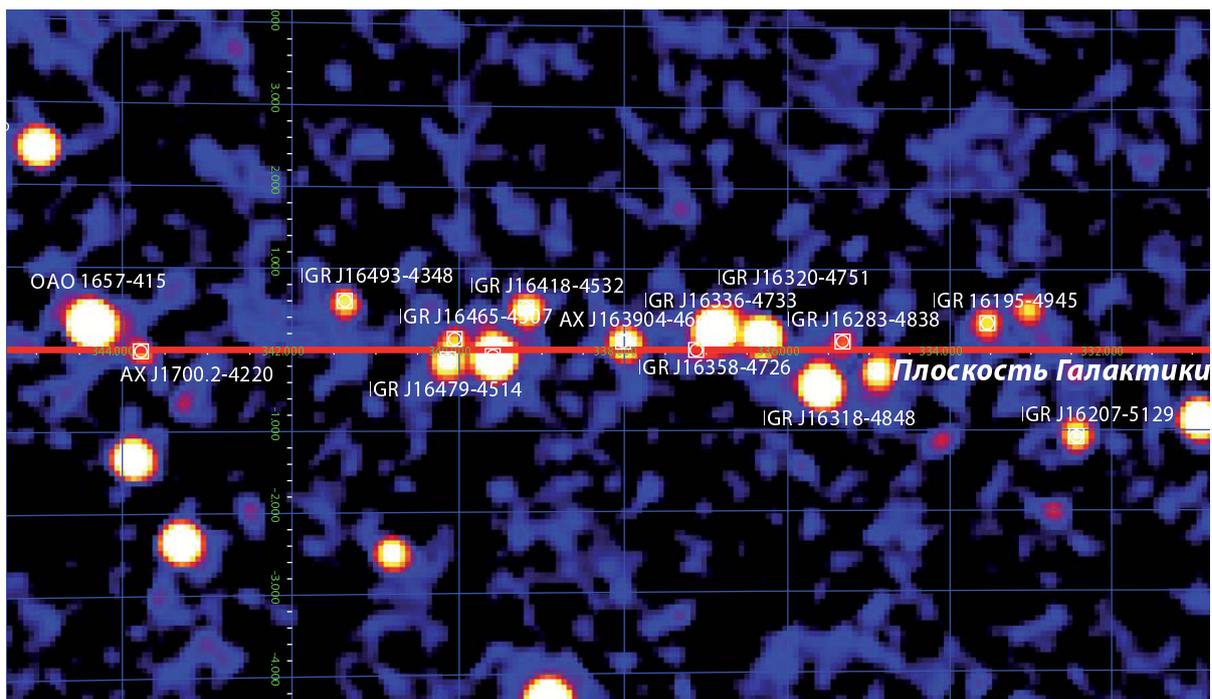


Рис. 1. Изображение Галактической плоскости в направлении спирального рукава Norma, полученное по данным наблюдений обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Подписаны обнаруженные источники.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, одиннадцати глав, объединенных в четыре части и заключения. Диссертация имеет объем 262 страницы, содержит 115 иллюстраций, 19 таблиц. Список литературы содержит 447 наименований.

Первая часть диссертации посвящена результатам глубокого обзора Галактической плоскости обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*, открытию новых источников жесткого рентгеновского излучения, определению природы обнаруженных объектов и поиску среди них массивных рентгеновских двойных систем.

В *первой главе* диссертации представлены результаты многолетних наблюдений Галактической плоскости обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*. Эти наблюдения, выполнявшиеся как в режиме мониторинга плоскости, так и в режиме длительных наведений на Галактический Центр и в направлении спиральных галактических рукавов, позволили открыть несколько десятков новых галактических источников рентгеновского излучения. Причем эти источники, в зависимости от их наблюдательных проявлений, были обнаружены как во время кратковременных

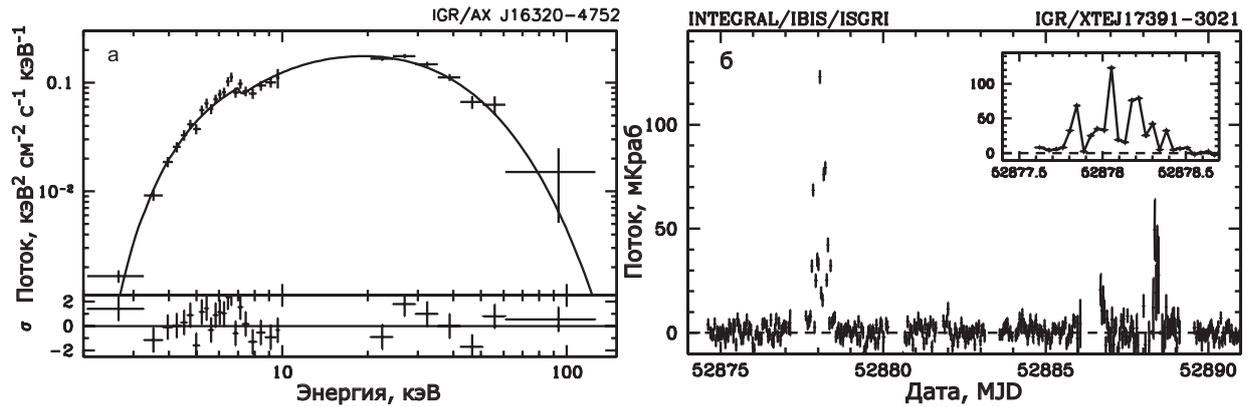


Рис. 2. Широкополосный энергетический спектр нового рентгеновского пульсара IGR J16320-4751, в спектре которого также обнаружено сильное поглощение (а). Характерная кривая блеска источника IGR J17391-3021, относящегося к классу SFXTs, полученная обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* (б). Профиль короткого, мощного всплеска показан на вставке.

сканирующих наблюдений, так и на усредненных за большие промежутки времени картах. Для пояснения технических деталей, связанных с регистрацией источников, определением их координат и потоков, приведены основные характеристики обзора обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Типичная чувствительность этого обзора составляет $\simeq 10^{-11}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий 17-60 кэВ. Это позволяет уверенно регистрировать все источники со светимостями $\gtrsim 10^{35}$ эрг с^{-1} на расстоянии $\lesssim 9$ кпк от Солнца (т.е. приблизительно в половине Галактики) и со светимостями $\gtrsim 5 \times 10^{35}$ эрг с^{-1} на расстоянии $\lesssim 20$ кпк (т.е. во всей Галактике). В качестве примера на рис.1 показана карта участка неба в направлении спирального рукава Norma, полученная по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в диапазоне энергий 17-60 кэВ. Видно большое количество новых объектов (подписаны именами IGRJ...), регистрируемых в этом направлении.

Далее в этой главе приведены результаты временного и спектрального анализа около двух десятков новых источников – определены параметры их спектров, в том числе впервые для нескольких сильнопоглощенных источников; открыты пульсации рентгеновского излучения от нескольких объектов; сделаны заключения или выдвинуты предположения о природе большинства исследованных источников (рис.2).

Вторая глава посвящена результатам программы отождествления жестких рентгеновских источников, зарегистрированных в обзоре

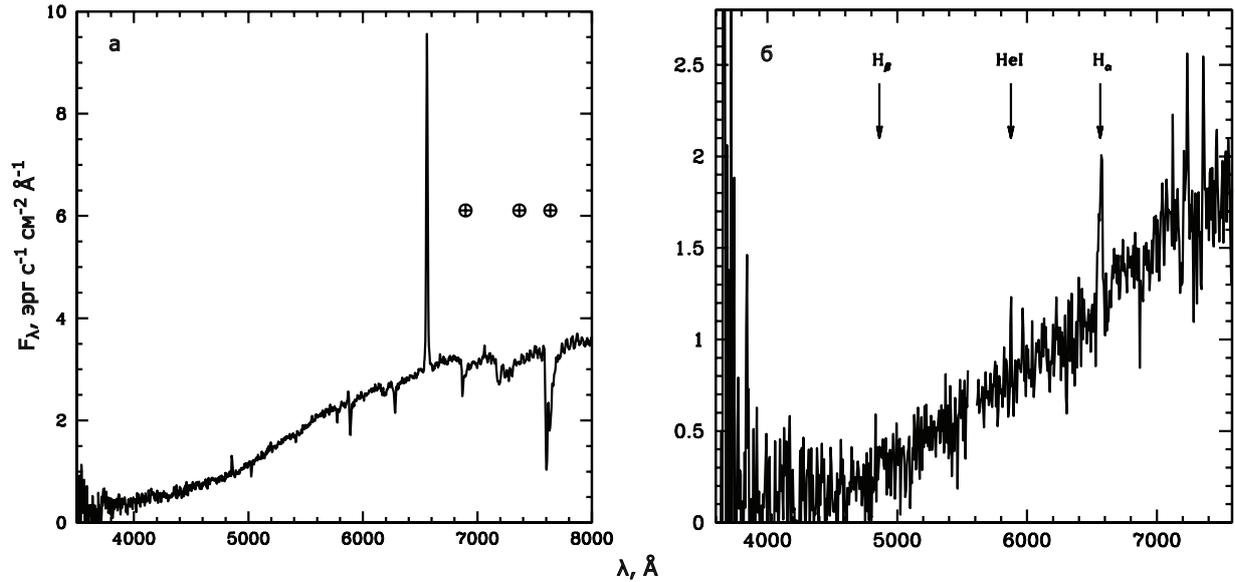


Рис. 3. Оптические спектры источников IGR J22534+6243 (а) и IGR J18151-1052 (б), полученные по данным телескопов *РТТ-150* и *БТА*, соответственно. Подписаны наблюдаемые эмиссионные линии.

обсерваторий *ИНТЕГРАЛ* и *Swift*, проводившейся на телескопах *БТА* (САО РАН), *РТТ-150*, *АЗТ-33ИК* (ИСЗФ СО РАН). Для каждого из девятнадцати источников, наблюдавшихся в рамках этой программы, приведены результаты его локализации в мягком рентгеновском диапазоне по данным обсерваторий *XMM-Newton*, *Chandra* и телескопа *XRT* обсерватории *Swift*, определены спектральные и (в некоторых случаях) временные характеристики рентгеновского излучения, приведены спектры объектов в оптическом диапазоне длин волн, сделаны выводы и определена природа источников. В качестве примера на рис.3 показаны оптические спектры двух источников, открытых обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* вблизи Галактической плоскости, – IGR J22534+6243 и IGR J18151-1052. Результаты наших исследований показали, что первый относится к классу рентгеновских пульсаров в массивных двойных системах с Ве-звездами, второй является галактической двойной рентгеновской системой – либо массивной двойной, либо катаклизмической переменной.

В *третьей главе* рассмотрена методика оценки межзвездного поглощения и закона его изменения в направлении на центр Галактики. Значение поглощения определялось по положению гигантов красного сгущения на диаграмме цвет - видимая величина. Группа красных гигантов, составленная преимущественно из поздних G и ранних K-

гигантов, имеет примерно одинаковое значение светимости и образует сгущение на диаграмме цвет-светимость. Они имеют примерно одинаковую светимость и цвет, их свойства слабо зависят от металличности. Кроме того, большинство таких объектов расположено примерно на одном расстоянии, в балдже Галактики, поэтому может служить своеобразным индикатором поглощения до него. В качестве примера была построена карта поглощения с наилучшим на сегодняшний день разрешением $1'$ в поле размером $30' \times 30'$, расположенном недалеко от центра Галактики, и показано, что поглощение может значительно меняться на масштабах нескольких угловых минут, а закон поглощения в исследуемой области неба существенно отличается от стандартного.

Предложено использовать эту методику оценки межзвездного поглощения для определения или ограничения возможных классов оптических компаньонов рентгеновских источников, в первую очередь, массивных двойных систем, расположенных в направлении на балдж Галактики. На примере двух массивных рентгеновских двойных систем IGR J17391-3021 и IGR J17544-2619 продемонстрировано хорошее согласие получаемых с помощью этой методики результатов с данными спектроскопических измерений.

В *четвертой главе* отработанная выше методика была использована для определения классов более двух десятков рентгеновских объектов, зарегистрированных в обзорах обсерваторий *ИНТЕГРАЛ* и *ASCA* в направлении Галактического Центра в области с координатами $-5 < l < 5^\circ$, $-1 < b < 1^\circ$, и оценки расстояния до них. По результатам проведенных исследований было показано, что пять источников являются массивными рентгеновскими двойными системами, причем среди них обнаружены такие, которые расположены позади центра Галактики на расстояниях 13-18 кпк, по-видимому, в дальних частях спиральных рукавов. Согласно предварительным оценкам, еще несколько источников могут рассматриваться как кандидаты в НМХVs.

Таким образом, в результате глубокого обзора Галактической плоскости обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* и последующих наблюдений в широком диапазоне длин волн было обнаружено более трех десятков новых массивных рентгеновских двойных систем, в том числе относящихся к новым подклассам НМХVs - сильнопоглощенным источникам и быстрым рентгеновским транзиентам в двойных системах со сверхгигантами. Столь

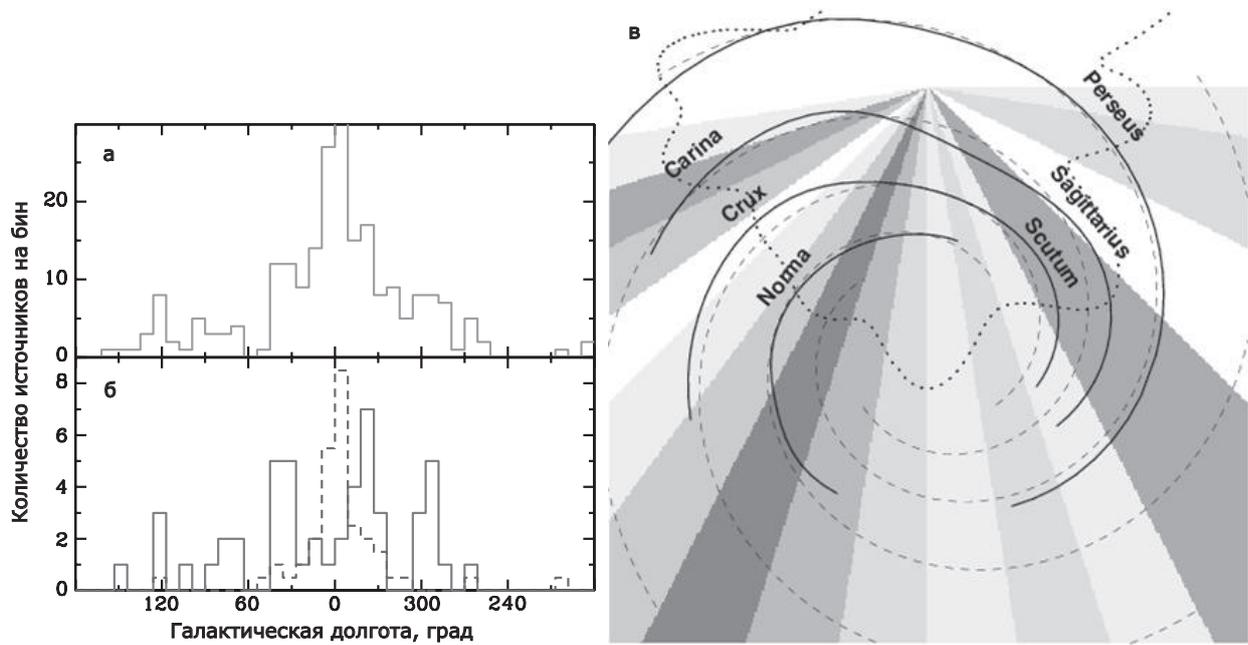


Рис. 4. Распределение всех зарегистрированных вблизи галактической плоскости источников (а), массивных (сплошная гистограмма) и маломассивных (штриховая гистограмма) рентгеновских двойных систем (б) по галактической долготе. Количество LMXBs разделено на 2. Вид Галактики с оси (в). Распределение массивных рентгеновских двойных систем показано масштабированием серого цвета. Пунктирная линия показывает чувствительность проведенных наблюдений для светимости $L_x = 10^{35}$ эрг с $^{-1}$. Подписаны названия спиральных рукавов.

значительное увеличение числа известных НМХВс позволило построить статистически полную выборку таких объектов в Галактике и провести исследование их глобальных свойств.

Во *второй части* диссертации рассматриваются вопросы, связанные с глобальными свойствами популяции массивных рентгеновских двойных систем в Галактике.

В *пятой главе* построено угловое распределение массивных рентгеновских двойных систем, зарегистрированных обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*, по галактической долготе (рис. 4). Показано, что оно значительно отличается от равномерного и от распределения маломассивных двойных систем и имеет максимумы в направлении касательных к спиральным рукавам, тем не менее полностью с ними не совпадает. Выдвинута гипотеза, что наблюдаемое смещение ("отставание") максимумов распределения популяции массивных рентгеновских двойных систем относительно текущего положения спиральных рукавов, скорее всего, связано с

конечным возрастом этих объектов и разными скоростями движения звездной составляющей Галактики и спиральной структуры. За время жизни массивных звезд и звезд средней массы, эволюция которых может привести к образованию НМХВс, спиральные рукава значительно изменили свое положение относительно Солнца, и поэтому текущее положение касательных к ним смещено относительно максимумов плотности распределения массивных рентгеновских двойных систем. Проведенные оценки показали, в частности, что внутренняя часть спирального рукава Norma находилась в положении повышенной плотности НМХВс, наблюдаемой сейчас, приблизительно $\sim 15-20$ млн лет назад.

В *шестой главе*, с использованием результатов поиска и отождествления НМХВс, полученных в первой части диссертации, построена статистически полная и наиболее глубокая по потоку выборка постоянных НМХВс во всей Галактике. Детально описаны критерии отбора источников, включая фильтрацию по типу объекта, регистрируемому от него потоку, а также в соответствии с введенным критерием транзиентности. Показано, что наиболее многочисленной среди постоянных НМХВс является популяция двойных систем, в которых нейтронная звезда аккрецирует вещество из звездного ветра своего компаньона – звезды-сверхгиганта или гиганта.

На основе полученной выборки измерено пространственное распределение массивных рентгеновских двойных систем и определена их функция светимости. Показано, что функция светимости постоянных НМХВс с нейтронными звездами, аккрецирующими из звездного ветра, не может быть описана одним степенным законом в широком диапазоне светимостей ($10^{34} - 10^{37}$ эрг с^{-1}), так как искривляется при светимостях $(0,4 - 2) \times 10^{36}$ эрг с^{-1} , при этом на высоких светимостях наклон дифференциальной функции светимости составляет $\gamma_{\text{bright}} > 2,2$, на низких – $\gamma_{\text{faint}} \approx 1,4$.

Измерена плотность пространственного распределения массивных рентгеновских двойных систем в Галактике в предположении осесимметричного распределения. На рис.5 а она представлена кольцами разного оттенка, более темные цвета соответствуют большей плотности. Пунктирная и штриховая участки окружностей соответствуют расстояниям, до которых регистрируются все источники в координатами

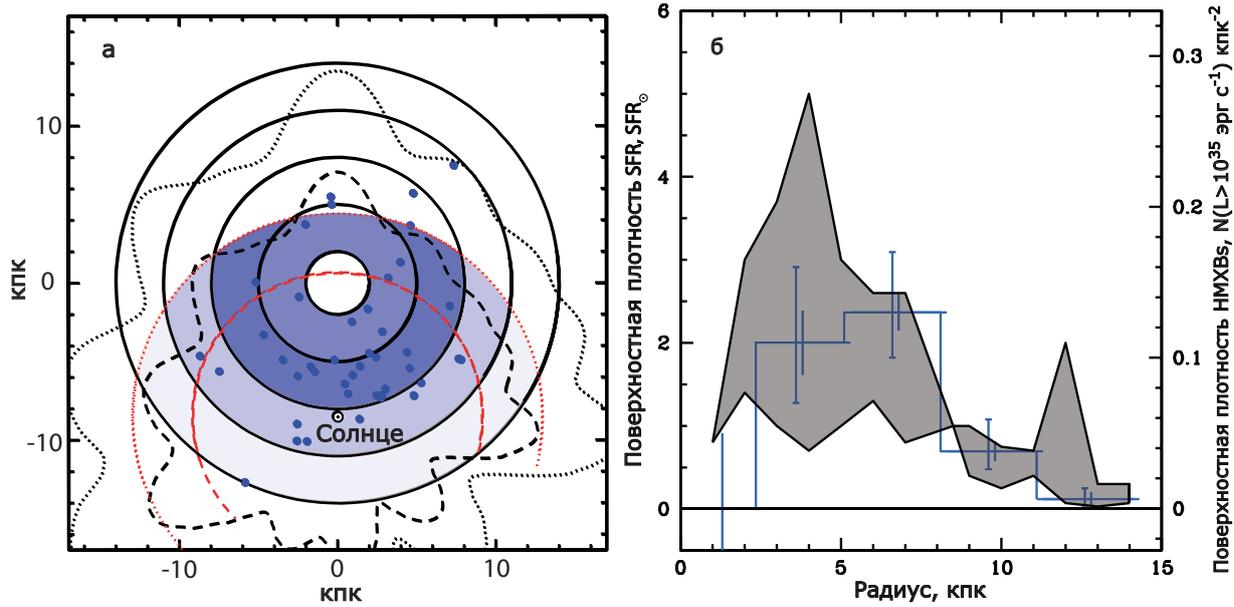


Рис. 5. Распределение поверхностной плотности НМХВс в Галактике (а), вид с оси (более темные цвета колец соответствуют большей плотности). Черная пунктирная и штриховая кривые показывают области Галактики, внутри которых реальная чувствительность обзора обсерватории *ИНТЕГРАЛ* позволяет регистрировать все источники со средними светимостями $> 10^{35.5}$ эрг с^{-1} и $> 10^{35}$ эрг с^{-1} , соответственно. Точками показаны положения НМХВс из нашей выборки. Все расстояния указаны в кпк. Зависимость поверхностных плотностей распределения НМХВс (рисунок б, гистограмма, правая ось ординат) и темпа звездообразования (левая ось ординат) от галактоцентрического расстояния.

$-107 < l < 136^\circ$ и со светимостями $> 10^{35}$ эрг с^{-1} и $> 2 \times 10^{35}$ эрг с^{-1} , соответственно, при чувствительности обзора $\simeq 10^{-11}$ эрг см^{-2} с^{-1} . Хорошо видно, что распределение поверхностной плотности НМХВс в Галактике имеет максимум на галактоцентрических расстояниях 2 – 8 кпк. Сравнение полученных значений поверхностной плотности НМХВс и ее зависимости от галактоцентрического расстояния со значениями поверхностной плотности темпа звездообразования показывает очень хорошую корреляцию между ними $N(\text{НМХВс}, L_x > 10^{35} \text{ эрг } \text{с}^{-1}) / \text{кпк}^2 \approx 5,5 \times 10^{-2} SFR / SFR_\odot$ (рис.5б), где SFR_\odot – поверхностная плотность темпа звездообразования вблизи Солнца.

Определена характерная высота вертикального распределения НМХВс, $h \simeq 90$ пк, которая оказалась несколько меньшей по сравнению с ранее получаемыми величинами; вероятнее всего, это связано с большей полнотой и однородностью нашей выборки. Из сравнения полученной

величины с характерными высотами вертикальных распределений разных популяций молодых звезд получены оценки на кинематический возраст популяции постоянных НМХВс.

С использованием результатов, а также методов и подходов, полученных в ранних работах, предложена модель, которая адекватно описывает глобальные наблюдаемые свойства популяции НМХВс. В частности, функция светимости смоделированной популяции хорошо согласуется с измеренной и предсказывает ее уплощение при низких светимостях. В рамках этой модели рентгеновская светимость нейтронной звезды, аккрецирующей из звездного ветра, может быть выражена как

$$L_x \approx 5,4k \times 10^{35} \left(\frac{M_2}{10 M_\odot} \right)^{2.76} \times \left(\frac{a}{10 R_\odot} \right)^{-2} \left(\frac{v_w [1 - R_2/a]^{1/2}}{1000 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-5},$$

где M_2 , R_2 – масса и радиус оптической звезды, a – расстояние между компонентами двойной системы, v_w – скорость звездного ветра на бесконечности; в коэффициент k ($\sim 1,4 - 1,5$ из наблюдений) включены возможные неопределенности, связанные с использованным в работе подходом. Показано, что на диаграмме $P_{\text{orb}} - L_x$ нейтронные звезды, аккрецирующие из звездного ветра, должны занимать вполне определенную область. Действительно, для заданного орбитального периода P_{orb} (или, другими словами, для заданного расстояния между компонентами в двойной системе) существует минимальная рентгеновская светимость, соответствующая минимальной возможной массе оптического компаньона в НМХВ и, как следствие, минимальному темпу потери массы. Эта нижняя граница должна иметь функциональную форму вида $L_x \propto a^{-2} \propto P_{\text{orb}}^{-4/3}$ для больших орбитальных периодов и фактически делить диаграмму $P_{\text{orb}} - L_x$ на две области – ”разрешенную” для существования аккрецирующих из звездного ветра нейтронных звезд и ”запрещенную” для них (рис.6 а).

На рис.6 а видно, что все известные аккрецирующие из звездного ветра постоянные НМХВс находятся в ”разрешенной” области диаграммы. В то же время все быстрые рентгеновские транзиенты в массивных двойных системах со сверхгигантами в неактивном (выключенном) состоянии находятся в ”запрещенной” области этой диаграммы, и только во время

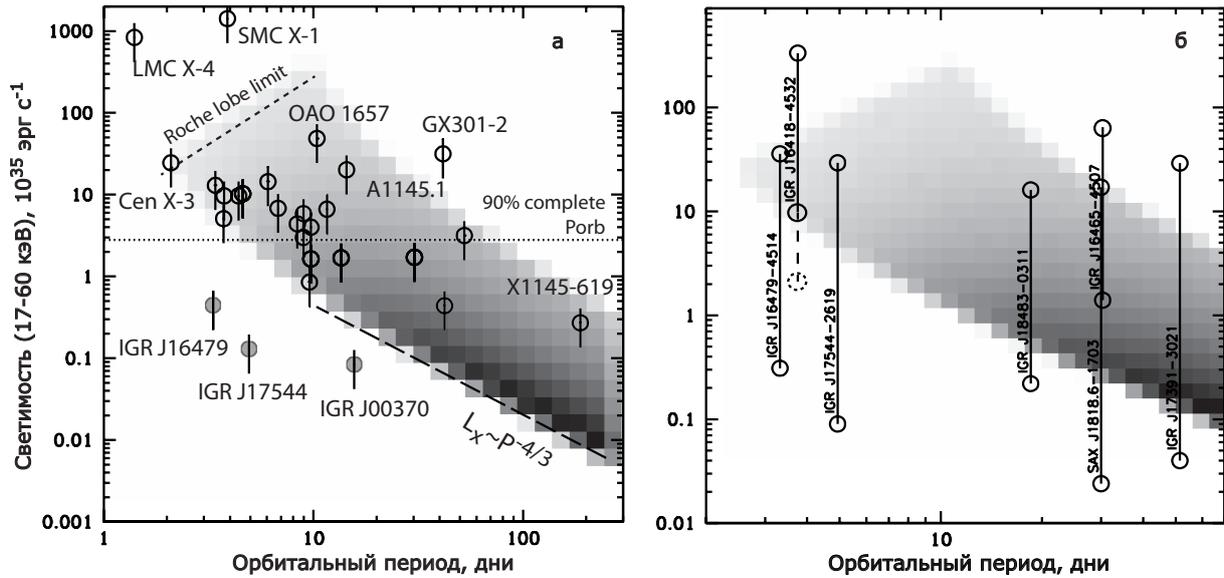


Рис. 6. Плотность источников, получаемых в рамках модели популяции аккрецирующих из ветра НМХВс (серая область), в сравнении в распределением орбитальных периодов и средних рентгеновских светимостей для источников из нашей выборки (открытые кружки) на диаграмме $P_{orb} - L_x$ (а). Штриховая линия соответствует нижней границе "разрешенной" области для аккрецирующих из звездного ветра нейтронных звезд. Положение SFXTs на диаграмме $P_{orb} - L_x$ (б). Для каждого источника показано два значения светимости – медианное и максимальное, измеренное по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ*.

вспышек они перемещаются в "разрешенную" область, становясь обычными НМХВс (рис.6б). Этот результат является важным аргументом в пользу моделей, объясняющих транзитное поведение этих объектов блокировкой (скорее всего, магнитной) аккреции на нейтронную звезду.

С использованием измеренной функции светимости получены оценки числа НМХВс в будущих обзорах и показано, что с увеличением чувствительности относительное количество таких объектов будет значительно уменьшаться по сравнению с количеством регистрируемых активных ядер галактик и катаклизмических переменных.

Третья часть, седьмая глава диссертации, посвящена обсуждению результатов глубокого обзора галактики Большое Магелланово Облако (БМО) обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*. Приведены основные характеристики обзора, предельная чувствительность которого составила $\simeq 6 \times 10^{-12}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ в диапазоне энергий 20-60 кэВ. В этом обзоре было зарегистрировано более 20 источников жесткого рентгеновского излучения, причем почти половину из них составляют новые объекты. На основе полученных данных построена статистически полная выборка массивных

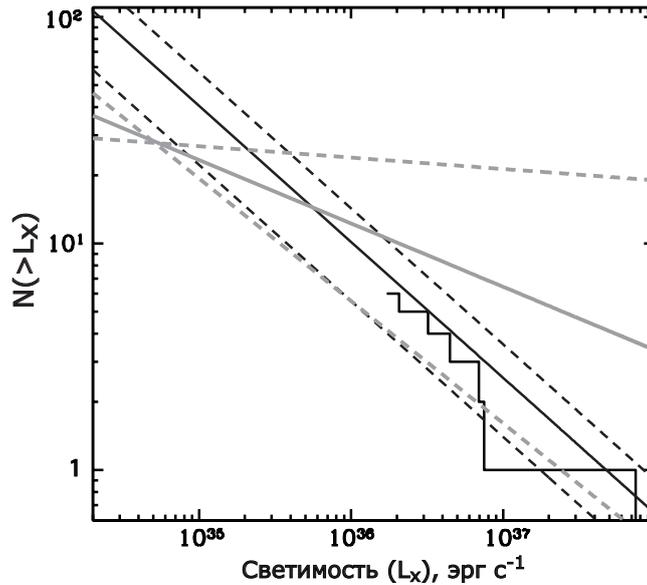


Рис. 7. Кумулятивная функция светимости массивных рентгеновских двойных систем в Большом Магеллановом Облаке по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* (гистограмма). Сплошными линиями показаны результаты измерений функции светимости по данным обсерватории *XMM-Newton* для БМО и большой выборки галактик. Штриховые линии демонстрируют области соответствующих неопределенностей.

рентгеновских двойных систем в галактике БМО и исследована их функция светимости в жестких рентгеновских лучах. В частности, впервые показано, что функция светимости ярких НМХВс ($> 2 \times 10^{36}$ эрг s^{-1}) в БМО в диапазоне энергий 20-60 кэВ может быть аппроксимирована степенным законом с наклоном $\alpha \simeq 1,8$ (рис.7). Последнее согласуется с результатами аналогичных исследований свойств НМХВс как в нашей Галактике, приведенных в первой части диссертации, так и для большой выборки спиральных галактик.

Второй по численности (после НМХВс) популяцией зарегистрированных в этом обзоре источников являются активные ядра галактик. Однако в направлении на БМО их число существенно меньше по сравнению с количеством таких объектов, регистрируемых в других направлениях, в частности, в направлении на источник 3C273. Это, а также избыток ярких объектов на малых красных смещениях в этом направлении свидетельствует об отмечавшейся ранее неоднородности распределения массы в локальной Вселенной, однако позволяет нам сузить характерный масштаб такой асимметрии до нескольких сотен - тысяч квадратных градусов.

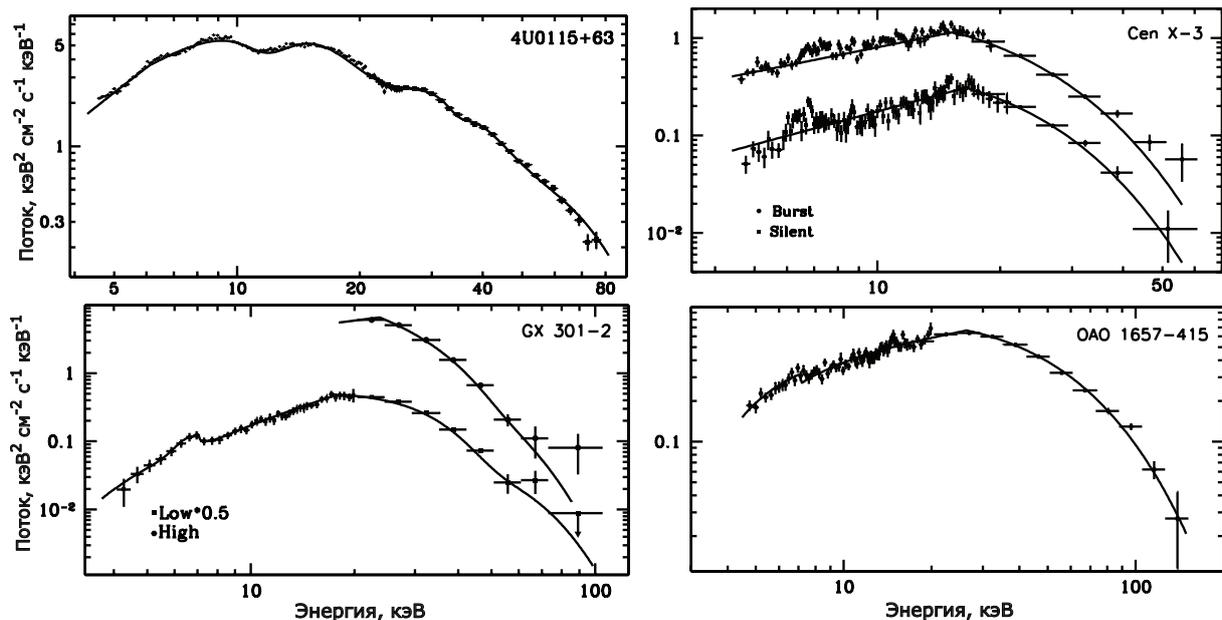


Рис. 8. Пример энергетических спектров излучения рентгеновских пульсаров, полученных по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Сплошные линии – результаты наилучшей аппроксимации спектра выбранной моделью.

В *четвертой части* диссертации на примере аккрецирующих рентгеновских пульсаров, подавляющее большинство из которых входит в состав массивных рентгеновских двойных систем, получены оценки параметров нейтронных звезд в таких системах, размеров излучающих областей и характеристик аккрецируемой материи.

В *восьмой главе* были подробно исследованы временные характеристики жесткого рентгеновского излучения десяти ярких рентгеновских пульсаров, наблюдавшихся обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*. Впервые была исследована зависимость доли пульсирующего излучения (ДПИ) от светимости и энергетического диапазона и показано, что для всех пульсаров ДПИ растет с увеличением энергии; при этом наблюдаемый рост во многих случаях является не монотонным, демонстрируя локальные особенности вблизи гармоник циклотронной линии, что, скорее всего, обусловлено влиянием резонансного поглощения. Получен каталог фазовых кривых блеска и показано, что характерной особенностью большинства двухпиковых профилей импульса является уменьшение относительной интенсивности одного из пиков при увеличении энергии и уменьшении светимости источника. Такое поведение и рост ДПИ с энергией качественно объясняются в рамках геометрической модели. В

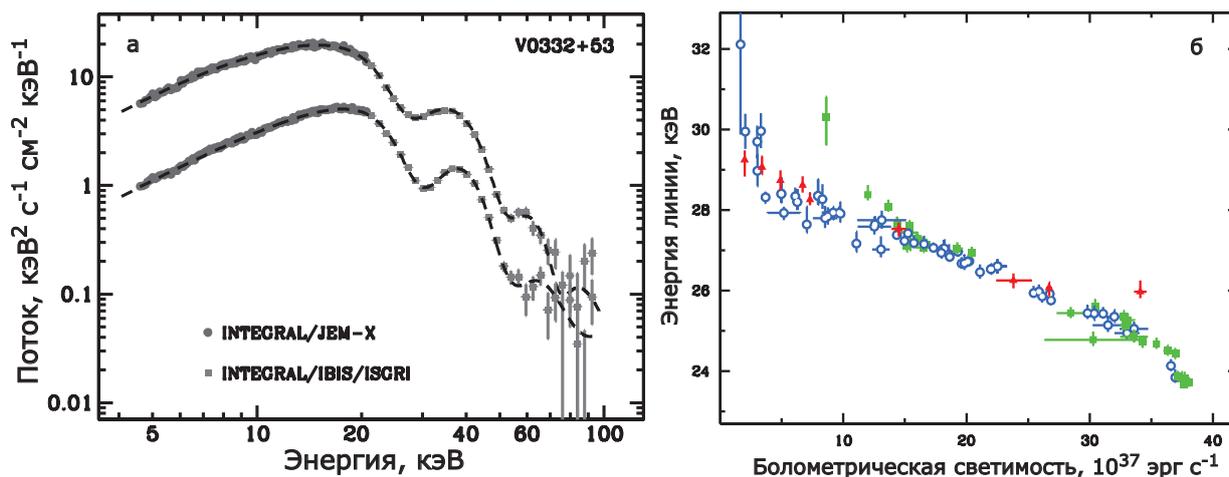


Рис. 9. Энергетические спектры пульсара V0332+53 по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* для двух состояний – $\simeq 35$ и $\simeq 7 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} (а). Зависимость энергии циклотронной линии от светимости источника (б).

этой модели на полюсах нейтронной звезды формируются аккреционные колонки, температура в которых увеличивается к их основанию, а высота зависит от светимости пульсара.

В *девятой и десятой главах*, по результатам исследований спектральных характеристик излучения более сорока рентгеновских пульсаров (т.е. приблизительно 75% от зарегистрированных обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*), создан атлас их спектров (рис.8). На примере источника GX 301-2 показано, что переменность излучения и спектра аккрецирующих из звездного ветра рентгеновских пульсаров может быть связана с неоднородностями звездного ветра, размеры которых могут достигать десяти радиусов Солнца, а электронная плотность почти на два порядка превышать среднюю плотность звездного ветра. Открыто жесткое рентгеновское излучение (вплоть до энергий ~ 160 кэВ) от пульсаров с низкой светимостью, входящих в состав двойных систем с Ве-звездами – X Persei и RX J0440.9+4431. По наблюдению циклотронных линий поглощения в спектрах шести рентгеновских пульсаров измерена напряженность магнитного поля на поверхности нейтронных звезд в этих системах.

В *одиннадцатой главе*, на примере источника V 0332+53 (рентгеновского пульсара в массивной двойной системе с Ве-компаньоном), впервые детально исследована зависимость параметров циклотронной линии поглощения от светимости рентгеновского пульсара и показано,

что ее энергия линейно растет с уменьшением светимости в соответствии с изменением высоты ударной волны в аккреционной колонке. Для иллюстрации на рис.9а показан типичный вид энергетического спектра источника, полученный по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* для светимостей $L_X \simeq 35 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} и $L_X \simeq 7 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} . В обоих спектрах хорошо видны несколько гармоник циклотронной линии поглощения, а также смещение энергии фундаментальной гармоники со светимостью. Более детально этот эффект продемонстрирован на рис.9б, где показано изменение энергии этой гармоники в течение вспышки в зависимости от светимости пульсара.

Относительное изменение энергии центра линии составляет около 25%, что в приближении дипольной формы магнитного поля нейтронной звезды соответствует относительному изменению высоты формирования этой особенности $h \simeq 750$ м. В спектре источника, помимо фундаментальной, регистрируются первая и вторая гармоники циклотронной линии. Впервые показано, что поведение энергии первой гармоники со светимостью качественно совпадает с поведением фундаментальной. Обнаружены значительные изменения фазовых кривых блеска источника со светимостью и энергией, особенно вблизи фундаментальной гармоники циклотронной линии поглощения. Обсуждаются возможные физические механизмы, которые могут объяснить наблюдаемые изменения.

В *Заключении* приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Основные положения, выносимые на защиту

1. По данным наблюдений обсерватории *ИНТЕГРАЛ* построена статистически полная и наиболее глубокая по потоку на данный момент выборка массивных рентгеновских двойных систем (НМХВс) в Галактике. На основе построенной выборки исследованы их пространственное распределение и функция светимости.

2. Измерена плотность пространственного распределения массивных рентгеновских двойных систем в Галактике. Показано, что она имеет максимум на галактоцентрических расстояниях 2 – 8 кпк и коррелирует с распределением поверхностной плотности темпа звездообразования в Галактике.

3. Показано, что максимумы распределения массивных рентгеновских двойных систем по галактической долготе смещены относительно положения спиральных галактических рукавов; выдвинута гипотеза, что наблюдаемое смещение, скорее всего, связано с конечным возрастом массивных рентгеновских двойных систем и разными скоростями движения звездной составляющей Галактики и спиральной структуры.

4. В рамках программы отождествления жестких рентгеновских источников и поиска массивных рентгеновских двойных систем проведены оптические и инфракрасные исследования более сорока объектов, установлена природа более двадцати источников, семь из которых являются массивными рентгеновскими двойными системами или кандидатами в такие объекты. Определены расстояния до нескольких НМХВс, в том числе находящихся позади Галактического центра на расстояниях 13-18 кпк.

5. По результатам глубокого обзора галактики Большое Магелланово Облако построена статистически полная выборка массивных рентгеновских двойных систем в этой галактике, что позволило впервые исследовать ее функцию светимости в жестких рентгеновских лучах и сравнить с результатами аналогичных исследований свойств НМХВс как в нашей Галактике, так и для большой выборки спиральных галактик.

6. Предложена модель, позволяющая объяснить наблюдаемые свойства постоянных массивных рентгеновских двойных систем с нейтронными звездами, аккрецирующими из звездного ветра: распределение по светимостям (функцию светимости) и орбитальным периодам.

7. На основе предложенной модели показано, что свойства популяций постоянных массивных рентгеновских двойных систем и быстрых рентгеновских транзиентов в двойных системах со сверхгигантами (SFXTs) зависят от их положения на диаграмме "орбитальный период - светимость", а наблюдательные проявления SFXTs связаны с блокировкой (скорее всего, магнитным полем) аккреции на нейтронную звезду.

8. Созданы атласы спектров и фазовых кривых блеска около сорока рентгеновских пульсаров, входящих в состав массивных рентгеновских двойных систем, открыто жесткое рентгеновское излучение (вплоть до энергий ~ 160 кэВ) от пульсаров с низкой светимостью; измерена напряженность магнитного поля вблизи поверхности нейтронных звезд.

Впервые детально исследована зависимость параметров циклотронной линии поглощения от светимости пульсара, получены оценки размера излучающей области; предложено объяснение наблюдаемых эффектов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Лутовинов А.А., Миронов А.И., Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г., Цыганков С.С., Павлинский М.Н., Коробцев И.В., Еселевич М.В. Отождествление четырех рентгеновских источников из каталогов обсерваторий *ИНТЕГРАЛ* и *Swift* // Письма в *Астрономический журнал*. 2013. Т.39. С.580.
2. Карасев Д.И., Лутовинов А.А., Ревнивцев М.Г., Кривонос Р.А. Точная локализация и отождествление шести жестких рентгеновских источников по данным обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton* // Письма в *Астрономический журнал*. 2012. Т.38. С.704.
3. Лутовинов А.А., Гребенев С.А., Цыганков С.С. Функция светимости массивных рентгеновских двойных систем и анизотропия распределения активных ядер галактик в направлении Большого Магелланова Облака // Письма в *Астрономический журнал*. 2012. Т.38. С.557.
4. Лутовинов А.А., Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г., Сазонов С.Ю., Шолухова О.Н., Валеев А.Ф. Оптическое отождествление четырех жестких рентгеновских источников из обзора всего неба обсерваторией *Swift* // Письма в *Астрономический журнал*. 2012. Т.38. С.323.
5. Лутовинов А.А., Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г., Бикмаев И.Ф., Оптическое отождествление шести жестких рентгеновских источников из обзоров всего неба обсерваториями *ИНТЕГРАЛ* и *Swift* // Письма в *Астрономический журнал*. 2012. Т.38. С.3.
6. Карасев Д.И., Ревнивцев М.Г., Лутовинов А.А., Буренин Р.А. Исследование звездного населения и межзвездного поглощения в направлении на область сверхглубокого обзора *Chandra* по данным *PTT-150* // Письма в *Астрономический журнал*. 2010. Т.36. С.832.

7. Лутовинов А.А., Цыганков С.С. Временные характеристики жесткого рентгеновского излучения ярких рентгеновских пульсаров по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* // Письма в *Астрономический журнал*. 2009. Т.35. С.483.
8. Филиппова Е.В., Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Сюняев Р.А. Жесткие спектры рентгеновских пульсаров по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* // Письма в *Астрономический журнал*. 2005. Т.31. С.819.
9. Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Гребенев С.А., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А. Наблюдения рентгеновского пульсара GX 301-2 телескопом *АРТ-II* обсерватории *ГРАНАТ* // Письма в *Астрономический журнал*. 2004. Т.30. С.596.
10. Лутовинов А.А., Ревнивцев М.Г. Наблюдения транзиентных источников IGR J17091-3624 и IGR J18539+0727 обсерваторией *RXTE* // Письма в *Астрономический журнал*. 2003. Т.29. С.810.
11. Lutovinov A.A., Revnivtsev M.G., Tsygankov S.S., Krivonos R.A. Population of persistent high-mass X-ray binaries in the Milky Way // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013. V.431. P.327.
12. Grebenev S.A., Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Mereminskiy I.A. Deep hard X-ray survey of the Large Magellanic Cloud // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013. V.428. P.50.
13. Lutovinov A., Tsygankov S., Chernyakova M. Strong outburst activity of the X-ray pulsar X Persei during 2001-2011 // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. V.423. P.1978.
14. Tsygankov S.S., Krivonos R.A., Lutovinov A.A. Broad-band observations of the Be/X-ray binary pulsar RX J0440.9+4431: discovery of a cyclotron absorption line // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. V.421. P.2407.
15. Karasev D.I., Lutovinov A.A., Burenin R.A. AX J1749.1-2733 and AX J1749.2-2725 – the close pair of X-ray pulsars behind the Galactic Centre:

an optical identification // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2010. V.409. L69.

16. Tsygankov S.S., Lutovinov A.A., Serber A.V. Completing the puzzle of the 2004-2005 outburst in V 0332+53: the brightening phase included // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2010. V.401. P.1628.

17. Lutovinov A., Tsygankov S. Survey of X-ray pulsars in hard X-rays // Proceedings of the Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV. 2009. P.10.

18. Revnivtsev M., Lutovinov A., Churazov E., Sazonov S., Gilfanov M., Grebenev S., Sunyaev R. Low-mass X-ray binaries in the bulge of the Milky Way // Astron.Astroph. 2008. V.491. P.209.

19. Lutovinov A., Tsygankov S. X-ray pulsars through the eyes of *INTEGRAL*// AIPC. 2008. V.1054. P.191.

20. Karasev D.I., Tsygankov S.S., Lutovinov A.A, Discovery of X-ray pulsations from the HMXB source AX J1749.1-2733 // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2008. V.386. L10.

21. Lutovinov A.A., Revnivtsev M.G., Gilfanov M.R., Sunyaev R.A. Population of HMXB in the Galaxy // The Obscured Universe. Proceedings of the VI INTEGRAL Workshop. 2007. ESA SP-622. P.241.

22. Tsygankov S.S., Lutovinov A.A., Churazov E.M., Sunyaev R.A. V 0332+53 in the outburst of 2004-2005: luminosity dependence of the cyclotron line and pulse profile // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2006. V.371. P.19.

23. Chernyakova M., Lutovinov A., Rodriguez J., Revnivtsev M. Discovery and study of the accreting pulsar 2RXP J130159.6-635806 // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2005. V.364. P.455.

24. Lutovinov A., Revnivtsev M., Gilfanov M., Shtykovskiy P., Molkov S., Sunyaev R. INTEGRAL insight into the inner parts of the Galaxy. High mass X-ray binaries // Astron.Astroph. 2005. V.444. P.821.

25. Lutovinov A., Rodriguez J., Revnivitsev M., Shtykovskiy P. Discovery of X-ray pulsations from IGR J16320-4751 = AX J1631.9-4752 // *Astron.Astroph.* 2005. V.433. L41.
26. Lutovinov A., Revnivitsev M., Molkov S., Sunyaev R. *INTEGRAL* observations of five sources in the Galactic Center region // *Astron.Astroph.* 2005. V.430. P.997.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная 84/32

Подписано к печати 15.11.2013

Заказ 3324

Формат $70 \times 108^{1/32}$

Тираж 100

1,2 уч.-изд.л.