

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

на правах рукописи

Мереминский Илья Александрович

Мониторинг неба в рентгеновском диапазоне энергий
обсерваторией INTEGRAL: обзоры большой площади и
транзиентные источники

01.03.02 Астрофизика, звездная астрономия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н. Гребенев С.А.

Москва, 2017

Хочу выразить глубокую благодарность моему научному руководителю, Сергею Андреевичу Гребеневу, за его терпение и поддержку в работе.

Данная диссертация является результатом работы в отделе Астрофизики Высоких Энергий ИКИ РАН и, безусловно, была бы не полной без участия многих сотрудников отдела, в первую очередь Романа Александровича Кривоноса, Александра Анатольевича Лутовинова, Сергея Юрьевича Сазонова. Большое влияние на мою работу оказали также Рашид Алиевич Сюняев, Евгений Михайлович Чуразов, Михаил Николаевич Павлинский и Михаил Геннадьевич Ревнивцев, за что им огромное спасибо.

Спасибо моим родителям, моей семье и Марине за все то, что они для меня сделали и продолжают делать.

Оглавление

1	Введение	4
1.1	Рентгеновская астрономия	4
1.2	Основные цели работы	8
2	Рентгеновские обсерватории	10
2.1	Международная обсерватория ИНТЕГРАЛ	10
2.2	Обсерватория Swift	11
3	Обзоры неба	13
3.1	Обзор области Галактического центра телескопом JEM-X	13
3.1.1	Отбор и обработка данных	14
3.1.2	Результаты обзора и каталог источников	16
3.1.3	Распределение источников в Галактике	21
3.1.4	Функция светимости LMXB	23
3.1.5	Заключение	31
3.2	Глубокий обзор трех внегалактических площадок	36
3.2.1	Отбор и обработка данных	37
3.2.2	Результаты обзора	38
3.2.3	Идентификация новых источников	42
3.2.4	Каталог источников	44
3.2.5	Заключение	50
3.3	Обзор Галактической плоскости	59
4	Транзиентные источники	63
4.1	“Провалившаяся” вспышка рентгеновской новой GRS 1739-278	63
4.1.1	Введение	63
4.1.2	Наблюдения	65
4.1.3	Результаты	67
4.2	IGR J17445-2747 - еще один барстер в Галактическом балдже	74
4.2.1	Профиль всплеска и его локализация	75
4.2.2	Уточнение локализации по данным телескопа Swift-XRT	77
4.2.3	Спектр всплеска и расстояние до источника	79
4.2.4	Заключение	80

Глава 1

Введение

1.1 Рентгеновская астрономия

Рентгеновская астрономия - сравнительно молодая отрасль астрономии, в отличии от оптической или даже радиоастрономии. Причина этого достаточно проста - атмосфера Земли совершенно непрозрачна для рентгеновских фотонов с энергиями в 0.1–100 кэВ. При нормальных условиях 99% жестких рентгеновских фотонов (с энергией 100 кэВ) поглотится на первых 30 см пути. Именно это обстоятельство и отложило начало рентгеновской астрономии до момента, пока человечество не научилось выходить в открытый космос - хотя бы ненадолго.

Быстрое развитие ракетной техники в СССР и США в 1940-х годах привело к тому, что уже в 1945-46 году были осуществлены первые запуски “метеорологических” ракет (по факту - немного измененных баллистических) с научной аппаратурой на борту. Так, в 1946 году группа ученых США сумела получить изображение Солнца в рентгеновских лучах, использовав для этого камеру-обскуру, объективное отверстие которой было закрыто тонкой алюминиевой фольгой чтобы отсесть видимый свет. В качестве детектора была использована специальная рентгеновская фотоэмульсия. Это открытие блестяще подтвердило предположение Альфвена, высказанное им в 1941 году, о том, что температура Солнечной короны достигает 1 МК и, следовательно, она должна излучать рентгеновские и УФ-фотоны. Несмотря на этот успех, до начала эры рентгеновской астрономии прошло долгих 16 лет. Связано это было с тем, что если рассчитать, какой поток рентгеновского излучения ожидается от корон ближайших к Земле звезд становится ясно - используя эксперименты на ракетах увидеть их невозможно. Эти рассуждения значительно остудили пыл исследователей.

В 1962 году группа ученых под руководством Р. Джиаконни (Джиаконни и др., 1962) решила предпринять попытку зарегистрировать рентгеновское излучение от Луны. Луна в данном эксперименте, играла роль мишени, сталкиваясь с которой солнечные рентгеновские лучи должны были рождать флуоресцентные рентгеновские фотоны. Для этого эксперимента на метеорологическую (теперь уже безо всяких кавычек) ракету Аеробее были установлены три детектора, основанные на счетчиках Гейгера

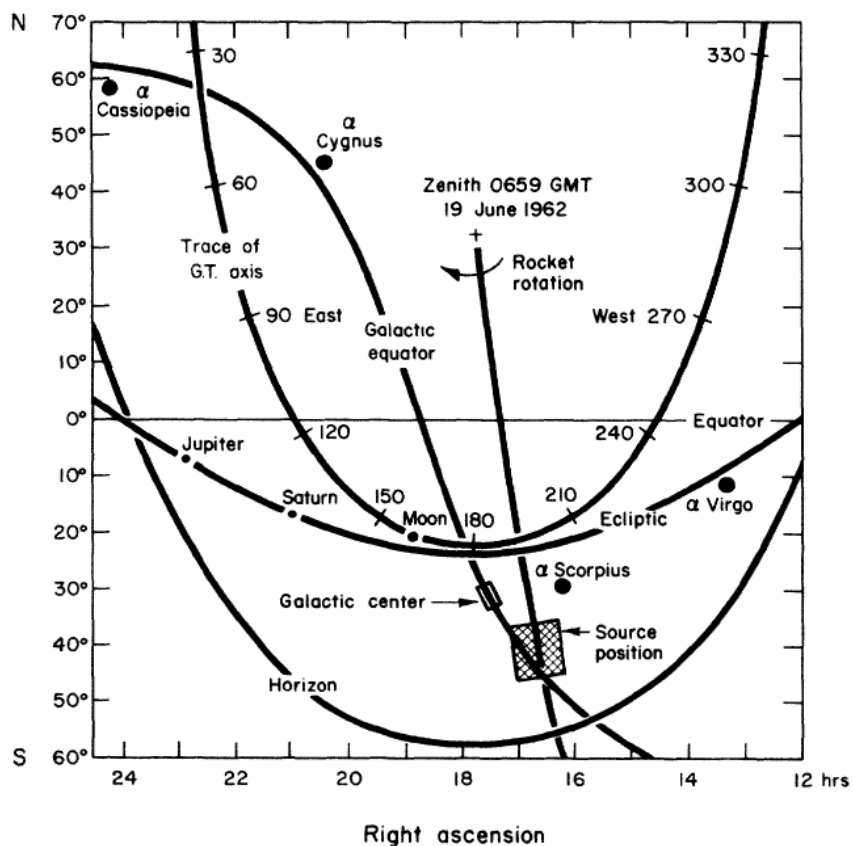


Рис. 1.1. Локализация Sco X-1, первого рентгеновского источника вне Солнечной системы, из работы Джиаконни и др. (1962).

эффективной площадью около 20 см^2 и оснащенные системой антисовпадения и тонкими слюдяными входными окнами. Ракета закручивалась вокруг своей оси, так что поле зрения каждого детектора (около 100 кв.градусов) прочерчивало замкнутые полосы на небесной сфере. Результаты эксперимента оказались противоречивыми - с одной стороны рентгеновского излучения от Луны обнаружено не было. С другой стороны, были совершены два открытия, важность которых сложно переоценить: во-первых, был обнаружен первый источник рентгеновских лучей, расположенный вне солнечной системы, в направлении на созвездие Скорпиона (см. карту локализации источника на Рис. 1.1). Во-вторых, был обнаружен изотропный рентгеновский фон, рождающийся вне атмосферы Земли. Каким образом рождаются рентгеновские лучи в наблюдающемся источнике, названном Скорпион X-1, и откуда берется изотропный фон - вот первые вопросы, поставленные перед рентгеновской астрономией. Хотя общее понимание этих вопросов уже давно достигнуто, некоторые подробности остаются невыясненными и по сей день.

В 1964 году группа ученых из исследовательской лаборатории морского Флота США обнаружили еще один яркий рентгеновский источник, который был отождествлен ими

с Крабовидной туманностью (Фридман, 1964). Докладывая о успехах своей группы Фридман (1964) высказывает предположение о том, что возможными источниками такого мощного рентгеновского излучения являются нейтронные звезды, предсказанные Бааде и Цвики (1934). Для этого исследования использовались детекторы, поле зрения которых было ограничено сотовыми шестигранными коллиматорами, что позволило улучшить угловое разрешение.

В последовавшие годы новая область переживала самый настоящий бум - на метеорологических ракетах и высотных аэростатах один за другим запускались рентгеновские телескопы, открывались и отождествлялись новые источники. Большим прорывом стал запуск обсерватории Uhuru в 1970 году, которая провела первый обзор всего неба в рентгеновском диапазоне (2–20 кэВ) с высокой чувствительностью (около 1 мКраб). Результатом трехлетней работы обсерватории стал каталог из 339 зарегистрированных источников (Форман и др., 1978). Эти измерения впервые продемонстрировали, что рентгеновское небо отнюдь не “пустое” и ненаселенное. Кроме того, было обнаружено что многие из источников его населяющих - сильнопеременные (транзиентные), с отношением потока во вспышке к потоку в низком состоянии более 100. Кроме галактических источников, в каталог вошли также Сейфертовские галактики и скопления галактик.

Подобные обзоры неба также выполнялись и на других обсерваториях (например Ariel V), однако сама методика - использование коллиматоров или камер-обскур (которые впервые было получено прямое изображение рентгеновского неба (Холт, 1976)) ограничивало чувствительность и угловое разрешение обзоров. Большой размер области локализации, в свою очередь, приводил к сложности (или невозможности, в случае плотных звездных полей) идентификации рентгеновского источника с оптическими или радио-объектами. Если в некоторых случаях знания координат с точностью до нескольких минут дуги было достаточно - как например в случаях с Крабовидной туманностью, яркими скоплениями галактик или самыми “громкими” в радиодиапазоне АЯГ - то для большинства галактических двойных систем требовалось существенное уменьшение “кругов ошибок”. К тому же, эксперименты с коллиматорами плохо подходили для исследования плотных скоплений рентгеновских источников, например в балдже Млечного пути.

Для решения этих задач были предложены сразу несколько подходов. Первый - использование вращающихся модулирующих коллиматоров (Rotating Modulation Collimator - RMC). Эта схема, предложенная Ода в 1965 (Ода, 1965) году оказалась довольно удачной, поскольку не требовала сложных позиционно-чувствительных детекторов и естественным образом использовала вращение спутников, использовавшиеся для их стабилизации. Она позволяла определять положения ярких источников с точностью до нескольких десятков секунд дуги (в 5..10 раз точнее, чем схемы с обычными коллиматорами), восстанавливая изображение источника по зависимости темпа счета от времени (т.е. угла между направлением на источник и выделенной осью коллиматора). На Рис. 1.2 представлены восстановленные изображения ярких источников Галактического балджа, полученные в 1970 году с помощью RMC-телескопа на метео-

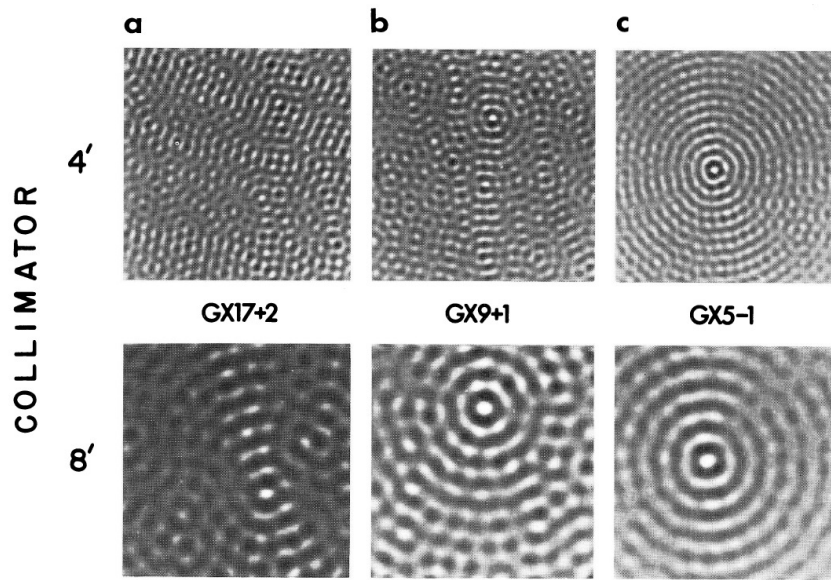


Рис. 1.2. Изображения ярких рентгеновских источников в Галактической плоскости полученные методом вращающихся модулирующих коллиматоров. Характерная точность локализации составляет $1.5'$ (Шоппер и др., 1970).

рологической ракете (Шоппер и др., 1970). Подобные инструменты использовались на обсерваториях ANS, Ariel V в 1970 годы. Последней обсерваторией, оснащенной подобными инструментами, была обсерватория ГРАНАТ, запущенная в 1989 г., где они использовались в качестве широкопольных мониторов неба.

Альтернативой этой методике стали телескопы с кодирующей апертурой. Предложенные еще в начале 60-х годов (Мерц и Янг, 1961) эти телескопы состоят из позиционно-чувствительного детектора и кодирующей маски, разделенных небольшим расстоянием. Маска частично прозрачна для падающего излучения. Принцип действия таких телескопов довольно прост: поток параллельных лучей от удаленного точечного источника проецирует теневое изображение маски на детектор (см Рис. 1.3), распределение яркости по поверхности детектора записывается. Затем, по распределению интенсивностей на детекторе восстанавливается положение источника на небесной сфере. Интересной математической задачей является оптимизация рисунка маски для получения одновременно наилучшего отклика телескопа на точечный источник и высокой чувствительности (см. например обзор Кароли и др., 1987).

Наконец, третьей возможностью стало использование зеркальной оптики. В отличие от видимого света, рентгеновские фотоны при нормальном падении на вещество - стекло или металл - поглощаются, а не отражаются, поэтому оптические системы построенные по подобию оптических телескопов в рентгеновском диапазоне не работают. Однако, было выяснено, что при падении на металлические поверхности под малыми углами рентгеновские лучи отражаются. Уже в 1952 году Вольтером (Вольтер, 1952) были предложены три схемы для постройки рентгеновского телескопа с зеркалами ко-

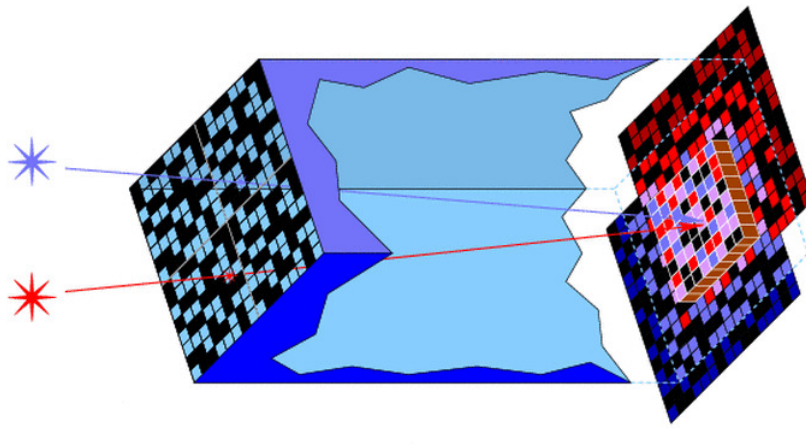


Рис. 1.3. Принципиальная схема работы телескопа с кодирующей апертурой. Авторство: ESA.

сого падения. Работы над реализацией такого инструмента начались в 60-х годах и уже в 1978 году была запущена космическая обсерватория им. Эйнштейна. Ей были проведены обзоры нескольких площадок на небе с беспрецедентной чувствительностью в мягком диапазоне - например были обнаружены популяции рентгеновских двойных в M31 и Магеллановых облаках. В последующие годы, еще одним телескопом с рентгеновскими зеркалами - ROSAT - был проведен обзор всего неба. Однако изготовление рентгеновского зеркала для работы на энергиях выше 10 кэВ оказалось сложной технологической задачей, остававшейся нерешенной до 2012 года, когда был запущен NuSTAR - телескоп с зеркальной системой типа Вольтер-I, работающий в диапазоне 3–79 кэВ.

Таким образом, в течении долгого времени единственным способом изучать небо в жестком (> 10 кэВ) рентгеновском диапазоне были телескопы с кодирующими апертурами. Именно в этом диапазоне работали (и работают) крупнейшие подобные инструменты - SIGMA/ГРАНАТ, IBIS/INTEGRAL и Swift-BAT. Кроме того, типичное для таких телескопов широкое поле зрения (более 100 кв. град., для сравнения поле зрения типичного телескопа с зеркалами косоугольного падения имеет размер $\lesssim 1^\circ$) и угловое разрешение $\approx 15'$ позволило использовать их для мониторинга неба и поиска транзиентов.

1.2 Основные цели работы

Основными целями работы являлось исследование по архивным данным обсерватории INTEGRAL популяций рентгеновских источников, населяющих выбранные небесные площадки, поиск новых или известных по наблюдениям в других диапазонах источников и их отождествление. Кроме того, проводилось изучение интересных рентгенов-

ских транзиентов, обнаруженных в ходе регулярного мониторинга неба обсерваторией INTEGRAL.

Глубокие обзоры обсерватории INTEGRAL интересны в первую очередь тем, что позволяют исследовать свойства популяций рентгеновских источников как в нашей Галактике, так и за её пределами. В частности, большая экспозиция, накопленная в области Галактической плоскости позволила утроить число известных массивных двойных систем с оптическими компаньонами-супергигантами (Уолтер и др., 2015) и выделить среди них новый класс сильнопеременных систем (т.н. SFXT - быстрые рентгеновские транзиенты с супергигантом, см. обзор Гребенев (2010)), впервые измерить функцию светимости в жестком рентгеновском диапазоне для катаклизмических переменных (Ревнивцев и др., 2008) и маломассивных рентгеновских двойных (Ревнивцев и др., 2008). Эти, и многие другие, результаты базировались в основном на данных телескопа IBIS. В тоже время, данные еще одного телескопа - JEM-X практически не использовались. В части 3.1 представлены результаты обзора области Галактического центра выполненной по данным JEM-X в диапазонах 5–10 и 10–25 кэВ. Основной мотивацией проведения обзора было исследование популяции маломассивных рентгеновских двойных систем (low-mass X-ray binaries - LMXB), населяющих область Галактического балджа. Благодаря высокой чувствительности обзора получилось измерить функцию светимости LMXB до светимостей $\approx 10^{35}$ эрг с^{-1} в диапазоне 5 – 10 кэВ отдельно для постоянных и транзиентных источников.

Другой интересный класс объектов, изучение которых представляет значительный интерес это активные ядра галактик (АЯГ), особенно сильнопоглощенные. Обсерватории INTEGRAL и Swift работают в более подходящем для поиска этих объектов диапазоне, чем большинство телескопов с зеркалами косоугольного падения (Сазонов, Чуразов и Кривонос, 2015). Кроме того, поскольку обзоры этих обсерваторий покрывают значительные площади удается измерять неоднородность в пространственном распределении ярких АЯГ в локальной Вселенной (Кривонос и др., 2007). Поиску новых слабых АЯГ в глубоких полях наблюдавшихся телескопом IBIS обсерватории INTEGRAL посвящена часть 3.2. Кроме того, некоторое количество кандидатов в АЯГ удалось найти в обзоре Галактической плоскости (см. часть 3.3).

Важной задачей является также мониторинг рентгеновского неба. По данным наблюдений обсерватории INTEGRAL в 2016 году была обнаружена начало новой вспышки от рентгеновской новой GRS 1739-278. В отличие от предыдущих вспышек этого источника, вспышка 2016 года оказалась “проваленной”, однако был получен набор спектральных данных, представленный в части 4.1 и характеризующий поведение источника в низком жестком состоянии. В 2017 году был зарегистрирован первый рентгеновский всплеск первого типа от известного, но неидентифицированного источника IGR J17445-2747. Это позволило установить природу компактного объекта и получить ограничение на расстояние до него. Более подробно результаты изложены в части 4.2.

Глава 2

Рентгеновские обсерватории

Как уже было сказано, исследование рентгеновских источников с поверхности Земли невозможно, поэтому абсолютное большинство рентгеновских телескопов размещено в космосе, на околоземной орбите. Все прочие приборы поднимаются на аэростатах в верхние слои атмосферы, остаточная толща воздуха над которыми еще прозрачна для жестких рентгеновских квантов.

В этом разделе будут описаны основные обсерватории, данные которых использовались в данной работе, поскольку понимание специфики устройства и принципов функционирования каждого конкретного инструмента является обязательным условием получения хороших результатов.

2.1 Международная обсерватория ИНТЕГРАЛ

ИНТЕГРАЛ - INTEGRAL (The INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, Международная астрофизическая обсерватория гамма-лучей) (Винклер и др., 2003) - это уникальный научный комплекс, разработанный Европейским космическим агентством при участии России, США, Чехии и Польши. Он был запущен в 2002 году с космодрома Байконур на сильно вытянутую геосинхронную орбиту, что позволило довести долю наблюдательного времени до почти 90%. Основные инструменты обсерватории - спектрометр SPI и широкоугольный рентгеновский телескоп IBIS предназначены для выполнения главных задач проекта - прецизионной гамма-спектрометрии и получения изображений неба в жестких рентгеновских лучах с хорошим угловым разрешением. Оба этих прибора работают по принципу кодирующей апертуры, за счет чего обеспечивается широкое поле зрения - полное поле зрения с нулевым откликом составляет $35^\circ \times 35^\circ$ и $28^\circ \times 28^\circ$ для SPI и IBIS, соответственно. Два дополнительных инструмента обсерватории - оптический (ОМС) и рентгеновский (JEM-X) мониторы гораздо компактнее и имеют меньшие поля зрения - квадратное поле $5^\circ \times 5^\circ$ и круглое диаметром 13.2° , соответственно. В данной работе использовались только данные рентгеновских телескопов IBIS и JEM-X, поэтому о них будет рассказано подробнее.

IBIS - Imager on Board the INTEGRAL Satellite (прибор для построения изображений на спутнике INTEGRAL, Убертини и др. (2003)) - это широкопольный телескоп с кодирующей апертурой, спроектированный для работы в жестком рентгеновском диапазоне - 15–1000 кэВ. Его большое поле зрения вкупе с хорошим угловым разрешением ($12'$) и большой эффективной площадью (2600 см^2) позволяет проводить обзоры большой площади с хорошей чувствительностью. Угловое разрешение обеспечивается массивной маской из вольфрам-медного сплава, расположенной в 313.3 см над плоскостью детектора. Размер элемента маски - 11.2 мм, а толщина - 16 мм, такими элементами покрыта половина площади маски. Между маской и детекторами расположена также система коллиматоров, ограничивающая поле зрения детекторов маской. Для того, чтобы получить хорошее энергетическое разрешение в таком широком диапазоне энергий в качестве детекторов были использованы полупроводниковые CdTe пиксели, размером $4 \times 4 \times 2$ мм, из которых были набраны 8 модулей по 64×32 (таким образом полное разрешение детектора составляет 128×128 пикселей).

Для лучшей локализации источников на обсерватории установлен телескоп JEM-X - Joint European Monitor for X-rays (Общеввропейский рентгеновский монитор, Лунд и др. (2003)). Он работает в более мягком энергетическом диапазоне 3–35 кэВ. Он является телескопом с кодирующей апертурой. Поле зрения диаметром 13.2° FWZR (диаметр области полного кодирования 4.8°) ограничено коллиматором, а в качестве детектора используется газовая камера с площадью входного окна $\sim 490 \text{ см}^2$ и энергетическим разрешением $\Delta E/E \sim 16\%$ FWHM на 6 кэВ. Эффективная площадь в центре поля зрения равна лишь $\simeq 75 \text{ см}^2$, т.к. более 80% детектора затеняется непрозрачными элементами маски и коллиматора. На борту находятся два одинаковых модуля телескопа; если они работают одновременно, эффективная площадь оказывается в два раза большей $\simeq 150 \text{ см}^2$.

2.2 Обсерватория Swift

Основной задачей миссии Swift, пришедшей на смену BATSE, является обнаружение гамма-всплесков, оповещение наземных наблюдателей о произошедшем всплеске и максимально быстрая его локализация. Этой спецификой обусловлен набор телескопов установленных на обсерватории - широкопольный телескоп BAT обнаруживает всплеск, а телескопы XRT и UVOT локализируют послесвечение с точностью до половины секунды дуги в рентгеновском и ультрафиолетовом-оптическом диапазоне. Используя для передачи сообщений сеть коммуникационных спутников TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System - Спутниковая система отслеживания и ретрансляции данных) Swift уже через двадцать секунд после обнаружения всплеска передает на землю приблизительные (с точностью в несколько угловых минут) координаты всплеска, а через четыре минуты после обнаружения - точные координаты, в случае если было зарегистрировано послесвечение всплеска в оптическом диапазоне.

Телескоп оповещения о всплесках - BAT - самый большой инструмент обсерватории. Также как и рентгеновские телескопы обсерватории INTEGRAL он работает по прин-

ципу кодирующей апертуры. Именно это позволяет ему иметь беспрецедентно большое поле зрения - 2.2 стерадиана при 10% кодировании или, проще говоря, примерно одна шестая часть неба. Поскольку наибольшая спектральная плотность энергии в гамма-всплесках лежит в области десятков-сотен кэВ, то и энергетический диапазон телескопа был подобран соответствующим образом - 15–150 кэВ. В качестве детекторов используются 256 блоков состоящих из 128 кадмий-цинк-теллурических пикселей размером 4×4 мм², а маска собрана из тонких свинцовых пластин размером $5 \times 5 \times 1$ мм. Доля “открытых” элементов в маске составляет 50%, они расположены в случайном порядке. Размер пикселя детектора вкупе с размером элемента маски и расстоянием между маской и детекторной плоскостью (1 м) определяет угловое разрешение. Оно равно 22 угловым минутам (полная ширина на полувысоте, FWHM), что позволяет локализовывать источники с точностью в несколько угловых минут. Полная эффективная площадь телескопа составляет 5240 см², а источник расположенный на оптической оси засвечивает ≈ 1400 см². Система обработки изображений телескопа отвечает за поиск всплесков в режиме реального времени, определение их координат и перенаведение обсерватории.

После перенаведения обсерватории в работу вступают два фокусирующих телескопа - рентгеновский телескоп на зеркалах косого падения XRT и тридцатисантиметровый УФ-оптический телескоп UVOT построенный по схеме Ричи-Кретьена. Поскольку в этой работе данные оптического телескопа не использовались его детальное описание не приводится, заинтересованный читатель может найти его в работе Роминг и др. (2005). Рентгеновский же телескоп - XRT (X-ray telescope) представляет особый интерес, не только в контексте использования его для определения координат гамма-всплесков, но и в связи с тем, что в последние годы этим инструментом проводится большое количество мониторинговых работ - от поиска и локализации новых источников до регулярных наблюдений уже известных, с целью изучения эволюции временных и спектральных характеристик. XRT представляет собой телескоп типа Вольтер-1 на зеркалах косого падения. Фокусное расстояние телескопа 3.5 м, в фокальной плоскости расположена кремниевая ПЗС-матрица. Эффективный энергетический диапазон телескопа 0.3–10 кэВ. Он может работать как в режиме прямого изображения, что позволяет определять координаты источников на небе с точностью до $\approx 2''$, так и в режиме быстрого тайминга, с частотой 20 мс, что позволяет изучать быструю переменность объектов.

Глава 3

Обзоры неба

3.1 Обзор области Галактического центра телескопом JEM-X

С 2003 г. орбитальная астрофизическая обсерватория гамма-лучей INTEGRAL (Винклер и др., 2003) ведет мониторинг рентгеновских источников в плоскости Галактики и в поле ее центра. За это время обсерватория открыла около 100 ранее неизвестных рентгеновских двойных систем в Галактике, более 150 рентгеновски активных ядер галактик и квазаров, ряд объектов другой природы. Фактически число известных на небе жестких рентгеновских источников было удвоено. По результатам наблюдений основного инструмента обсерватории — гамма-телескопа IBIS (Убертини и др., 2003) были опубликованы каталоги зарегистрированных источников, регулярно выходят их обновленные версии (например, Ревнивцев и др. (2004); Мольков и др. (2004); Бёрд и др. (2016); Кривонос и др. (2007, 2012); Гребенев и др. (2013)).

В этой части представлены результаты столь же глубокого (десять лет наблюдений) обзора поля галактического центра радиусом $\sim 20^\circ$ другим телескопом обсерватории INTEGRAL — Общеввропейским рентгеновским монитором JEM-X (Лунд и др., 2003), чувствительным в стандартном рентгеновском диапазоне 3–35 кэВ. Подробно JEM-X описан в Части 2.1. Он обладает в ~ 3 раза более высоким по сравнению с телескопом IBIS угловым разрешением ($\sim 3.35'$ FWHM), а поэтому имеет очевидное преимущество при исследовании областей неба, густо заселенных рентгеновскими источниками (таких как центр и балдж Галактики). С другой стороны, из-за в ~ 4 раза меньшего поля зрения телескопа JEM-X по сравнению с полем зрения телескопа IBIS суммарная экспозиция исследуемых областей оказывается заметно меньшей экспозиции телескопа IBIS, хотя оба инструмента работали почти одновременно. Это естественно ограничило возможности телескопа JEM-X по исследованию слабых источников.

Следует отметить, что ранее уже предпринимались попытки обобщить результаты отдельных наблюдений, выполненных телескопом JEM-X. Так, Вестергаард (2009) был опубликован каталог источников, зарегистрированных телескопом за первые ~ 5 лет наблюдений (с февраля 2003 г. по сентябрь 2008 г.). Каталог заметно уступает по временной базе, предельной чувствительности, методике отбора и анализа данных, по

числу зарегистрированных в области галактического центра источников обзору данной работы. Вестергардом не был выполнен анализ распределения источников каталога по светимости и положению на небе. Санчес-Фернандес (2012) был представлен каталог рентгеновских всплесков, зарегистрированных телескопом JEM-X от барстеров. Как правило, эти события намного короче масштаба транзиентных явлений, рассматриваемых в настоящей работе.

Обзор области галактического центра телескопом JEM-X в рентгеновском диапазоне может рассматриваться как дополнительный к обзору в более жестких рентгеновских лучах, выполненному телескопом IBIS. Эффективность такого подхода была продемонстрирована нами ранее при исследовании поля Большого Магелланова Облака (Гребенев и др., 2013). В то же время нельзя не отметить, что обзоры такой большой (более 1200 кв. град.!) площади при достаточно высокой (~ 1 мКраб) чувствительности и хорошем (мин. дуги) угловом разрешении в стандартном рентгеновском диапазоне почти не проводились. Можно упомянуть обзоры поля галактического центра телескопом XRT на станции SPACELAB-2 (Скиннер и др., 1987), телескопом ТТМ на модуле МИР-КВАНТ (Сюняев и др., 1991) и телескопом АРТ-II обсерватории ГРАНАТ (Сюняев и др., 1991; Павлинский, Гребенев и Сюняев, 1994). Все они имели небольшую ($\lesssim 100$ кв. град.) площадь и были получены при достаточно короткой экспозиции, т.е. являлись как бы единовременными “снимками” неба. Еще меньшую площадь имели обзоры центральных областей Галактики спутниками ASCA (Сугизаки и др., 2001; Сакано и др., 2002) и XMM (Варвик и др., 2012). Обзор всего неба обсерватории ROSAT (Вогс и др. 1999) был осуществлен в более мягком (≤ 2 кэВ) рентгеновском диапазоне, а обзоры неба обсерваторией RXTE (приборами ASM и PCA, Гримм, Гильфанов и Сюняев (2002), Ревнивцев и др. (2004)), также как более ранний обзор неба спутником HEAO 1 (эксперимент A1, Вуд и др. (1984)) — проведены с плохим ($\gtrsim 1^\circ$) угловым разрешением. Поэтому данный обзор имеет самостоятельную значимость.

3.1.1 Отбор и обработка данных

Из-за ограничений по ориентации спутника INTEGRAL относительно направления на Солнце, область центра Галактики была доступна для наблюдений два раза в год, ранней весной и осенью, каждый раз примерно в течение двух месяцев. Для проведения обзора и составления каталога зарегистрированных источников использовались все общедоступные данные телескопа с февраля 2003 г. по апрель 2013 г. (орбиты 40–1237). Отбирались индивидуальные наведения обсерватории в направлениях, отстоящих менее чем на 26° от центра Галактики и имеющих экспозицию длительностью более 500 с (обычная длительность составляет 1.5–3.5 кс). Более короткие экспозиции были отброшены для снижения систематических шумов. После отбора осталось около 25 000 индивидуальных наведений, суммарной продолжительностью ≈ 61 Мс. Экспозиция центральной зоны вблизи центра Галактики радиусом $\sim 2^\circ$ достигла 4.8 Мс, медианная экспозиция в плоскости Галактики ≈ 1 Мс. Для анализа источников и построения изображений неба использовалась лишь центральная область радиусом 20° с экспозицией

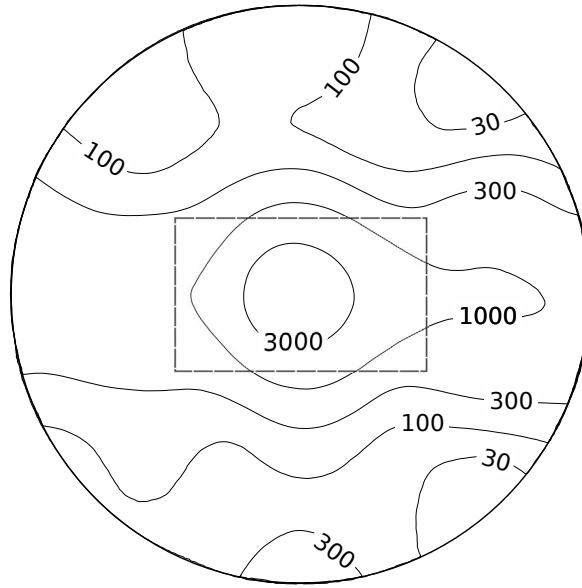


Рис. 3.1. Распределение экспозиции наблюдений области галактического центра телескопом JEM-X в 2003–2013 гг. Контуры соответствуют экспозиции 30, 100, 300, 1000 и 3000 кс. В показанной окружности области радиусом $\sim 20^\circ$ экспозиция нигде не уменьшается ниже 10 кс. Штриховой линией ограничена прямоугольная область, для которой на Рис. 3.2 приведены интегральные изображения неба.

всюду выше 10 кс (Рис. 3.1). При этом эффективный (с оптимальной чувствительностью) диапазон энергий телескопа 5–25 кэВ был разбит на два поддиапазона: мягкий 5–10 кэВ и жесткий 10–25 кэВ, весь дальнейший анализ проводился для этих поддиапазонов отдельно и независимо.

Телескоп JEM-X оснащен кодирующей апертурой, поэтому для восстановления изображений неба требуется специальный компьютерный анализ исходных данных. Для получения изображений в отдельных наведениях использовалось программное обеспечение OSA 10.0, созданное в Центре научных данных обсерватории при Университете Женевы¹. Полученные изображения анализировались и затем складывались с помощью программного обеспечения, специально разработанного нами для этой задачи. При анализе поиск источников на изображениях проводился в несколько этапов: сначала на изображении находились все яркие известные источники, поток от которых превышал порог детектирования. Затем они последовательно удалялись (вычитались) из изображения, после чего строилось распределение по суммарным значимостям ячеек размером 3 на 3 пикселя (примерно соответствующих функции отклика на точечный источник). Ячейки, статистически выделяющиеся по сравнению с гауссовым распределением, проверялись на наличие источника с учетом локального фона. Этот подход

¹<http://www.isdc.unige.ch/integral/analysis>

позволил уверенно регистрировать даже достаточно слабые источники в зашумленных полях.

После анализа отдельных изображений строились суммарные карты (мозаики) по отдельным орбитам (длительностью примерно трое суток), а также интегральные мозаики из всех наблюдений в двух выбранных диапазонах энергий. Телескоп JEM-X состоит из двух одинаковых, хотя и не вполне идентичных модулей (Лунд и др., 2003). На разных этапах миссии наблюдения проводились либо одновременно двумя модулями, либо раздельно одним модулем или другим. Для нашего анализа данные обоих модулей использовались единым образом, несмотря на небольшое различие в собирающей площади ($\approx 0.5\%$ и $\approx 2\%$ для мягкого и жесткого канала, соответственно).

При построении мозаик для повышения отношения сигнала к шуму исключались области на краю поля зрения телескопа, в которых, из-за меньшей засветки излучением от источников, подавляемого коллиматором, велики шумы, — использовалась только центральная область изображений радиусом 5.7° . Поиск источников на интегральных мозаиках и мозаиках по отдельным орбитам проводился аналогично поиску на индивидуальных изображениях.

Для калибровки измеряемых потоков от источников были сложены данные всех доступных наблюдений Крабовидной туманности. В результате было найдено, что поток в 1 Краб дает 0.065 и 0.036 отсчетов $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазонах энергий 5–10 и 10–25 кэВ соответственно. Отметим, что поток излучения в 1 мКраб в указанных диапазонах энергий равен 9.0×10^{-12} и 1.05×10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, соответственно.

3.1.2 Результаты обзора и каталог источников

Полученные индивидуальные изображения неба позволяют исследовать переменность зарегистрированных источников на разных временных масштабах. В данной работе мы ограничимся представлением лишь интегральных карт неба и каталога зарегистрированных на них источников и подробно обсудим статистические свойства и пространственное распределение отдельных популяций источников. Вопросы переменности мы затронем лишь в связи с регистрацией транзиентных источников.

На Рис. 3.2 показаны интегральные (полученных за все время наблюдений этого поля обсерваторией INTEGRAL) карты отношения сигнала к шуму S/N для центральной области Галактики размером $18^\circ \times 11^\circ$ в двух выбранных диапазонах энергий. Эта область обозначена на Рис. 3.1 штриховой линией. На картах зарегистрированы 30 источников квазипостоянного рентгеновского излучения. Видно, что некоторые источники, например, XTE J1739-285, SLX 1746-331, SLX 1746-370, GRS 1747-312, более ярки на мягком изображении, другие, такие как, GRS 1734-292, GRS 1758-258, GX 3+1, становятся более яркими на жестком. Это, конечно, свидетельствует о различиях в жесткости спектра излучения этих источников.

Из-за неточностей в имеющейся модели маски телескопа практически невозможно полностью учесть отклик детектора на конкретный источник. В исследуемой области неба находится много ярких источников, к тому же присутствует мощное диффузное

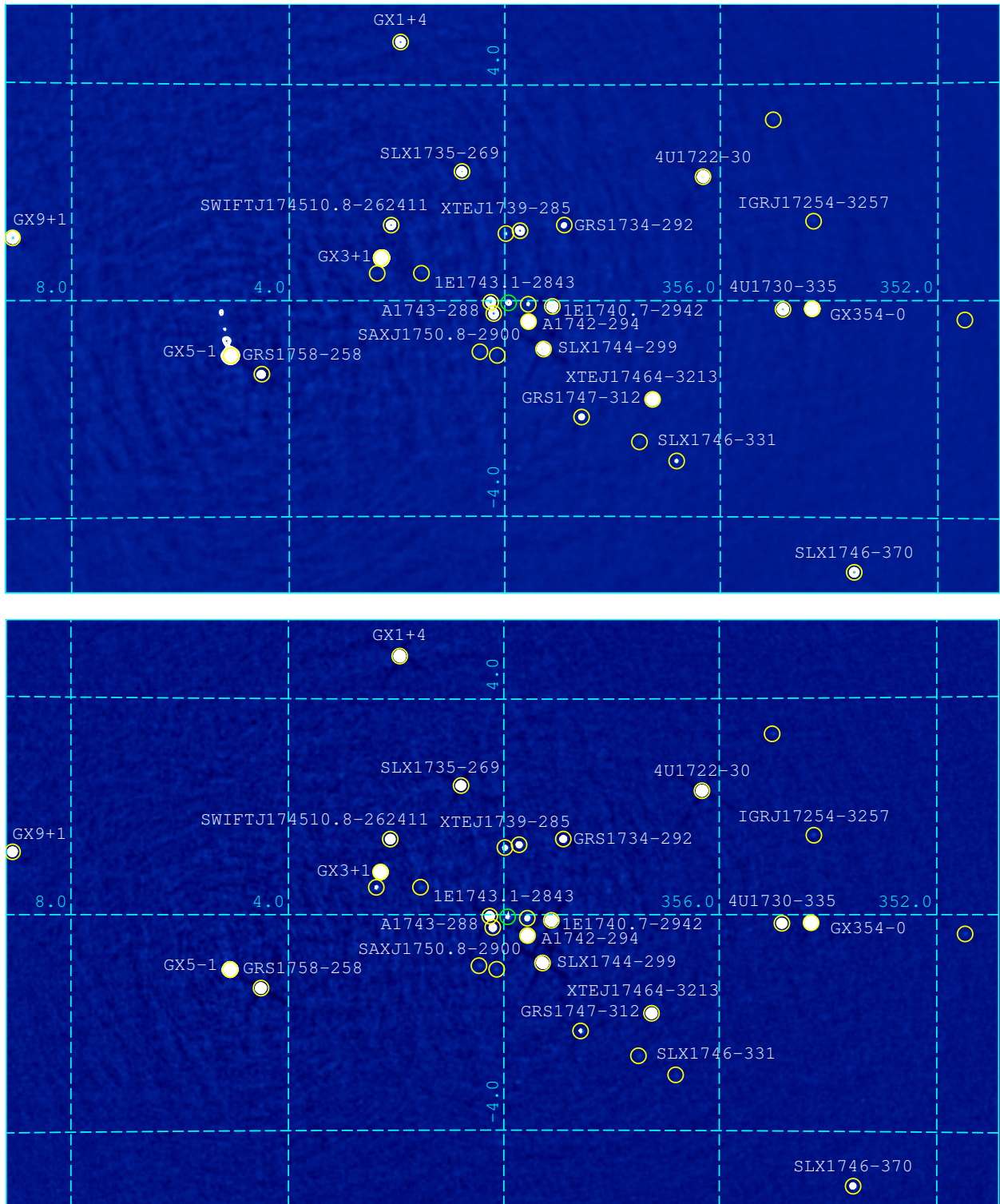


Рис. 3.2. Интегральные карты отношения сигнала к шуму S/N центральной области Галактики в диапазонах энергий 5–10 (вверху) и 10–25 кэВ (внизу). Белыми контурами с логарифмическим шагом показаны уровни S/N , начиная с 6σ .

рентгеновское излучение галактического хребта (см. например Кривонос и др., 2007). В результате сложения погрешностей на восстановленном интегральном изображении (Рис. 3.2) проявились неоднородности фона (систематические шумы), которые сильно ограничили возможность поиска слабых ранее неизвестных источников в поле. Особенно сильны систематические шумы на мягком изображении. В среднем по всему полю оказалось, что такие шумы не позволяют достичь чувствительности лучше ~ 2 мКраб, хотя большая накопленная экспозиция теоретически позволяла это сделать. Лучшая чувствительность составила ≈ 0.8 мКраб в окрестности источника SLX 1746-331. Худшая — 8–10 мКраб — вблизи ярчайшего мягкого источника GX 5-1 (отметим цепочку ложных источников в его окрестности на верхней панели Рис. 3.2)

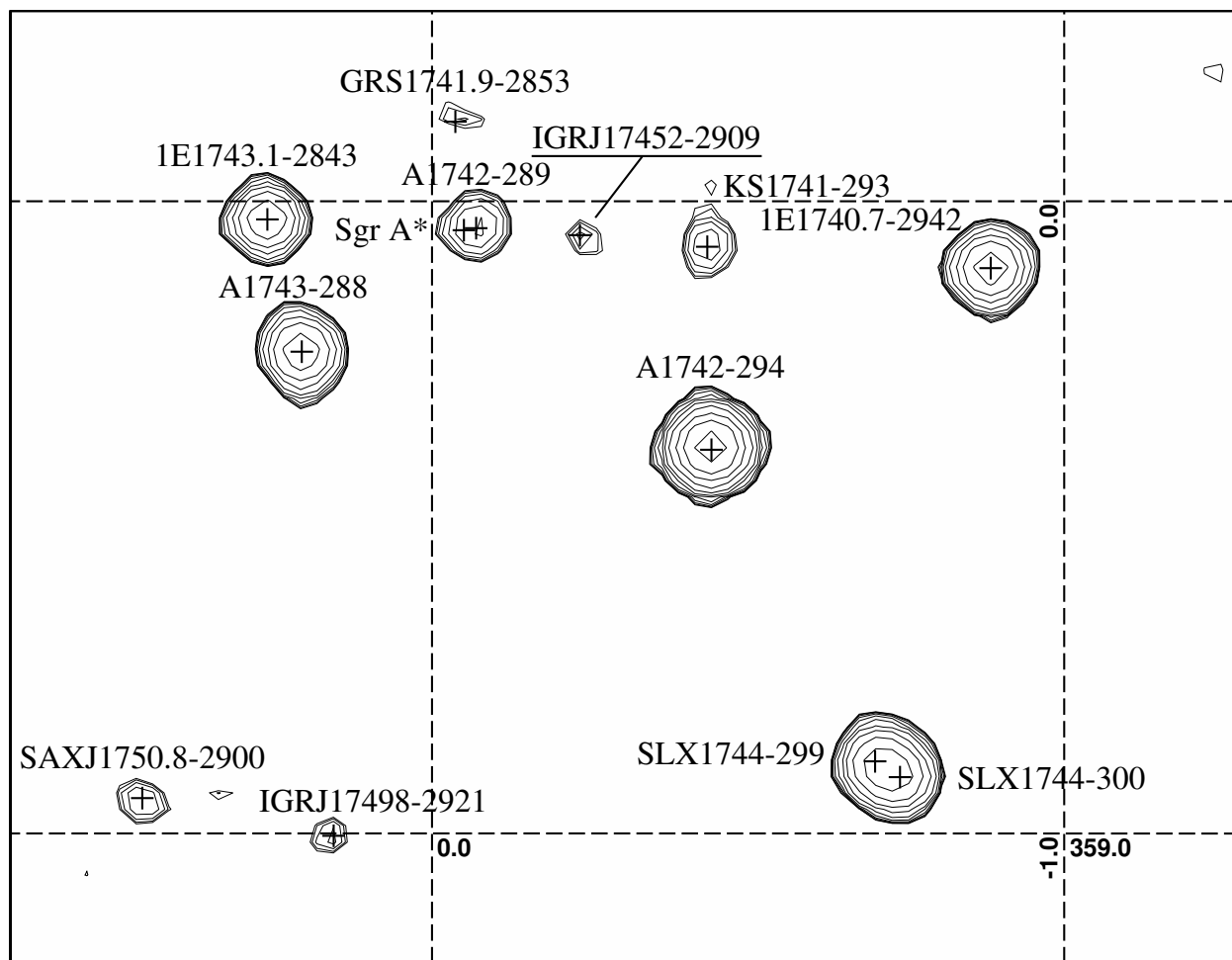


Рис. 3.3. Карта центральных $2.0^\circ \times 1.5^\circ$ Галактики в диапазоне 5–10 кэВ. Контуры даны на уровне отношения сигнала к шуму $S/N=6.0, 6.4, 7.1, 8.4, 11, 15, 22, \dots \sigma$ (с логарифмическим шагом). Ранее неизвестный источник IGR J17452-2909 зарегистрирован с $S/N=9.2$.

Карта отношения сигнала к шуму S/N в диапазоне 5–10 кэВ для самой центральной области Галактики (увеличенная вырезка из соответствующей карты на рис. 2) показана на рис. 3. Видны хорошо известные яркие источники A1742-294, 1E1740.7-2942, SLX 1744-299/SLX 1744-300, 1E1743.1-2843, A1743-288 и более слабые GRS 1741.9-2853, KS 1741-293, SAX J1750.8-2900, IGR J17498-2921, а также ранее неизвестный источник IGR J17452-2909. Этот источник зарегистрирован на уровне отношения сигнала к шуму $S/N=9.2$ на изображении в мягком диапазоне энергий 5–10 кэВ (и лишь $S/N=4.3$ на изображении в жестком диапазоне). В поле больше нет неотожествленных превышений над шумом сравнимой значимости (фактически, нет превышений над уровнем $S/N \simeq 7$), однако, учитывая, сложную систематику фона мы все же не можем быть абсолютно уверены в реальности этого источника. Правильнее было бы назвать IGR J17452-2909 кандидатом в новый источник.

Источники SLX 1744-299 и SLX 1744-300 в проекции находятся на угловом расстоянии $\sim 2.5'$ друг от друга и не могут быть разрешены телескопом JEM-X. Тем не менее, хорошо видно, что соответствующее этим источникам превышение сигнала над фоном на Рис. 3.1.2 имеет вытянутую форму вдоль линии, соединяющей их положения. Очевидно, что источники дают примерно равный вклад в регистрируемое суммарное излучение. Похожая ситуация имеет место с источником A 1742-289, который расположен всего в $75''$ от ядра Галактики — радиоисточника Sgr A*. Здесь тоже форма превышения сигнала над фоном на изображении искажена, однако, значительно слабее, чем в случае источников SLX 1744-299 и SLX 1744-300, — излучение Sgr A* дает лишь небольшую добавку к излучению рентгеновского барстера A 1742-289.

На интегральных картах неба, полученных за все время наблюдений внутри области радиусом 20° от центра Галактики, зарегистрированы 83 источника, еще 22 — на изображениях, полученных в индивидуальных наведениях, или на интегральных изображениях, соответствующих отдельным орбитам. За исключением уже упомянутого IGR J17452-2909 все они ранее были известны. Большинство источников — галактические рентгеновские двойные системы: 73 маломассивных (LMXB), 18 массивных (HMXB) и 3 катаклизмические (CV). Источник XTE J1652-453, наблюдательные проявления которого близки к свойствам рентгеновских новых, что позволяет считать его кандидатом в черные дыры, очевидно, также является двойной системой, скорее всего — маломассивной. Членом маломассивной системы вероятно является и рентгеновский барстер XTE J174457-2850.3, хотя его свойства не вполне типичны для объектов этого типа (Дегенаар и др., 2014). Таким образом в целом каталог содержит 96 рентгеновских двойных. Тип некоторых (4) источников все еще не определен. Помимо IGR J17452-2909, впервые в стандартном рентгеновском диапазоне зарегистрирован источник 1RXS J175721.2-304405. Ранее он наблюдался лишь на очень низких энергиях ≤ 2 кэВ. Внегалактические источники представлены 3 активными ядрами (AGN) и скоплением галактик в Змееносце (Oph CL). Распределение источников разных типов по полю показано на Рис. 3.4. Видно, что многие LMXB-источники демонстрируют сильную концентрацию к галактическому центру, тогда как часть LMXB- и HMXB-

источников рассеяны вдоль и около галактической плоскости, где в галактических рукавах находятся области активного звездообразования.

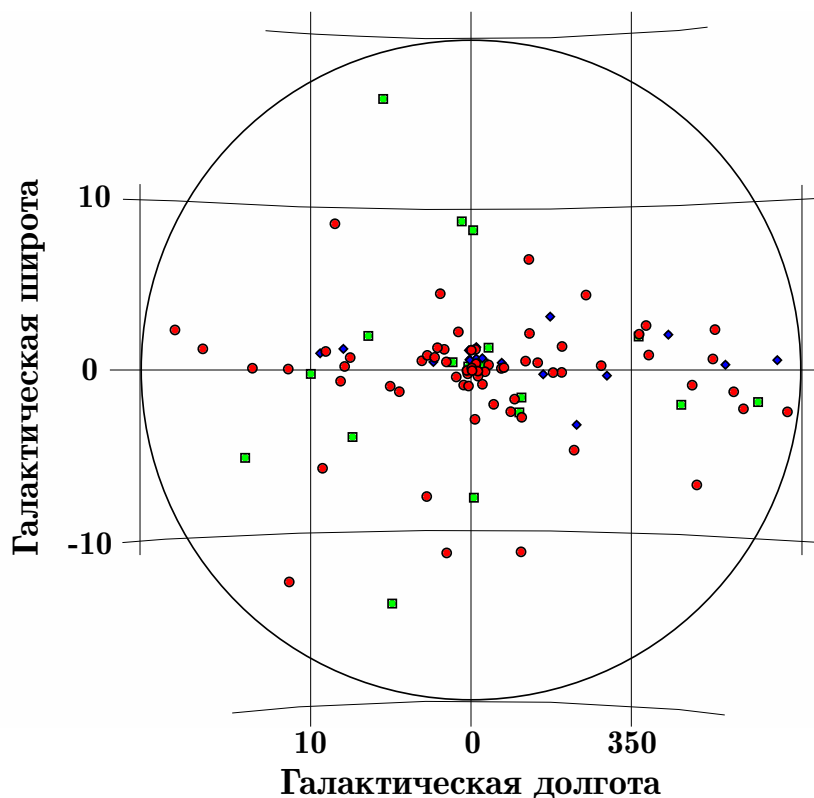


Рис. 3.4. Распределение по полю зарегистрированных источников разных типов: LMXB (кружки), HMXB (квадратики), AGN и другие источники (ромбики). Видно, что часть LMXB имеют сильную концентрацию к центру Галактики, остальные LMXB и HMXB — к галактической плоскости.

Полный каталог 104 источников приведен в Таб. 3.3 (квазипостоянные, зарегистрированные на интегральных мозаиках) и Таб. 3.4 (транзиентные источники, зарегистрированных лишь изображениях, соответствующих отдельным орбитам). Источники перечислены в порядке возрастания их прямого восхождения (эпоха 2000.0). Для всех источников приведены усредненные потоки в единицах мКраб в диапазонах 5–10 и/или 10–25 кэВ; для источников, обнаруженных только в отдельных орбитах и не присутствующих на общей карте, приведены потоки, соответствующие наибольшей значимости регистрации, с указанием орбиты. Также приведены галактические координаты источников по данным телескопа JEM-X и их отклонение в мин. дуги от положения источника в компилятивном каталоге обсерватории INTEGRAL (INTEGRAL General Reference Catalog, V.31, Эбисава и др. (2003)).

3.1.3 Распределение источников в Галактике

Галактика прозрачна для рентгеновского излучения в достаточно жестком $h\nu \gtrsim 5$ кэВ диапазоне телескопа JEM-X. На сколько позволяет чувствительность, телескоп может видеть в ней все источники определенной яркости без заметных искажений. Соответственно, выборку зарегистрированных источников можно использовать для анализа их пространственного распределения. Уже из Рис.3.4 ясно, что это распределение характеризуется сильной концентрацией к галактическому центру. Оптические и инфракрасные звезды также концентрируются к центру, так что на первый взгляд в этом нет ничего удивительного. В действительности же, из-за краткости периода рентгеновской активности, распределение рентгеновских источников должно быть чувствительно к возрасту звездного населения в данной области Галактики, а поэтому — может сильно отличаться от распределения звездной массы. Интересно сравнить эти распределения количественно.

Первая попытка подобного сравнения была предпринята Гребенев, Павлинский и Сюняев (1996) по данным обзора области галактического центра телескопом ART-P обсерватории GRANAT. По многим параметрам этот телескоп был близок к телескопу JEM-X. В поле размером $8^\circ \times 8^\circ$ были зарегистрированы 17 источников. Было показано, что рост их поверхностной плотности к центру Галактики в целом согласуется с распределением звездной массы. В последующем, по мере обнаружения новых источников в этой области и уточнения расстояний до них, подобные исследования неоднократно повторялись и совершенствовались (например, Гримм, Гильфанов и Сюняев (2002); Ревнивцев и др. (2008); Лутовинов и др. (2005)). Анализ по данным телескопа JEM-X, тем не менее, не лишен смысла. Благодаря беспрецедентно долгим наблюдениям, большому исследованному полю, хорошему угловому разрешению, высокой чувствительности и даже просто — рентгеновскому диапазону, промежуточному между диапазонами телескопов с зеркалами косого падения и жестких рентгеновских телескопов обсерваторий INTEGRAL и SWIFT, набор зарегистрированных телескопом JEM-X источников, является уникальным и во многих отношениях более совершенным и полным, чем используемые в предыдущих работах.

Наибольший интерес представляет выборка маломассивных рентгеновских двойных систем (LMXB) обзора, имеющих оптическими компонентами сильно проэволюционировавшие звезды. LMXB-системы доминируют среди источников обзора (75 из 105 источников), что отражает их принадлежность к балджу Галактики, населенному старыми звездами и занимающему ее центральный килопарсек. Данный обзор полностью покрывает балдж (1 кпк на расстоянии галактического центра 8 кпк соответствует $\sim 7^\circ$). На Рис. 3.5 показано распределение плотности звездной массы, видимой телескопом в направлении галактического центра, в зависимости от расстояния от Земли и ширины поля зрения (все небо или области радиусом 20° , 5° и 1°). Использовалась трехкомпонентная модель Бакала и Сонеира (BS) распределения видимой звездной массы в Галактике, включающая диск, сфероид и центральный балдж (Бакал и Сонеира, 1980; Бакал, 1986). Далеко не вся масса Галактики связана со звездами — в центральных областях на их долю приходится лишь $\sim 1/3$ массы, остальное — на темную материю,

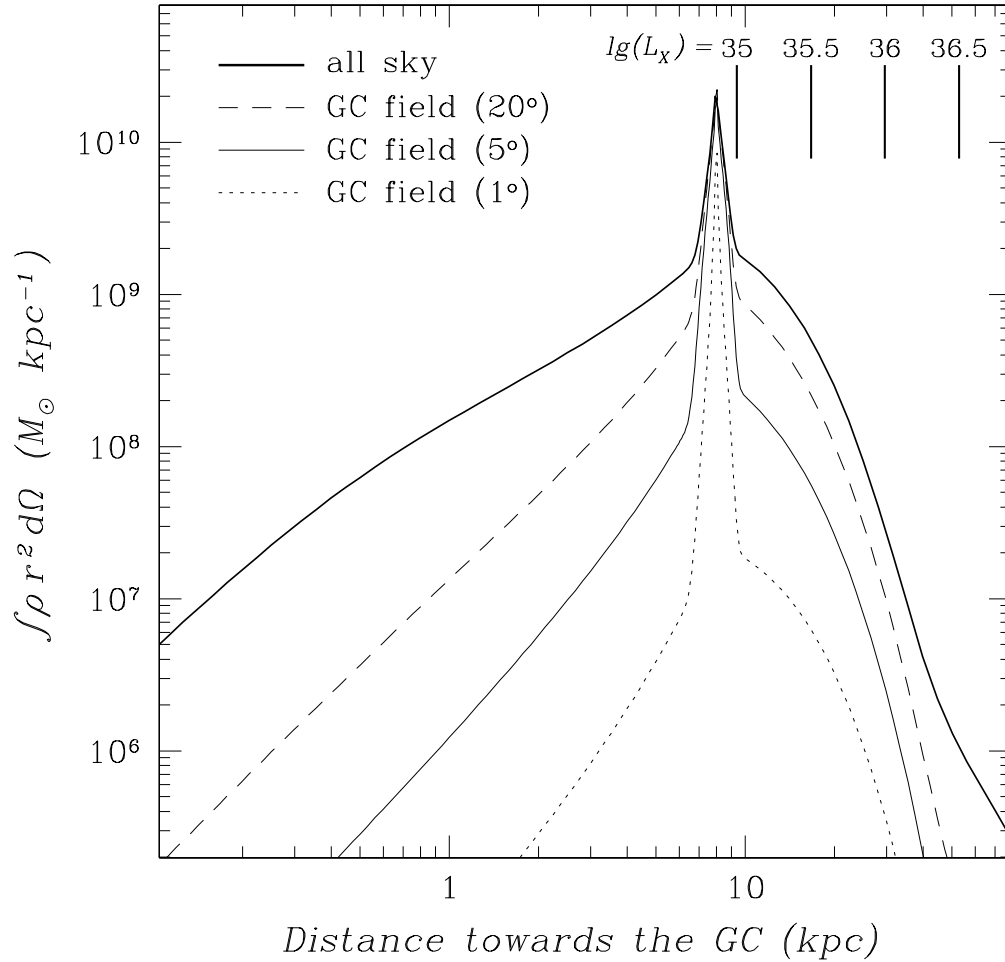


Рис. 3.5. Звездная масса в направлении центра Галактики в зависимости от расстояния и поля зрения (все небо, поле радиусом 20° , 5° или 1°). Вертикальными линиями показаны предельные расстояния, на которых источник со светимостью L_X в диапазоне 5–10 кэВ может быть зарегистрирован телескопом с порогом чувствительности ~ 1 мКраб.

межзвездный газ и пыль. Нас интересует именно звездная масса. В области радиусом 20° мы видим заметную ($\sim 68\%$) долю массы всех звезд Галактики: 100% массы балджа ($\simeq 1.4 \times 10^{10} M_\odot$), 56% массы сфероида ($\simeq 9.1 \times 10^8 M_\odot$) и 44% массы диска ($\simeq 8.0 \times 10^9 M_\odot$).

В верхней части рисунка показаны пределы чувствительности телескопа JEM-X к источникам разной светимости в диапазоне 5–10 кэВ. Минимальный поток, достоверно регистрируемый телескопом, полагался равным 1 мКраб, спектр источников — подобным спектру пульсара в Крабе, межзвездным поглощением пренебрегалось. Очевидно,

что телескоп видит в направлении центра Галактики практически все рентгеновские объекты, попавшие в поле зрения, со светимостью, превышающей 10^{36} эрг с^{-1} , и лишь немногим более половины источников со светимостью $\sim 10^{35}$ эрг с^{-1} . На верхней панели Рис. 3.6 показано распределение поверхностной плотности числа LMXB-систем каталога в зависимости от их расстояния до галактического центра (в проекции). Для сравнения приведено распределение, предсказанное BS-моделью в предположении, что в Галактике действуют 150 активных рентгеновских систем (1 система на $2.2 \times 10^8 M_{\odot}$). Распределения достаточно хорошо согласуются между собой, хотя на расстояниях 70–700 пк от галактического центра наблюдается легкий дефицит реальных источников. Предсказанное распределение зависит от светимости источников, в силу ограниченной чувствительности телескопа ($\simeq 1$ мКраб). Светимость в диапазоне энергий 5–10 кэВ предполагалась равной 1×10^{37} эрг с^{-1} (верхние кривые, выделенные красным цветом) или 1×10^{35} эрг с^{-1} (нижние кривые, синий цвет). Доля источников, содержащаяся в диске и сфероиде, показана штриховыми линиями. Очевидно, что по мере уменьшения светимости перестают наблюдаться слабые источники именно этих компонент структуры Галактики, тогда как все источники галактического балджа вплоть до светимостей 1×10^{35} эрг с^{-1} уверенно регистрируются.

На нижней панели Рис. 3.6 приведено интегральное распределение числа LMXB-систем в зависимости от их расстояния до галактического центра (в проекции). Приведено также аналогичное распределение НМХВ-систем каталога. Видно, что ни одной массивной системы в окрестности галактического центра радиусом 230 пк нет.

3.1.4 Функция светимости LMXB

Важнейшей характеристикой популяции источников является их распределение по светимости в определенном диапазоне энергий (функция светимости). В рентгеновском диапазоне, после появления высокочувствительных телескопов с зеркалами косо го падения Chandra и XMM-Newton, функции рентгеновской светимости были измерены для источников во многих близких галактиках (Гильфанов, 2004; Ким и др., 2006). Наиболее трудным случаем оказалась наша Галактика, для которой получение функции светимости осложняется плохим знанием расстояния до многих источников, большим угловым размером Галактики, сильно неоднородным покрытием ее поля наблюдениями, а также заметным межзвездным поглощением в галактической плоскости. Тем не менее, попытки построить такую функцию предпринимались (например, Гримм, Гильфанов и Сюняев (2002); Ревнивцев и др. (2008)).

Общей проблемой при исследовании распределения рентгеновских источников по светимости в нашей и других галактиках является их сильная переменность вплоть до транзиентности, когда обычно “выключенные” источники на короткий период времени становятся яркими. Длительность наблюдения отдельной площадки неба телескопами

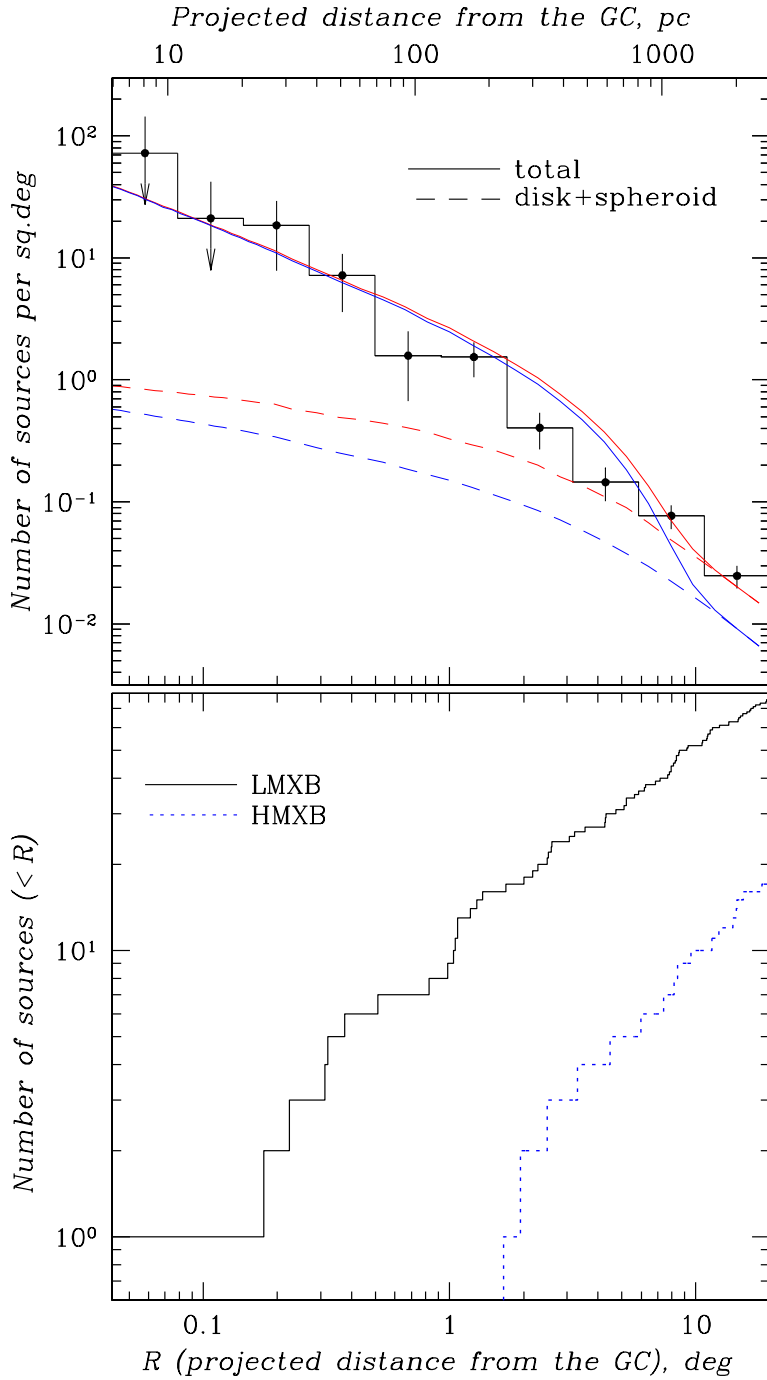


Рис. 3.6. Вверху: Распределение 75 ЛМХВ-источников, зарегистрированных телескопом ЖЕМ-Х, по их расстоянию до центра Галактики R (в проекции). Сплошными линиями показаны предсказания модели BS для распределения источников со светимостями в диапазоне 5–10 кэВ 1×10^{37} (верхняя/красная кривая) и 1×10^{35} эрг s^{-1} (нижняя/синия) в предположении, что в среднем в Галактике 1 рентгеновский источник приходится на $2.2 \times 10^8 M_{\odot}$ звездной массы. Штриховыми линиями показана доля рентгеновских источников, содержащаяся в звездном диске и сфероиде. Внизу: Интегральное распределение этих ЛМХВ-источников (сплошная гистограмма) в сравнении с аналогичным распределением 18 НМХВ-источников, зарегистрированных в обзоре.

Таблица 3.1. Принятые расстояния и светимости постоянных ЛМХВ в поле.

Id	Название	$d,^a$ кпк	$L_X,^b$ 10^{35} эрг/с	Ссылка на расстояние
1	XTE J1701-407	5.0	1.8	Шеневез и др . (2010)
2	GX 349+2	8.5	550	Вачтер, Маргон (1996)
3	4U 1702-429	6.2	18.2	Джонкер, Нелеманс (2004)
4	4U 1705-32	13.0	4.2	ин'т Занд и др. (2005)
5	XTE J1710-281	17.3	6.5	Джонкер, Нелеманс (2004)
6	4U 1708-40	8.0	25.0	Миглиари и др. (2003)
7	SAX J1712.6-3739	6.9	3.7	Джонкер, Нелеманс (2004)
8	IGR J17254-3257	8.0	1.3	
9	4U 1728-169	5.0	70.0	Христиан, Сванк (1997)
10	GX 354-0	5.3	34.0	Джонкер, Нелеманс (2004)
11	SLX 1735-269	8.5	7.2	Мольков и др. (2005)
12	4U 1735-444	9.4	190.0	Джонкер, Нелеманс (2004)
13	2E 1737.5-2817	8.0	1.5	
14	1E 1740.7-2942	8.5	10.0	Вайт, ван Парадайз (1996)
15	A 1742-294	8.1	28.0	Джонкер, Нелеманс (2004)
16	1E 1743.1-2843	8.0	6.8	Поркуе и др. (2003)
17	SLX 1744-299	5.0	2.8	Ли и др. (2008)
18	SLX 1744-300	8.0	3.6	
19	GX 3+1	5.0	75.0	Остерброк и др. (2001)
20	1E 1746.7-3224	8.0	0.96	
21	SLX 1746-370	11.0	43.3	Куулкерс и др. (2003)
22	GX 5-1	9.0	840	Джонкер и др. (2000)
23	GRS 1758-258	8.0	13.0	Миглиари и др. (2003)
24	GX 9+1	7.2	320	Христиан, Сванк (1997)
25	GX 13+1	7.0	170.0	Бандиопадхай и др. (1999)
26	4U 1812-12	4.0	2.8	Джонкер, Нелеманс (2004)
27	GX 17+2	14.0	1400	Джонкер, Нелеманс (2004)
28	H 1820-303	7.6	170.0	Куулкерс и др. (2003)
29	4U 1822-371	2.5	2.1	Мейсон, Кордова (1982)
30	GS 1826-24	7.5	29.0	Конг и др. (2000)
31	4U 1832-330	9.6	5.7	Пармар и др. (2001)

^a Расстояние до источника.

^b Светимость в диапазоне 5–10 кэВ.

Таблица 3.2. Принятые расстояния и светимости транзиентных LMXB в поле (из источников, зарегистрированных на интегральных картах JEM-X).

Id	Название	d , ^a кпк	L_X , ^b 10^{35} эрг/с	$\Delta t/T^c$ %	Ссылка на расстояние
1	MAXI J1659-152	8.6	24	8	Куулкерс и др. (2013)
2	GRO J1655-40	3.2	1.7	5	Джонкер и др. (2004)
3	XTE J1701-462	8.8	12	8	Лин и др. (2009)
4	H 1705-440	8.4	150	60	Джонкер и др. (2004)
5	IGR J17091-3624	14.0	50	10	Родригез и др. (2011)
6	IGR J17098-3628	10.5	3.4	10	Гребенев и др. (2007)
7	4U 1722-30	9.5	21	15	Куулкерс и др. (2003)
8	GX 1+4	4.5	3.5	35	Гримм и др. (2002)
9	4U 1730-335	8.8	12	20	Куулкерс и др. (2003)
10	XTE J1739-285	12.0	5.8	15	Торрес и др. (2006)
11	KS 1741-293	8.0	0.71	5	
12	GRS 1741.9-2853	8.0	0.57	3	
13	SWIFTJ174510.8-262411	7.0	6.5	7	Муноз-Дарьяс и др. (2013)
14	A 1742-289	8.0	1.7	10	
15	XTE J17464-3213	10.4	25	25	Корбел и др. (2005)
16	A 1743-288	7.5	5.1	15	Вернер и др. (2004)
17	IGR J17473-2721	5.3	0.31	5	Альтамирано и др. (2008)
18	IGR J17497-2821	8.0	0.50	2	Пайзис и др. (2009)
19	SLX 1746-331	8.0	1.8	7	
20	IGR J17498-2921	7.6	0.68	2	Линаре и др. (2011)
21	SAX J1750.8-2900	6.8	0.59	4	Галловой и др. (2008)
22	GRS 1747-312	9.5	2.9	15	Куулкерс и др. (2003)
23	XTE J1752-223	3.5	0.17	5	Шапошников и др. (2010)
24	1RXSJ175721.2-304405	8.0	1.1		
25	IGR J17597-2201	7.5	3.8	7	Лутовинов и др. (2005)
26	SAX J1806.5-2215	8.0	1.6	15	
27	XTE J1810-189	8.0	1.7	6	
28	XTE J1817-330	2.5	1.2	7	Сала, Грейнер (2006)
29	XTE J1818-245	3.5	0.25	8	Кадоле Бел и др. (2009)
30	MAXI J1836-194	8.0	2.6	6	
31	HETE J1900.1-2455	5.0	5.0	10	Каваи, Сузуки (2005)

^a Расстояние до источника.

^b Светимость в диапазоне 5–10 кэВ.

^c Доля времени активного существования источника (в %).

Chandra и XMM-Newton, как правило, не превышает нескольких килосекунд, поэтому в найденной ими популяции источников неизбежно присутствует заметное число транзиентов, зарегистрированных в момент вспышек, или переменных источников со светимостью, сильно отличающейся от средней. Большое (более десяти лет) временное покрытие обзора неба, выполненного телескопом JEM-X, предоставляет уникальную возможность отделить источники постоянного рентгеновского излучения от транзиентных и впервые построить функцию постоянной рентгеновской светимости Галактики. Как уже отмечалось, интерес здесь представляют прежде всего маломассивные рентгеновские двойные системы, популяция которых представлена в данном обзоре достаточно полно.

Из приведенных в Таб. 3.3 62 LMXB-источников, уверенно регистрируемых телескопом JEM-X на интегральных картах неба, лишь половина (31 система, см. Таб. 3.1) могут считаться источниками “относительно постоянного” рентгеновского излучения, остальные (Таб. 3.2) — сильнопеременные источники, которые более или менее регулярно регистрировались телескопом JEM-X (например, H 1705-440 или GX 1+4) или которые испытали одну длинную (несколько месяцев) или несколько коротких вспышек (в разное время) вспышек. Под “сильнопеременными” здесь понимаются системы, яркость которых в отдельных орбитах (на масштабе ~ 3 дней) заметно (в 5 и более раз) превосходила среднюю. Для слабых систем, которые в отдельных орбитах телескопом JEM-X на достоверном уровне не регистрировались, отсутствие вспышек, проверялось по кривым блеска, измеренным на длительных интервалах времени монитором всего неба ASM спутника RXTE и телескопом IBIS обсерватории INTEGRAL. Доля времени, в течение которого транзиентные источники из Таб. 3.2 находились в активном состоянии в ходе их наблюдения телескопом JEM-X, дана в колонке 5 Таб. 3.2. Даже если характерный период вспышек транзиентного источника мал по сравнению с временным покрытием обзора, его средняя светимость все еще является важным физическим параметром, характеризующим процесс аккреции в системе, а поэтому ее можно использовать для построения еще одной функции светимости — “транзиентов” Галактики.

Для большинства источников из приведенных в Таб. 3.1,3.2 расстояние известно с удовлетворительной точностью (лучше 30%), для остальных, IGR J17254-3257, 2E 1737.5-2817, KS 1741-293, GRS 1741.9-2853, A 1742-289, SLX 1744-300, SLX 1746-331, 1E 1746.7-3224, 1RXS J175721.2-304405, SAX J1806.5-2215, XTE J1810-189, MAXI J1836-194, оно было положено равным расстоянию до галактического центра 8 кпк (в силу их близости к центру в картинной плоскости). Принятые расстояния и соответствующие им средние светимости исследуемых источников в наиболее интересном диапазоне 5–10 кэВ можно найти в Таб. 3.1,3.2.

Полученная на основе этих данных функция рентгеновской светимости в диапазоне 5–10 кэВ галактической популяции LMXB с постоянным потоком излучения показана на Рис. 3.7 (верхняя панель) заштрихованными кружками. Она хорошо согласуется с модельной функцией светимости LMXB в близких галактиках позднего типа (сплошная линия), полученной Гильфановым (см. рис. 10 и Гильфанов (2004)) по данным наблю-

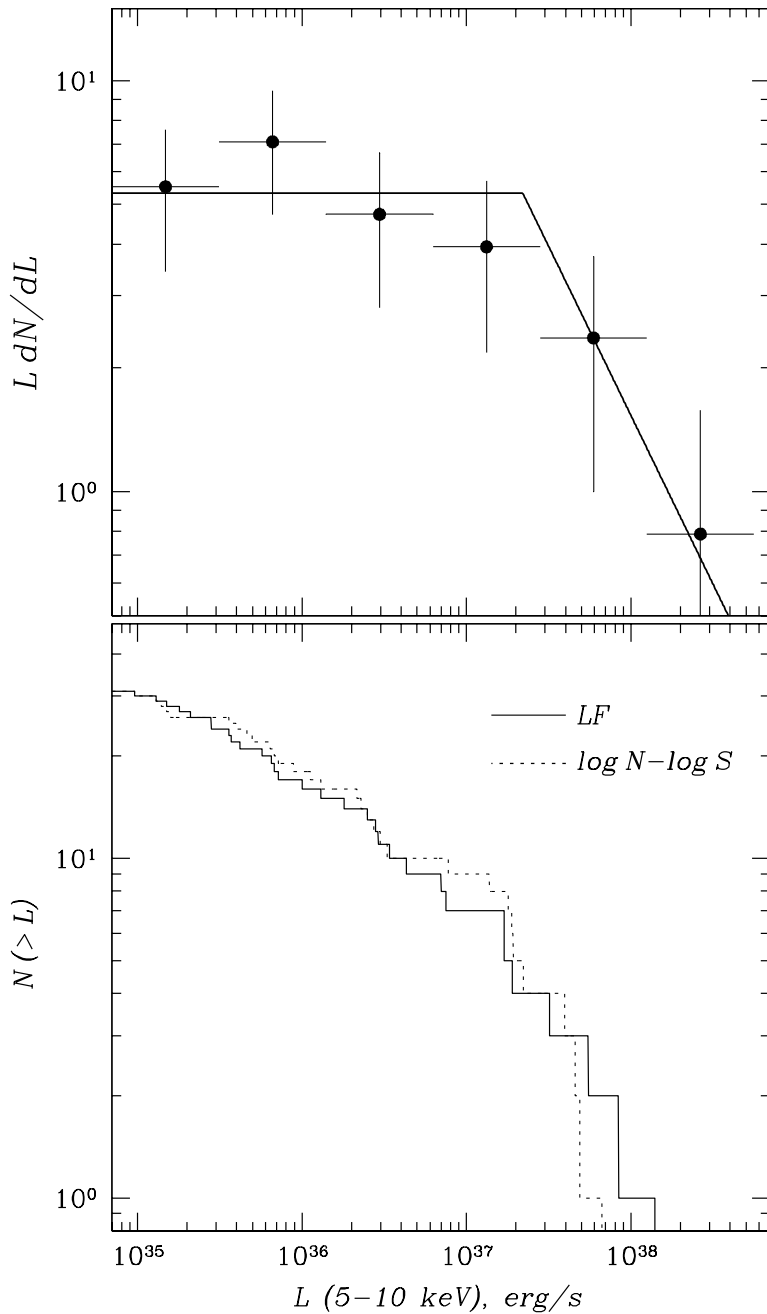


Рис. 3.7. Функция средней рентгеновской (5–10 кэВ) светимости LMXB-источников, зарегистрированных телескопом JEM-X в области галактического центра в 2003–2013 гг. Вверху: дифференциальная функция для всех постоянных источников; сплошной линией показана модельная функция по наблюдениям спутником Chandra ряда близких галактик (Гильфанов, 2004), приведенная к диапазону энергий телескопа JEM-X и массе балджа Галактики. Внизу: Интегральная функция светимости (сплошная линия) в сравнении с кривой $\log(N) - \log(S)$ (штриховая линия), предполагающей, что все источники находятся на расстоянии 8 кпк.

дений галактик спутником Chandra:

$$L \frac{dN}{dL} = A_* \begin{cases} 1, & \text{если } L < L_* \\ (L/L_*)^{-\beta}, & \text{если } L > L_{br} \end{cases} \quad (3.1)$$

Модельная функция была отнормирована на массу балджа Галактики $\simeq 1.4 \times 10^{10} M_\odot$. Поскольку спутник Chandra чувствителен в более мягком рентгеновском диапазоне 0.5–8 кэВ, чем диапазон телескопа JEM-X, модельная функция была пересчитана в предположении, что источники в среднем имеют степенной спектр с фотонным индексом $\alpha \simeq 1.65$. Параметры, используемые для представления на Рис. 3.7: $A_{br} \simeq 5.3$, $\beta = 0.82$, $L_{br} = 2.2 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} . Как мы видели в предыдущем разделе, все источники балджа Галактики со светимостью выше $\sim 10^{35}$ эрг с^{-1} должны быть видны для телескопа JEM-X, поэтому эффектами селекции можно пренебречь.

В нижней части Рис. 3.7 сплошной линией показана интегральная (кумулятивная) функция средней рентгеновской светимости выборки постоянных LMXB-источников, а пунктирной линией — кривая $\log(N) - \log(S)$ для этих источников (отнормированная в предположении, что все они находятся на расстоянии 8 кпк). При использовании кривой $\log(N) - \log(S)$ число ярких $L_X > 5 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} источников оказывается меньше их действительного числа, эти источники попадают в диапазон светимостей $L_X \sim (0.5 - 1.5) \times 10^{37}$ эрг с^{-1} .

Выше отмечалось, что выборка источников по данным телескопа JEM-X содержит действительно постоянные объекты (в отличие от популяций источников, полученных в наблюдениях спутников Chandra и XMM). Интересно проверить, какой вклад в функцию светимости могут вносить транзиентные источники при больших временах наблюдений одной галактики (как в случае наблюдения нашей Галактики телескопом JEM-X) или при многочисленных наблюдениях разных галактик (как в случае исследования, выполненного Гильфановым, 2004). На Рис. 3.8 вместе с уже описанной функцией светимости постоянных источников ромбами показана функция средней рентгеновской светимости в том же диапазоне энергий выборки транзиентных источников поля (табл. 4). Хотя статистика по этим источникам не очень велика, ясно, что их функция светимости может быть аппроксимирована той же модельной функцией, но сдвинутой влево, чтобы учесть меньшую среднюю энергию транзиентных источников, и вниз или вверх, чтобы учесть отличие их числа на единицу массы балджа от числа постоянных источников. Аппроксимация функцией (1) при том же $\beta = 0.82$ дает следующие параметры: $A_{br} \simeq 6.8$, $L_{br} \simeq 1.2 \times 10^{36}$ эрг с^{-1} .

В нижней части рисунка в сравнении приведены интегральные функции средней рентгеновской светимости выборок постоянных и транзиентных LMXB-источников, пунктирной линией — соответствующие кривые $\log(N) - \log(S)$ для этих источников. Отметим, что кривая $\log(N) - \log(S)$ отличается от функции светимости для транзиентных источников намного сильнее, чем для постоянных — среди транзиентов намного больше ярких объектов, расположенных существенно за галактическим центром (на расстояниях, превышающих 8 кпк). Любопытно, что среди постоянных источников выборки нет объектов со светимостью ниже $L_X \sim 1 \times 10^{35}$ эрг с^{-1} , тогда как среди транзиентных такие объекты составляют более 30%. Возможно, существуют физические механизмы,

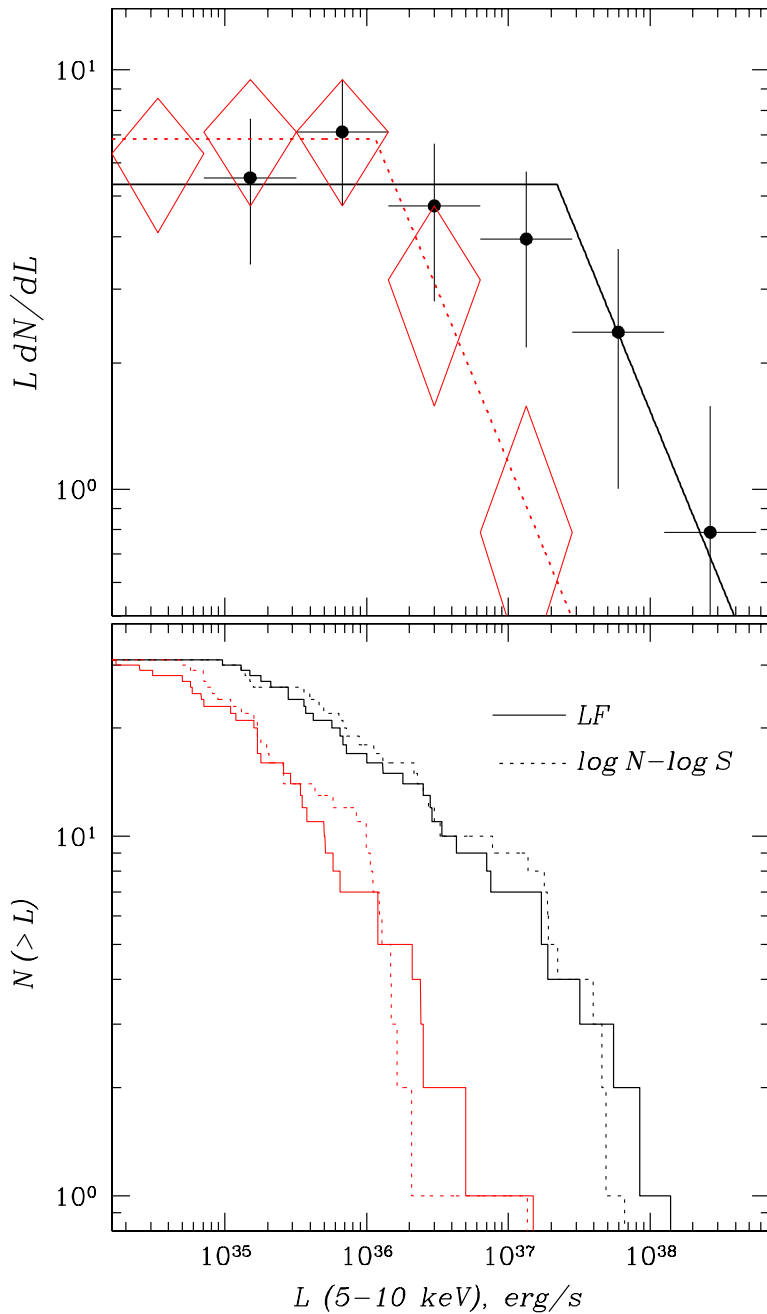


Рис. 3.8. Функция средней рентгеновской (5–10 кэВ) светимости ЛМХВ-источников, зарегистрированных телескопом JEM-X в области галактического центра в 2003–2013 гг. Вверху: дифференциальная функция светимости: заштрихованные кружки — постоянные источники, ромбы — транзиенты; сплошной линией показана модельная функция светимости, полученная по наблюдениям спутником Chandra ряда близких галактик, штриховой — аппроксимация этой моделью функции светимости, измеренной телескопом JEM-X для транзиентных ЛМХВ-источников. Внизу: Кумулятивные функции светимости (сплошные линии) этих групп источников в сравнении с кривыми $\log(N) - \log(S)$ (штриховые линия), предполагающими, что все объекты находятся на расстоянии 8 кпк.

не позволяющие источникам с низким темпом аккреции быть постоянными (стабильными).

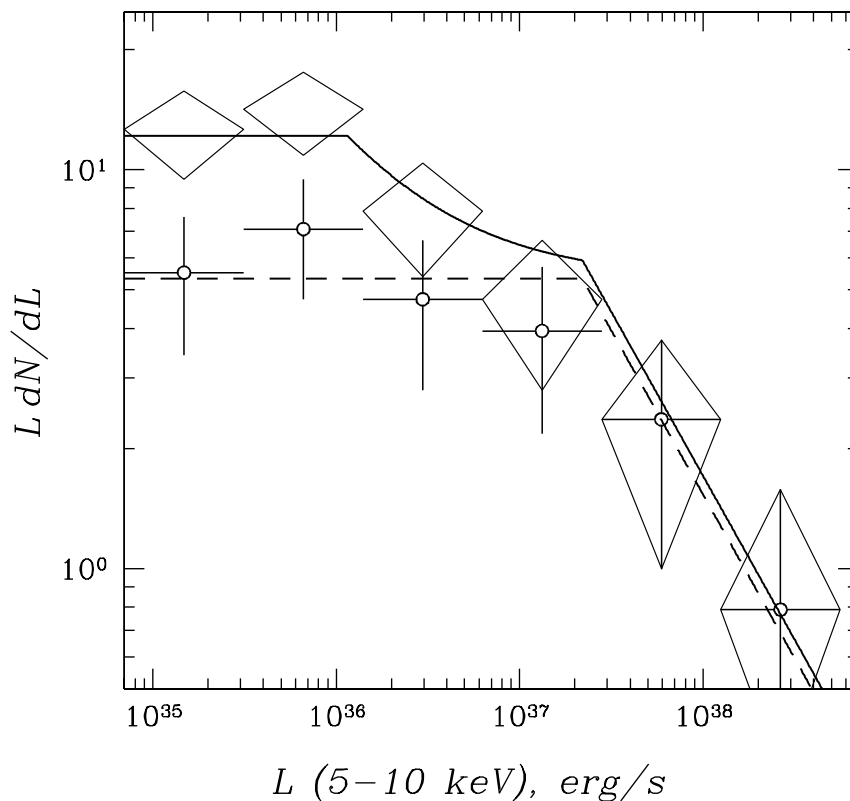


Рис. 3.9. Функция средней рентгеновской (5–10 кэВ) светимости всех LMXB-источников, зарегистрированных телескопом JEM-X на интегральных изображениях области галактического центра (ромбы) в сравнении с функцией светимости только постоянных источников (кружки). Сплошной линией показана сумма модельных функций светимостей постоянных (штриховая линия) и транзиентных источников.

3.1.5 Заключение

По данным телескопа JEM-X обсерватории INTEGRAL проведен обзор области галактического центра в двух рентгеновских диапазонах 5–10 и 10–25 кэВ. Составлен каталог зарегистрированных источников, выявлены популяции квазипостоянных источников и рентгеновских транзиентов. Большая часть (73+2) из зарегистрированных 105 источников являются маломассивными рентгеновскими двойными (LMXB). Получены функции средней светимости в стандартном рентгеновском диапазоне популяции квазипостоянных LMXB и популяции транзиентных LMXB, показано, что первая функция хорошо

согласуется с модельной функцией светимости, следующей из наблюдений близких галактик спутником Chandra, перенормированной на массу балджа Галактики, а вторая — может быть получена из нее сдвигом по оси светимостей и перенормировкой на относительное число транзиентов. При коротких сканирующих наблюдениях центральной области Галактики (и других галактик позднего типа) часто нет возможности отделить транзиентные источники от постоянных, поэтому их функции рентгеновской светимости складываются, что должно приводить к искажению измеренной функции светимости “постоянных” источников в области $L_X < 10^{37}$ эрг с^{-1} за счет “искусственного” повышения числа слабых источников. На Рис. 3.9 приведена функция светимости всех LMXB-источников (постоянных и транзиентных), зарегистрированных телескопом JEM-X на интегральных изображениях поле галактического центра. Видно, что в области низких светимостей $L_X < 10^{37}$ эрг с^{-1} эта функция уже не является плоской и значительно отличается от функции светимости постоянных источников. Сплошной линией на рисунке показана сумма модельных функций, аппроксимирующих функции средней светимости постоянных и транзиентных источников обзора.

С другой стороны очевидно, что далеко не все транзиентные источники регистрируются в обзорах, проводимых спутниками Chandra и XMM, и претендовать на полный учет популяции рентгеновских источников при построении функции светимости они не могут. Результаты данной работы могут оказаться важными для решения проблемы происхождения излома вблизи $L_* \simeq 10^{37}$ эрг с^{-1} в функции рентгеновской светимости LMXB-систем нашей и других галактик (например, (Постнов и Куранов, 2005; Ревнивцев и др., 2011; Куранов, Постнов и Ревнивцев, 2014)). Данный излом может быть связан с существованием большого числа транзиентных рентгеновских источников, имеющих низкие средние светимости, при практически полном отсутствии постоянных источников, излучающих в этом интервале светимостей. Не учет (или не полный учет) рентгеновских транзиентов при построении функции светимости неизбежно должен приводить к характерному излому, даже если исходная функция распределения рентгеновских систем по светимостям имеет гладкий, монотонный характер.

Таблица 3.3. Постоянные источники (зарегистрированные на интегральных картах неба)

Id	Источник	Поток, мКраб		l^a	b^a	Δ^a	Тип ^b
		5–10 кэВ	10–25 кэВ	°	°	'	
1	IGR J16493-4348	1.78±0.22	1.91±0.27	341.384	0.588	0.58	HMXB
2	MAXI J1659-152	34.34±0.32	53.36±0.56	5.516	16.526	0.03	LMXB/BH
3	GRO J1655-40	17.96±0.21	8.71±0.29	344.982	2.457	0.11	LMXB/BH
4	ОАО 1657-415	14.52±0.20	31.6±0.27	344.369	0.319	0.23	HMXB
5	XTE J1701-462	16.3±0.21	10.31±0.22	340.813	-2.489	0.32	LMXB
6	XTE J1701-407	7.51±0.17	5.49±0.19	345.105	0.672	0.5	LMXB
7	4U 1700-377	96.73±0.43	144.6±0.52	347.754	2.174	0.26	HMXB
8	XTE J1704-445	2.46±0.16	—	342.479	-1.925	0.52	—
9	GX 349+2	793.02±1.02	362.05±0.49	349.103	2.749	0.23	LMXB
10	4U 1702-429	50.08±0.24	31.04±0.29	343.887	-1.319	0.28	LMXB
11	4U 1705-32	2.62±0.22	2.31±0.3	352.792	4.675	1.03	LMXB
12	H 1705-440	219.91±0.35	112.59±0.38	343.321	-2.342	0.17	LMXB
13	IGR J17091-3624	26.64±0.38	18.09±0.38	349.524	2.215	0.28	LMXB/BH
14	IGR J17098-3628	3.26±0.34	—	349.554	2.074	0.04	LMXB/BH
15	XTE J1710-281	2.27±0.20	2.71±0.36	356.36	6.919	0.33	LMXB
16	4U 1708-40	41.28±0.20	14.1±0.25	346.329	-0.929	0.31	LMXB
17	Oph Cluster	3.80±0.24	2.91±0.23	0.581	9.281	0.53	CL
18	SAX J1712.6-3739	8.10±0.31	6.76±0.32	348.941	0.924	0.44	LMXB
19	V2400 Oph	2.78±0.21	3.74±0.31	359.865	8.738	0.16	CV
20	IGR J17195-4100	1.77±0.19	2.45±0.18	346.979	-2.135	0.22	CV
21	IGR J17200-3116	1.74±0.14	2.07±0.19	355.022	3.346	0.06	HMXB
22	IGR J17252-3616	3.36±0.16	7.61±0.23	351.498	-0.353	0.2	HMXB
23	IGR J17254-3257	2.15±0.12	2.04±0.17	354.283	1.474	0.52	LMXB
24	4U 1722-30	24.03±0.12	22.3±0.17	356.32	2.298	0.21	LMXB
25	4U 1728-169	290.18±0.93	125.66±0.64	8.511	9.037	0.43	LMXB
26	GX 354-0	127.17±0.16	101.06±0.24	354.304	-0.15	0.28	LMXB
27	GX 1+4	18.10±0.14	35.97±0.24	1.936	4.794	0.22	LMXB
28	4U 1730-335	15.97±0.11	11.7±0.15	354.842	-0.16	0.1	LMXB
29	IGR J17354-3255	1.15±0.11	1.06±0.12	355.460	-0.268	0.26	HMXB
30	GRS 1734-292	2.99±0.09	4.34±0.17	358.894	1.405	0.13	AGN
31	SLX 1735-269	10.52±0.11	10.59±0.15	0.796	2.399	0.3	LMXB
32	4U 1735-444	224.58±0.54	141.84±0.45	346.055	-6.993	0.26	LMXB
33	IGR J17391-3021	0.96±0.08	0.86±0.10	358.066	0.454	0.51	SFXT
34	XTE J1739-285	4.22±0.10	2.6±0.09	359.716	1.3	0.17	LMXB
35	2E 1737.5-2817	2.40±0.10	2.99±0.13	359.980	1.248	0.16	LMXB
36	XTE J1743-363	1.26±0.15	1.65±0.21	353.373	-3.427	0.26	HMXB
37	1E 1740.7-2942	15.25±0.10	23.44±0.16	359.116	-0.106	0.23	LMXB
38	IGR J17448-3232	0.60±0.10	—	356.825	-1.731	1.98	SNR+AGN
39	KS 1741-293	1.16±0.09	1.71±0.11	359.564	-0.067	0.53	LMXB
40	GRS 1741.9-2853	0.93±0.10	0.66±0.12	359.958	0.132	1.24	LMXB
41	SWIFT J174510.8-262411	14.03±0.16	13.01±0.15	2.112	1.403	0.06	LMXB/BH
42	A 1742-289	2.76±0.14	2.0±0.12	359.929	-0.04	0.04	LMXB

^a Галактические координаты и оклонение от принятого положения.

^b LMXB – маломассивная рентгеновская двойная, HMXB – массивная двойная, SFXT – быстрый рентгеновский транзиент, CV – катаклизмическая переменная, BH – кандидат в черные дыры, SGR – источник повторных вспышек, AGN – активное ядро галактики.

Постоянные источники (продолжение)

Id	Источник	Поток, мКрб		l^a	b^a	Δ^a	Тип ^b
		5–10 кэВ	10–25 кэВ	°	°	'	
43	A 1742-294	45.42±0.13	31.3±0.17	359.559	-0.389	0.29	LMXB
44	IGR J17452-2909	0.84±0.09	0.52±0.12	359.776	-0.054	1.0	—
45	XTE J17464-3213	24.59±0.13	13.68±0.15	357.255	-1.832	0.27	LMXB/ВН
46	1E 1743.1-2843	11.07±0.12	8.6±0.15	0.262	-0.029	0.08	LMXB
47	A 1743-288	9.48±0.11	4.25±0.12	0.206	-0.238	0.33	LMXB
48	IGR J17473-2721	—	1.64±0.14	1.55	0.51	0.14	LMXB
49	SLX 1744-299 ^c	17.76±0.10	11.9±0.12	359.28	-0.899	0.26	LMXB
50	SLX 1744-300 ^c	—	—	—	—	—	LMXB
51	GX 3+1	314.56±0.31	123.5±0.32	2.293	0.793	0.21	LMXB
52	IGR J17488-3253	—	0.98±0.15	356.957	-2.666	0.26	AGN
53	GRO J1750-27	—	2.83±0.15	2.371	0.507	0.14	HMXB
54	IGR J17497-2821	—	0.91±0.12	0.929	-0.439	0.93	LMXB
55	SLX 1746-331	3.02±0.09	1.07±0.15	356.808	-2.972	0.07	LMXB
56	IGR J17498-2921	1.25±0.14	1.45±0.12	0.158	-1.008	0.3	LMXB
57	1E 1746.7-3224	1.58±0.09	1.05±0.14	357.498	-2.62	0.73	LMXB
58	SLX 1746-370	37.63±0.18	20.78±0.28	353.531	-5.005	0.33	LMXB
59	SAX J1750.8-2900	1.34±0.10	1.19±0.12	0.463	-0.949	0.44	LMXB
60	GRS 1747-312	3.36±0.10	2.7±0.13	358.573	-2.161	0.19	LMXB
61	XTE J1752-223	—	1.48±0.27	6.443	2.133	2.61	LMXB/ВН
62	1RXSJ175721.2-304405	1.76±0.14	0.95±0.14	359.751	-3.105	0.12	LMXB
63	IGR J17586-2129	3.34±0.30	2.55±0.30	7.99	1.317	0.61	HMXBe
64	IGR J17597-2201	7.13±0.41	4.68±0.32	7.568	0.776	0.08	LMXB
65	GX 5-1	1085.94±1.11	413.19±0.55	5.078	-1.018	0.29	LMXB
66	GRS 1758-258	21.41±0.42	33.35±0.35	4.507	-1.361	0.18	LMXB
67	GX 9+1	642.95±0.79	262.8±0.39	9.076	1.153	0.29	LMXB
68	IGR J18027-2016	3.5±0.36	7.56±0.33	9.419	1.038	0.59	HMXB
69	SAX J1806.5-2215	—	2.41±0.40	8.162	-0.698	1.13	LMXB
70	SGR 1806-20	2.57±0.28	1.98±0.25	9.99	-0.242	0.28	SGR
71	XTE J1810-189	2.73±0.38	3.74±0.28	11.363	0.058	0.43	LMXB
72	GX 13+1	366.6±0.5	116.36±0.43	13.516	0.108	0.16	LMXB
73	4U 1812-12	18.37±0.29	23.87±0.35	18.033	2.398	0.4	LMXB
74	GX 17+2	771.78±1.11	375.4±0.63	16.432	1.278	0.23	LMXB
75	XTE J1817-330	20.45±0.24	15.20±0.23	359.819	-7.994	0.25	LMXB/ВН
76	XTE J1818-245	2.15±0.29	—	7.423	-4.18	1.47	LMXB/ВН
77	H 1820-303	306.22±0.68	199.38±0.54	2.788	-7.913	0.13	LMXB
78	4U 1822-371	36.21±0.29	50.25±0.49	356.85	-11.291	0.15	LMXB
79	GS 1826-24	53.93±0.20	71.45±0.36	9.272	-6.088	0.31	LMXB
80	MAXI J1836-194	4.21±0.20	5.54±0.37	13.948	-5.356	0.16	LMXB/ВН
81	4U 1832-330	6.52±0.28	8.86±0.39	1.532	-11.37	0.25	LMXB
82	V1223 Sgr	5.12±0.27	6.9±0.68	4.953	-14.354	0.27	CV
83	HETE J1900.1-2455	21.15±0.28	26.6±0.40	11.303	-12.874	0.36	LMXB

^a Галактические координаты и отклонение от принятого положения.

^b LMXB – маломассивная рентгеновская двойная, HMXB – массивная двойная, HMXBe – Ве-система, SFXT – быстрый рентгеновский транзиент, CV – катаклизмическая переменная, ВН – кандидат в черные дыры, SGR – источник повторных вспышек, CL – скопление галактик.

^c Два близких неразрешенных источника, потоки и координаты даны для их суммарного излучения.

Таблица 3.4. Транзиентные источники, зарегистрированные только во время вспышек

Id	Источник	Поток ^a , мКраб		l ^b	b ^b	Δ ^b	Тип ^c	Орбита ^d
		5–10 кэВ	10–25 кэВ	°	°	'		
1	IGRJ16465-4507	16.55±2.10	18.36±1.59	340.049	0.132	1.24	SFXT	232
2	XTEJ1652-453	27.08±2.28	31.35±2.36	340.527	-0.793	0.4	XB/BH	844
3	XTEJ1709-267	42.1±1.83	—	357.469	7.911	0.22	LMXB	173
4	4U1711-34	—	38.02±3.29	352.057	2.752	0.92	LMXB	896
5	XTEJ1716-389	46.94±4.35	—	348.341	-0.332	0.72	HMXB	60
6	XTEJ1720-318	18.67±2.09	21.90±3.15	354.616	3.095	0.58	LMXB	58
7	IGR J17419-2802	—	11.38±1.01	0.343	1.162	0.49	—	362
8	XMMUJ 174445.5-295044	10.04±1.02	15.75±1.12	359.126	-0.313	0.12	—	1217
9	XMM J174457-2850.3	10.43±1.36	—	0.01	0.172	0.22	XB/NS	1200
10	IGR J17480-2446	722.73±4.62	395.90±3.45	3.842	1.687	1.30	LMXB	978
11	A1744-361	73.24±2.09	42.08±3.34	354.118	-4.194	0.46	LMXB	1088
12	AX J1749.1-2733	—	12.44±1.18	1.601	0.07	0.62	HMXB	110
13	2XMM J174931.6-280805	11.12±1.41	12.42±1.45	1.134	-0.315	0.40	LMXB	915
14	IGRJ17511-3057	24.75±0.84	30.85±1.15	358.88	-2.071	0.15	LMXB	846
15	XTEJ1751-305	11.88±1.03	11.44±1.08	359.182	-1.912	0.10	LMXB	546
16	AX J1754.2-2754	169.39±10.93	77.8±8.91	1.852	-1.105	0.32	LMXB	306
17	IGR J17544-2619	—	36.8±3.46	3.242	-0.335	1.44	SFXT	171
18	SAXJ1808.4-3658	42.42±2.54	46.32±4.65	355.383	-8.147	0.27	LMXB	729
19	V4722 Sgr	56.15±4.67	53.5±4.28	5.192	-3.433	0.56	LMXB	604
20	SWIFT J1816.7-1613	—	17.09±1.44	14.584	0.091	0.66	HMXB	668
21	IGR J18179-1621	—	40.96±2.56	14.6	-0.219	0.15	HMXBe	1146
22	SAX J1818.6-1703	—	63.69±5.68	14.087	-0.716	0.74	HMXB	411

^a Средний поток фотонов от источника во время указанной^d орбиты спутника.

^b Галактические координаты и отклонение от принятого положения.

^c LMXB – маломассивная рентгеновская двойная, HMXB - массивная двойная, HMXBe - Be-система, SFXT – быстрый рентгеновский транзиент.

^d Номер орбиты спутника INTEGRAL, во время выполнения которой произошла вспышка источника. Даты и время наблюдения можно найти на www.cosmos.esa.int/web/integral/schedule-information.

3.2 Глубокий обзор трех внегалактических площадок

В отличие от данных телескопа JEM-X, данные телескопа IBIS активно используются для проведения обзоров. Его большое поле зрения и высокая чувствительность позволили провести первые обзоры всего неба в жестком рентгеновском диапазоне: 17–60 кэВ (Кривонос и др., 2007), 17–100 кэВ (Бёрд и др., 2007) и 100–150 кэВ (Кривонос и др., 2015). Стоит отметить, что основная часть наблюдательных программ обсерватории INTEGRAL сконцентрирована на источниках, расположенных в Галактической плоскости, что естественным образом приводит к большей накопленной экспозиции в этой области. Кроме изучения отдельных источников, это позволило исследовать популяции галактических источников, таких как маломассивные рентгеновские двойные (Ревнивцев и др., 2008), катаклизмические переменные (Ревнивцев и др., 2008), массивные рентгеновские двойные (Лутовинов и др., 2005; Уолтер и др., 2015).

Однако, наблюдения в Галактической плоскости и, тем более, вблизи от Галактического центра имеют свою специфику. Большое количество ярких источников в поле зрения а так же вклад яркой диффузной компоненты, Галактического диффузного излучения (Кривонос и др., 2007), приводят к большему уровню систематических шумов, что приводит к тому, что не удается достичь максимальной ожидаемой чувствительности. В тоже время, на внегалактических площадках, где меньше плотность источников и отсутствует вклад диффузной галактической компоненты (вклад космического рентгеновского фона, безусловно присутствует) чувствительность обзора продолжает следовать зависимости $sensitivity \sim \sqrt{T_{exposure}}$ (Кривонос и др., 2010). Это позволяет проводить глубокие обзоры внегалактических площадок обсерваторией INTEGRAL. Подобные обзоры обычно выполняются фокусирующими рентгеновскими телескопами и имеют сравнительно небольшие площади, не более нескольких квадратных градусов. Главная их задача - изучение эволюции активных ядер галактик (АЯГ) и физических процессов питающих их. Однако, подобные обзоры малой площади

В течении нескольких последних лет на обсерватории INTEGRAL выполнялись наблюдения нескольких экстрагалактических областей - поля галактики M81, Большого Магелланова Облака и района вокруг скопления в Волосах Вероники. В каждом из этих полей была набрана экспозиция более 3 Мс, что сделало их привлекательными для проведения обзора, с целью получения выборки слабых АЯГ в плохо изученном диапазоне потоков 1-0.1 мКраб².

Большая часть экспозиции в поле галактик M81 и M82 была набрана в ходе изучения спектров ультраярких рентгеновских двойных (ULX) NoIX X-1 и M82 X-1 (Сазонов, Лутовинов и Кривонос, 2014), а также в ходе наблюдений вспышки сверхновой SN 2014J в M82 (Чуразов и др., 2014). Полная, скорректированная на мертвое время, экспозиция составила 9.7 Мс, максимум экспозиции приходится на положение M81.

Второе глубокое поле INTEGRAL - область Большого Магелланова Облака (БМО), с пиковой экспозицией в 6.8 Мс. Большая часть наблюдений была проведена в рамках

²В диапазоне 17–60 кэВ 1 мКраб равен 1.43×10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, а спектр Краба задается как $10(E/1)^{-2.1}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{кэВ}^{-1}$.

компании по поиску линий распада ^{44}Ti (Гребенев и др., 2012). На основе этих данных (накопленная экспозиция в 4.8 Мс) был опубликован обзор Гребенев и др. (2013), однако было решено использовать это поле, в связи со значительным увеличением экспозиции. Следует отметить, что это поле отличается от остальных, рассматриваемых в данной части, так как в нем присутствует множество рентгеновских двойных систем, расположенных в БМО.

Кроме того, значительная экспозиция была накоплена в областях примыкающих к Северному небесному полюсу в ходе наблюдений ярких АЯГ 3С 273 и NGC 4151, а также скопления в Волосах Вероники, полная площадь поля составила примерно 2500 кв. градусов, а пиковая экспозиция 9.3 Мс. Впервые, обзор этой области был опубликован Кривонос и др. (2005), а в более поздних работах (Кривонос и др., 2007) было показано что поверхностная плотность АЯГ в этом регионе выше, чем в среднем по небу, что возможно связано с наличием в близкой Вселенной суперструктуры в этом направлении. Позже это было подтверждено данными Swift/BAT (Ажелло и др., 2012). Функция светимости АЯГ в этой области по данным 4 Мс наблюдений INTEGRAL была получена Палтани и др. (2005).

3.2.1 Отбор и обработка данных

Стандартная схема наблюдений телескопа IBIS состоит из 25 (5×5) наведений, образующих квадратную сетку с шагом в 2.17° , расположенную так, что центр сетки совпадает с объектом наблюдений. Учитывая это, для проведения обзора использовались области размером $35^\circ \times 35^\circ$ для М81 и БМО и вдвое больше поле размером $35^\circ \times 70^\circ$ для поля Волос Вероники. Координаты центров полей в экваториальных координатах (эпоха J2000): поля М81 RA=85°.0, Dec=-69°.0, поля БМО RA=148°.9, Dec=69°.1 и поля Волос Вероники (или же 3С 273) RA=190°.0, Dec=17°.0. Для обзора использовались все общедоступные данные из архива обсерватории, полученные до конца июня 2015 года (1553 орбита). Использовались только данные ISGRI, полупроводникового детектора телескопа, поскольку он обладает наибольшей чувствительностью в выбранном диапазоне 17–60 кэВ.

Данные обрабатывались следующим образом: сначала данные пропускались через стандартный конвейер INTEGRAL Offline Scientific Analysis (OSA) 10.1 до уровня COR, чтобы применить актуальную энергетическую калибровку (Кабаллеро и др., 2013). Затем списки событий обрабатывались программным обеспечением разработанным в ИКИ РАН (см. детали в Кривонос и др. 2010 и Чуразов и др. 2014) чтобы получить индивидуальные изображения неба в диапазоне 17–60 кэВ для каждого сеанса наблюдений (т.н. “научное окно”, science window) средней продолжительностью в 2–3 кс. Подверженные высокому уровню фона индивидуальные изображения затем отфильтровывались, а все прочие складывались в одну мозаику.

Как уже было сказано ранее, во внегалактических полях телескоп IBIS работает в статистически ограниченном режиме и не подвержен сильному влиянию систематического шума. Это можно видеть из совокупного распределения пикселей всех трех мозаик

по значимости (т.е. по отношению сигнала к шуму для каждого конкретного пиксела) показанного на Рис. 3.10. Тот факт, что количество пикселей с отрицательными значениями совпадает с ожидаемым для нормального распределения (с нулевым средним и единично дисперсией) позволяет оценить долю “ложных” источников при заданном уровне значимости. В качестве предела детектирования источников было выбрано значение в 4σ : учитывая что полная площадь обзора составляет 4900 кв. градусов, что дает $\sim 1.2 \times 10^5$ независимых элементов с размером, совпадающим с угловым разрешением телескопа IBIS ($12'$). Таким образом во всех трех полях ожидается не более 4 ложных источников.

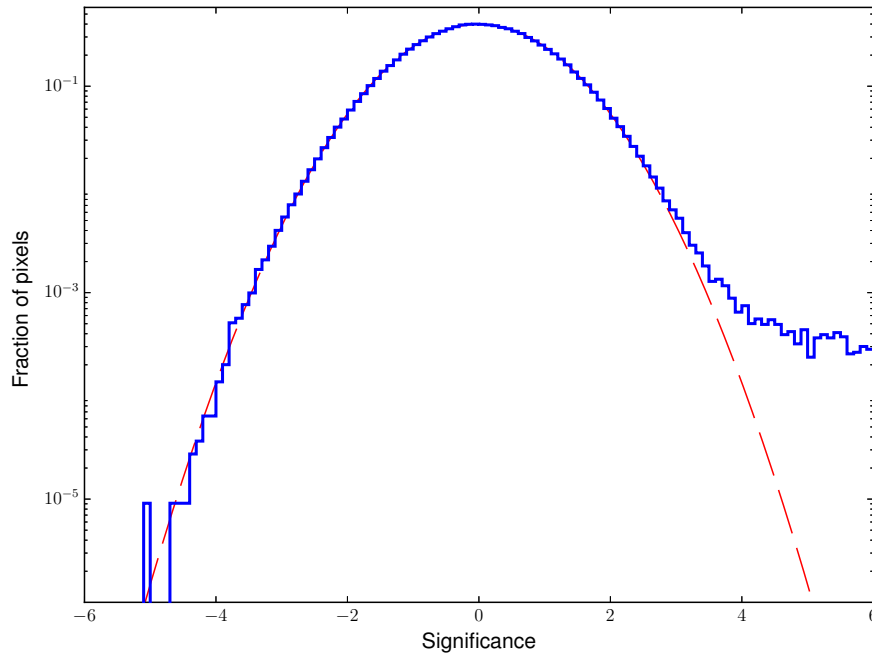


Рис. 3.10. Совокупное распределение пикселей всех трех мозаик по значимости (синие линии). Красная прерывистая линия соответствует нормальному распределению с нулевым средним и единично дисперсией.

3.2.2 Результаты обзора

На Рис. 3.11 показана зависимость покрытой площади от предельного детектируемого потока (4σ). Пиковая чувствительность обзора 0.18 мКраб (2.6×10^{-12} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$), 10% площади покрыто с чувствительностью лучше 0.25 мКраб (3.6×10^{-12} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$), а 90% с чувствительностью лучше 0.87 мКраб (1.2×10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$).

Всего на мозаиках 147 пиков со значимостью более 4σ . Мы сравнили список зарегистрированных источников с текущей версией каталога источников зарегистрированных обсерваторией INTEGRAL³, 70-ти месячным каталогом обсерватории Swift и

³<http://isdc.unige.ch/integral/catalog/39/catalog.html>

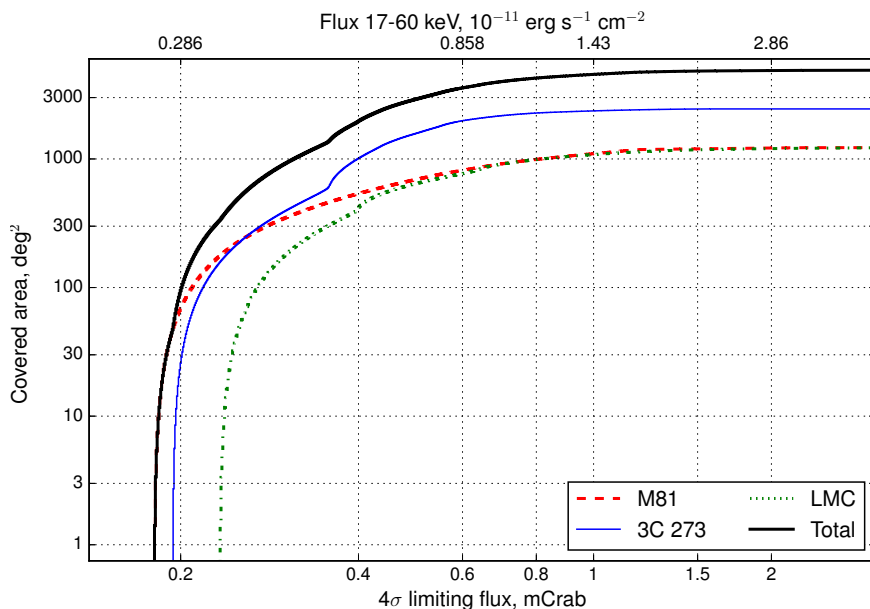


Рис. 3.11. Зависимость покрытой площади от чувствительности обзора (4σ), черной кривой показана суммарная площадь трех полей, красной, синей и зеленой линиями показаны чувствительности в полях M81, Волос Вероники и БМО.

каталогом источников из обзора всего неба Бёрд и др. (2016). Кроме того, мы использовали 66-ти месячный каталог составленный Палермской группой⁴ (Кусумано и др., 2010). Для всех отождествленных внегалактических источников мы искали в литературе измерения красного смещения или расстояния, используя базу данных NASA/IPAC Extragalactic Database⁵ (NED).

На Рис. 3.12 показаны карты значимости трех исследованных полей. Следует отметить отсутствие систематического шума в полях M81 и Волос Вероники, что свидетельствует о возможности проведения еще более глубоких обзоров телескопом IBIS. К сожалению, для поля БМО это не так, из-за большого количества относительно ярких источников, расположенных в самом БМО.

Высокоширотное поле M81 ($b^I \approx 40^\circ$) содержит 37 зарегистрированных источников: 28 известных АЯГ, среди которых 5 блазаров, один ULX (M82 X-1), две галактические рентгеновские двойные системы (MU Cam и DO Dra), парный источник SWIFT J1105.7+5854 с расстоянием между объектами $6'$ (что меньше $12'$ углового разрешения IBIS) (Баумгартнер и др., 2013) и 5 новых источников неизвестного типа. Самый удаленный АЯГ в поле - блазар QSO B0836+710 на $z = 2.172$ (Стикель и Кюхр, 1993). Таким образом большинство источников в этом поле имеют внегалактическую природу.

В поле БМО зарегистрировано 46 источников, 11 из которых ранее не были детектированы в жестком рентгеновском диапазоне. Как уже было упомянуто, в этом поле

⁴http://bat.ifc.inaf.it/bat_catalog_web/66m_bat_catalog.html

⁵<https://ned.ipac.caltech.edu/>

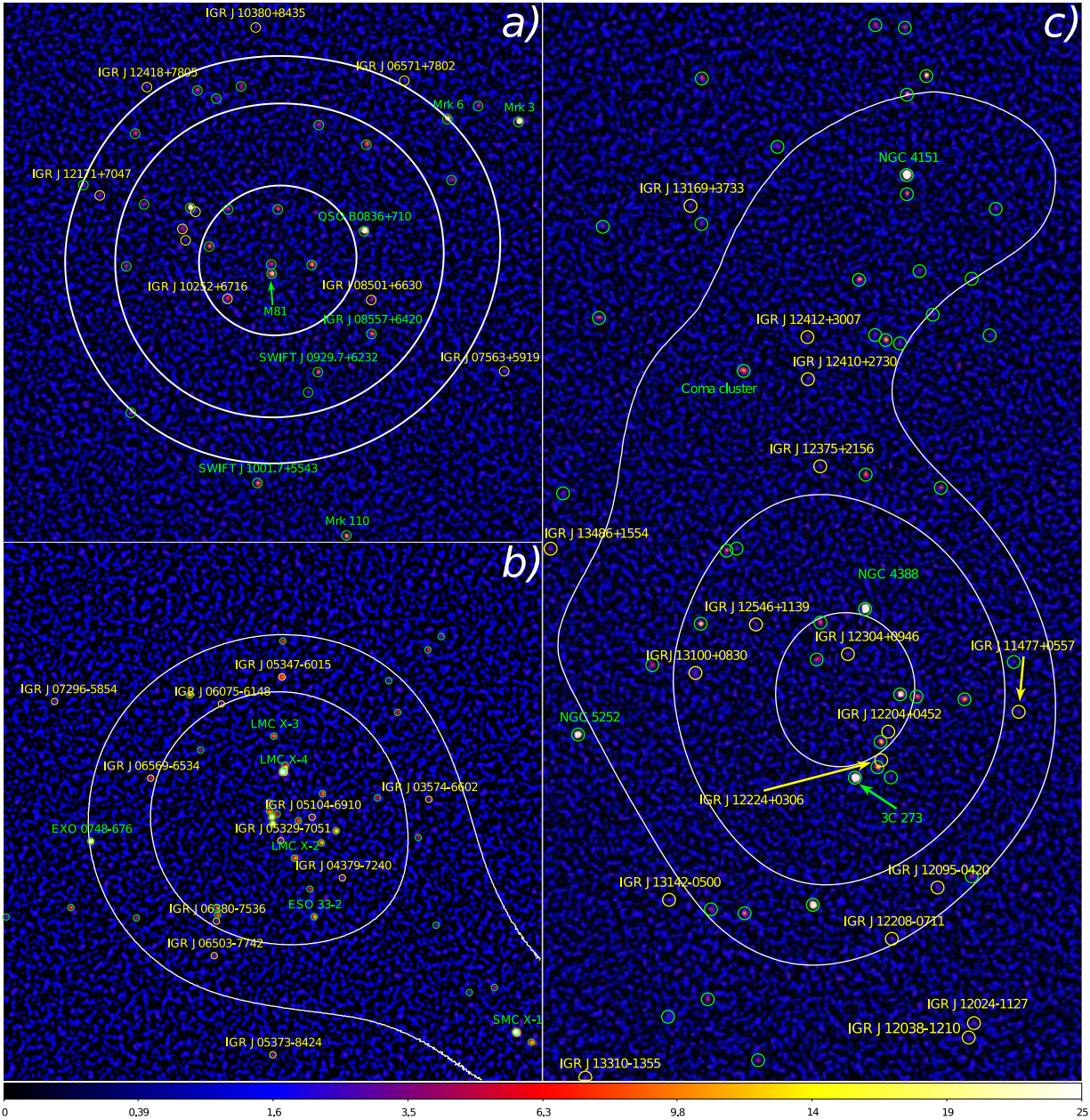


Рис. 3.12. Карты значимости полей М81, БМО и Волос Вероники в жестком рентгеновском диапазоне. Цветом указана значимость от 0 до 25. Желтыми кружками обозначены новые, а зелеными уже известные источники. Некоторые ярчайшие источники обозначены для более легкой навигации. На всех картах направление на север сверху, а на восток слева. а) поле М81. Максимальная экспозиция 9.7 Мс, контуры соответствуют экспозиции в 2, 4 и 8 Мс. б) поле БМО. Максимальная экспозиция 6.8 Мс, контуры соответствуют экспозиции в 2 и 4 Мс. в) поле Волос Вероники. Максимальная экспозиция 9.3 Мс, контуры соответствуют экспозиции в 2, 4 и 8 Мс.

содержится множество объектов расположенных в Магеллановых Облаках (и Большом, и Малом). Всего зарегистрировано 17 таких объектов, из них 13 массивных рентгеновских двойных, 2 маломассивные рентгеновские двойные и 2 пульсара. Кроме того в поле попала галактическая катаклизмическая переменная TW Pic. Из 21 известных внегалактических объектов 20 АЯГ (включая 3 блазара) и одно скопление галактик Abell 3266. Природа 7 объектов осталась неизвестна.

Ранее было сообщено о детектировании вблизи яркого (~ 20 мКраб) рентгеновского пульсара LMC X-4 двух жестких рентгеновских источников - IGR J05319–6601 (Гётц и др., 2006) и IGR J05305–6559 (Кривонос и др., 2007). Из-за их близости к LMC X-4 эти источники не разрешаются на полной, усредненной за все время, мозаике. Однако, примечательной особенностью LMC X-4 является периодическая модуляция рентгеновской яркости, от максимума до “выключенного” состояния. Используя выборку орбит, в течении которых источник находился в низком состоянии Гребенев и др. (2013) удалось показать, что в этой области присутствует также источник постоянного излучения, совпадающий с положением другого известного рентгеновского пульсара EXO 053109-6609.2. Этот результат был независимо подтвержден обнаружением EXO 053109-6609.2. в более мягком рентгеновском диапазоне 3–20 кэВ телескопом JEM-X, что позволило продемонстрировать что спектр этого источника в диапазоне 5–60 кэВ хорошо аппроксимируется степенным законом с экспоненциальным завалом на энергии около 12 кэВ, что является типичным для аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Позже, этот результат был подтвержден Мольков, Лутовинов и Фаланга (2015), который использовал для этого больший объем данных и уточненные эфемериды LMC X-4. Таким образом, можно утверждать, что оба ранее зарегистрированных источника являются, на самом деле, одним и тем же жестким компаньоном рентгеновского пульсара EXO 053109–6609.2. Кроме того, следует отметить, что, поскольку в данной работе время-разрешенный анализ не проводился, поток этого источника, обозначенного как IGR J05305–6559, может быть загрязнен вкладом яркого пульсара LMC X-4.

Поле Волос Вероники является самым большим в данном обзоре и естественным образом содержит наибольшее количество источников - 64, 16 из которых впервые детектированы в жестком рентгеновском диапазоне. Все 48 идентифицированных источника имеют внегалактическую природу, 47 из них - известные АЯГ (в.т.ч. 7 блазаров), а оставшийся - скопление галактик в Волосах Вероники. В этом поле расположен самый слабый из обнаруженных объектов - IGR J12304+0946 с потоком в 0.21 ± 0.05 мКраб (3.0×10^{-12} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$).

Следует отметить, что скопление Abell 3266 с потоком 0.64 ± 0.10 мКраб детектируется INTEGRAL впервые, хотя ранее оно было найдено в данных обзора Swift-BAT (Ажелло и др., 2009). В отличие от скопления в Волосах Вероники (Лутовинов и др., 2008) в котором INTEGRAL разрешает протяженное излучение, скопление Abell 3266 выглядит на изображении как точечный источник. На Рис. 3.13 приведены карты значимости для этих двух скоплений поверх которых нанесены контуры поверхностной яркости в диапазоне 0.1–2.4 кэВ, полученные телескопом ROSAT (Вогес и др., 1999).

Заметно, что области максимальной яркости в жестком и мягком диапазонах совпадают.

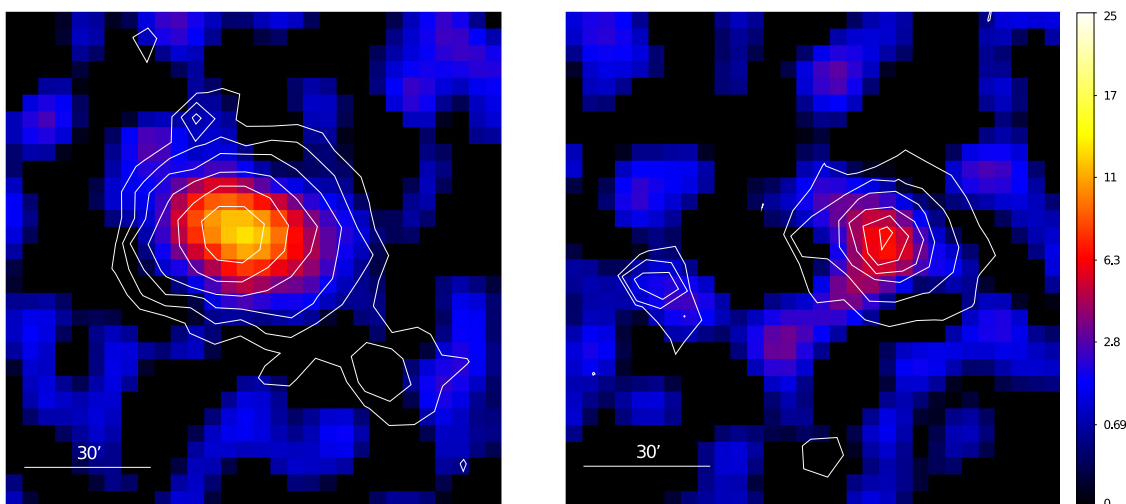


Рис. 3.13. Скопление в Волосах Вероники (слева) и скопление Abell 3266 на картах значимости в обзоре. Белыми линиями показаны профили поверхностной яркости 0.1–2.4 кэВ, полученные телескопом ROSAT.

Всего во всех трёх полях были зарегистрированы 147 источников, 37 из которых впервые обнаружены в жестком рентгеновском диапазоне. В поле БМО большую часть источников составили локальные - расположенные в БМО и ММО двойные системы, тогда как в остальных полях население практически полностью состоит из внегалактических источников.

На Рис. 3.14 показана зависимость потока детектированного источника от экспозиции, а также эмпирическая зависимость чувствительности от экспозиции $F_{\text{lim}}^{5\sigma} = 0.77 \times (T/\text{Ms})^{-0.5}$ мКраб (перемасштабированная с учетом выбранного предела детектирования в 4σ), полученная в Кривонос и др. (2010). Видно, что чувствительность обзора IBIS по прежнему увеличивается пропорциональна корню из экспозиции. Также видно двухкратное увеличение чувствительности по отношению к семилетнему обзору всего неба (Кривонос и др., 2010).

3.2.3 Идентификация новых источников

Для идентификации 37 новых источников мы использовали базы данных SIMBAD⁶ и HEASARC⁷, а также каталоги источников телескопов Swift-XRT (1SXPS, Эванс и др., 2014) и XMM-Newton (3XMM-DR5, Росен и др., 2016). Основываясь на архивных наблюдениях Swift-XRT и XMM-Newton мы отбирали компаньоны для наших источников,

⁶<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

⁷<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>

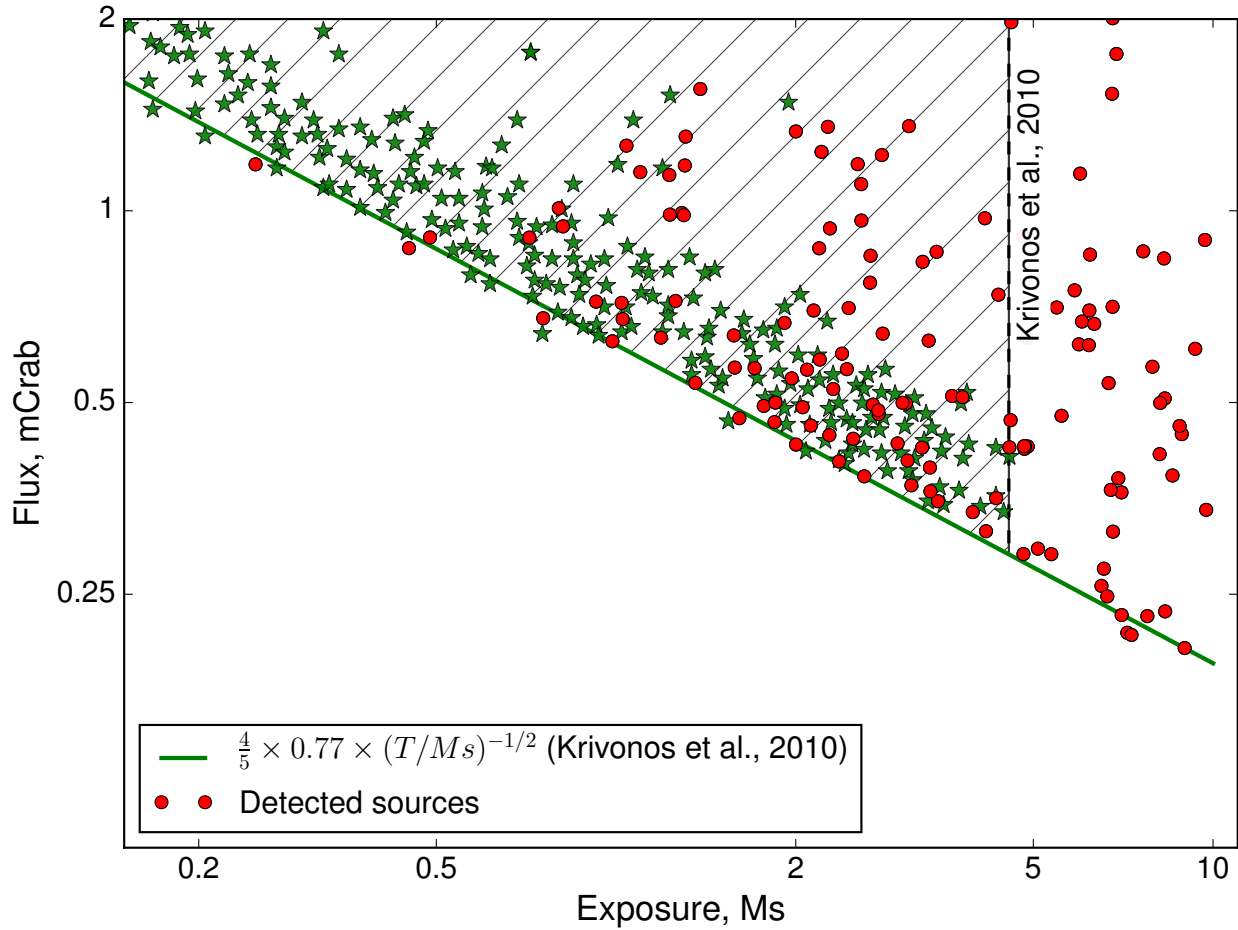


Рис. 3.14. Зависимость 4σ чувствительности от экспозиции. Красными кружками показаны источники из данной работы, зелеными звездами нанесены высокоширотные ($|b| > 15^\circ$) источники из семилетнего обзора всего неба (Кривонос и др., 2010). Зеленая линия обозначает эмпирическую зависимость номинальной чувствительности от времени.

используя типичный круг ошибок IBIS в $4.2'$ (2σ) вокруг наилучшего положения. В случае если в круг ошибок попадало несколько источников предпочтение отдавалось более яркому и имеющему более жесткий спектр, сопоставимый с измеренным потоком в диапазоне 17–60 кэВ. Всего мы отождествили с мягкими рентгеновскими компаньонами 13 из 37 источников. Еще в нескольких случаях мы предположили оптический компаньон, основываясь на совпадении координат с известным ярким оптическим источником, например АЯГ. Ниже рассмотрены несколько случаев, в которых для установления истинного компаньона жесткого источника требуются дополнительные наблюдения в мягком рентгеновском диапазоне.

IGR J08501+6630

Несмотря на то, что мягкого рентгеновского компаньона источника в архивах HEASARC обнаружить не удалось, в круге ошибок IBIS были обнаружены два ярких оптических/ИК источника: звезда переднего плана TYC 4134-706-1 и спиральная галактика MCG+11-11-029 (расположенная на $z = 0.037$) обращенная ребром к наблюдателю. Она и была предложена в качестве оптического компаньона для IGR J08501+6630. Отсутствие мягкого компаньона в обзоре всего неба ROSAT (Вогес и др., 1999) возможно указывает на сильное внутреннее поглощение.

IGR J05329–7051

Круг ошибок IGR J05329–7051 содержит один очевидный мягкий рентгеновский компаньон - *3XMM J053257.8 – 705112*, расположенный в $20''$ (Рис. 3.15) от определенного по данным INTEGRAL положения. Его поток в 0.2–12 кэВ составляет $\simeq 2 \times 10^{-13}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ (Росен и др., 2016). Его оптическим компаньоном является далекий АЯГ ($z = 1.238$, Козловский и др., 2012) MQS J053258.11–705112.9. Мы извлекли спектр из наблюдения XMM-Newton выполненного в октябре 2001 года (ObsId 0089210901, экспозиция 22 кс) и аппроксимировали его моделью `phabs*zpowerlw` из пакета XSPEC. Измеренное таким образом поглощение $N_H = (1.7 \pm 0.8) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ сопоставимо с поглощением Галактике в этом направлении, а фотонный индекс равен 2.2 ± 0.4 . Соответствующий модельный поток в диапазоне 0.2–1.4 кэВ $\sim 3 \times 10^{-13}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Если считать, что отождествление правильно, то светимость источника в жестком рентгеновском диапазоне оказывается равной $L_{17-60} \sim 3 \times 10^{46}$ эрг с^{-1} , таким образом данный АЯГ можно считать кандидатом в блазары.

IGR J13100+0830

В круге ошибок были обнаружены 4 мягких рентгеновских источника из каталога 1SXPS (Эванс и др., 2014), они показаны на Рис. 3.16, а их параметры (расстояние до IGR J13100+0830, темп счета и предполагаемый оптический компаньон) приведены в Таб. 3.5. В качестве возможного компаньона был предложен 1SXPS J131004.4+082936, как самый близкий и самый яркий (в диапазоне 2–10 кэВ), однако вклад соседних источников не исключен. Чтобы установить, который из источников является истинным компаньоном необходимы дополнительные наблюдения, например на телескопе NuSTAR.

3.2.4 Каталог источников

В каталог вошло 147 источников (их параметры приведены в Таб. 3.7), большая часть из которых внегалактические. Выборка АЯГ из 98 объектов включает в себя 64 Сейфертовские галактики, 16 блазаров, 7 АЯГ типа LINER (оптические спектры ядер таких галактик содержат ярковыраженные линии, соответствующие нейтральным или слабоионизованным атомам), 3 оптически нормальные, рентгеновски яркие галактики

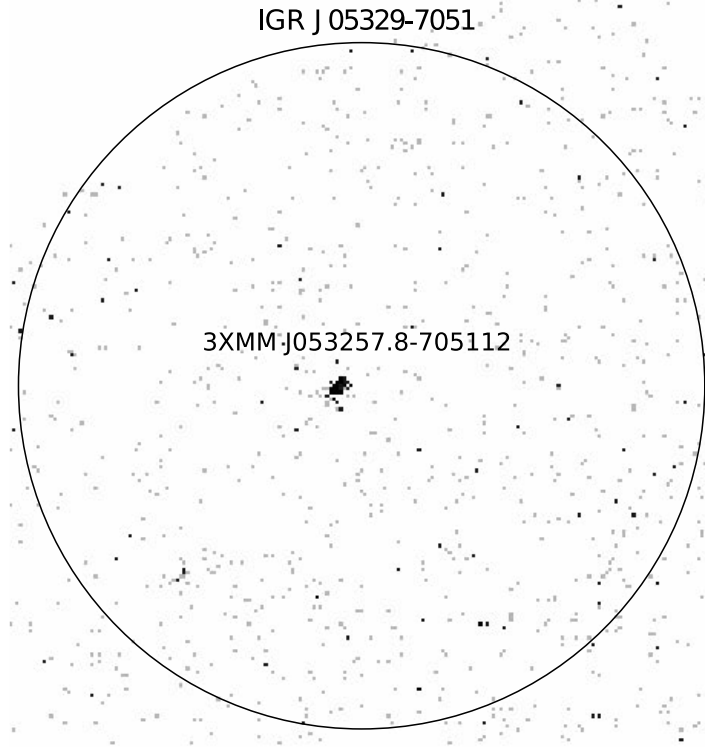


Рис. 3.15. Поле источника IGR J05329–7051 по данным XMM-Newton EPIC MOS в диапазоне 0.2–10 кэВ. Кружком обозначен регион ошибок INTEGRAL радиусом $4.2'$.

(XBONG) и 8 АЯГ неизвестного типа. В каталоге также присутствуют 25 неотождествленных источников. Полнота обзора составляет 83%.

Полученная выборка может использоваться для построения кривой подсчетов АЯГ, в предположении что они равномерно распределены в пространстве (это утверждение затем будет проверено). Из полной выборки была отобрана подвыборка, из которой были исключены M81, NGC 4151 и 3C 273, поскольку они являлись целями наблюдательных программ INTEGRAL, а так же оставшиеся (после исключения 3C 273) 15 блазаров. Эта подборка из 80 подтвержденных АЯГ впредь будет обозначаться как “чистая выборка”.

На Рис. 3.17 показана кумулятивная кривая подсчетов $\log N - \log S$, полученная из чистой выборки и поправленная на чувствительность обзора (Рис. 3.11). Кривая подсчетов хорошо аппроксимируется степенным законом $N(> S) = AS^{-\alpha}$. Методом максимального правдоподобия был оценен наклон $\alpha = 1.44 \pm 0.14$ степенного закона. Нормировка оказалась равной $A = (2.9 \pm 0.3) \times 10^{-3}$ градус $^{-2}$, на потоке в 2×10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Полученное значение наклона хорошо соответствует ожидаемому значению в $3/2$ для равномерно распределенных в пространстве объектов, хотя кривая подсчетов $\log N - \log S$ становится немного более плоской на потоках ниже $\simeq 6 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, что может быть вызвано неполнотой нашего обзора.

Учитывая, что все наши поля высокоширотные кажется разумным предположить, что большинство неотождествленных источников в обзоре являются внегалактически-

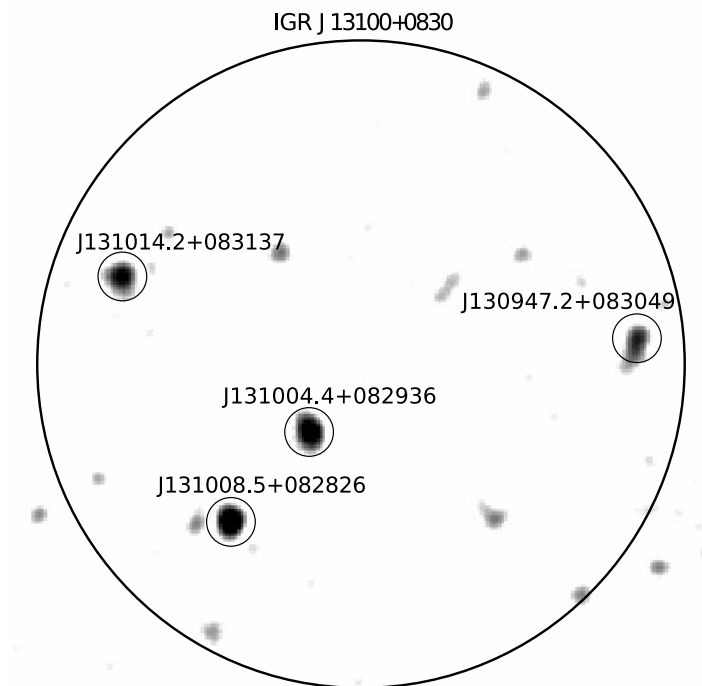


Рис. 3.16. Поле IGR J13100+0830 по данным Swift/XRT в диапазоне 0.3–10 кэВ. Большим кружком обозначен регион ошибок INTEGRAL радиусом $4.2'$, меньшими указаны источники из каталога 1SXPS (Эванс и др., 2014).

ми. Поскольку известно, что большинство подобных объектов в обзоре это АЯГ, то и неотожествленные объекты тоже скорее всего являются АЯГ. Путем добавления их к чистой выборке была получена “полная выборка АЯГ”, из 105 источников с жесткими рентгеновскими потоками до $\simeq 3 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Таким образом удалось продвинуться в область вдвое более низких потоков, по сравнению с кривой подсчетов полученной Кривонос и др. (2010) по результатам семилетнего обзора всего неба.

Тем же методом, что и для чистой выборки, был определен наклон степенного закона $\alpha = 1.56 \pm 0.13$ и нормировка $A = (3.1 \pm 0.3) \times 10^{-3}$ градус $^{-2}$ для потока 2×10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ (см Рис. 3.17 и Таб. 3.6). Полученные значения совпадают, в пределах погрешностей, с значениями для чистой выборки. Наклон совместим с ожидаемым (3/2), а нормировка немного меньше значения $(3.59 \pm 0.35) \times 10^{-3}$ градус $^{-2}$ полученного Кривонос и др. (2010) из обзора всего неба.

В 2015 году Харрисон и др. (2015) были опубликованы результаты глубокого внегалактического обзора, проведенного телескопом NuSTAR в жестком рентгеновском диапазоне 8–24 кэВ. Обзор NuSTAR покрывает существенно меньшую площадь ($\lesssim 10$ кв. градусов), по сравнению с проведенным обзором трех полей, но является гораздо более чувствительным. Это объясняется тем, что в отличие от IBIS работающего по принципу кодирующей апертуры, NuSTAR представляет собой фокусирующий рентгеновский телескоп. Можно сказать, что эти обзоры являются взаимодополняющими,

Таблица 3.5. Источники из каталога 1SXPS (Эванс и др., 2014) в 4.2' круге ошибок вокруг положения IGR J13100+0830.

1SXPS Id	Откл. ¹	R.A., Dec. (ошибка ²)	Поток, ³ 0.2–10 кэВ	Оптический компаньон (тип)
J131004.4+082936	1.1'	197.5184, 8.4935 (4.8")	$7.5^{+1.8}_{-1.6}$	SDSS J131004.26+082938.9 (QSOc, $z = 1.22$)
J131008.5+082826	2.6'	197.5356, 8.4741 (4.4")	$7.0^{+1.7}_{-1.5}$	SDSS J131008.34+082826.4 (галактика, $z = 0.27$)
J131014.2+083137	3.3'	197.5592, 8.5270 (4.9")	$8.0^{+1.8}_{-1.6}$	SDSS J131014.24+083135.9 (QSOc, $z = 1.55$)
J130947.2+083049	3.6'	197.4467, 8.5138 (5.3")	$3.0^{+1.1}_{-1.0}$	USNO-B1.0 0985-0230131 (звезда)

¹Отклонение от положения IGR J13100+0830 в минутах дуги.

² 90% доверительный радиус.

³ Поток в единицах 10^{-14} эрг с^{-1} см^{-2} в диапазоне 0.2–10 кэВ (и 1σ ошибка) для степенного спектра с $\Gamma=1.7$ и величиной поглощения равной Галактической в направлении на источник(см. Эванс и др., 2014).

т.к. большинство АЯГ в обзоре IBIS принадлежат локальной Вселенной ($z \lesssim 0.1$), а NuSTAR исследует АЯГ, расположенные на красных смещениях около единицы. Кроме того, за счет широкого поля зрения IBIS может обнаруживать сравнительно яркие АЯГ, поверхностная площадь которых мала, менее 1 на кв.градус, а NuSTAR может детектировать слабые объекты, регистрация которых телескопами с кодирующей апертурой требует неадекватно большой экспозиции или просто невозможна из-за больших поверхностных плотностей. Поэтому интересно сравнить результаты полученные Харрисон и др. (2015) и в обзоре трех полей. Поскольку обзоры проводились в разных энергетических диапазонах мы привели потоки, измеренные NuSTAR, из диапазона 8–24 кэВ в 17–60 кэВ, предполагая что все источники имеют одинаковый спектр - степенной закон с наклоном 1.7. Это сравнение приведено на Рис. 3.19. Кроме результатов NuSTAR, на Рис. 3.19 также приведены кривые подсчетов АЯГ полученные в семилетнем обзоре всего неба IBIS (Кривонос и др., 2010) и в шестидесятимесячном обзоре Swift-BAT (Ажелло и др. 2012, для перевода потоков из диапазона 15–55 кэВ в 17–60 кэВ использовался коэффициент из работы Кривонос и др. 2010). Хорошо видно, что наклоны кривых подсчетов локальных АЯГ выполненные IBIS и Swift-BAT хорошо согласуются с ожидаемым наклоном (3/2) на потоках более 10^{-12} эрг с^{-1} см^{-2} . С другой стороны, кривая подсчетов NuSTAR явно обладает более крутым наклоном (наилучшая аппроксимация дает ≈ 1.76 , Харрисон и др. 2015) на потоках ниже $\approx 10^{-13}$ эрг с^{-1} см^{-2} . Этот эффект может быть вызван эволюцией популяции АЯГ во времени (Харрисон и др., 2015).

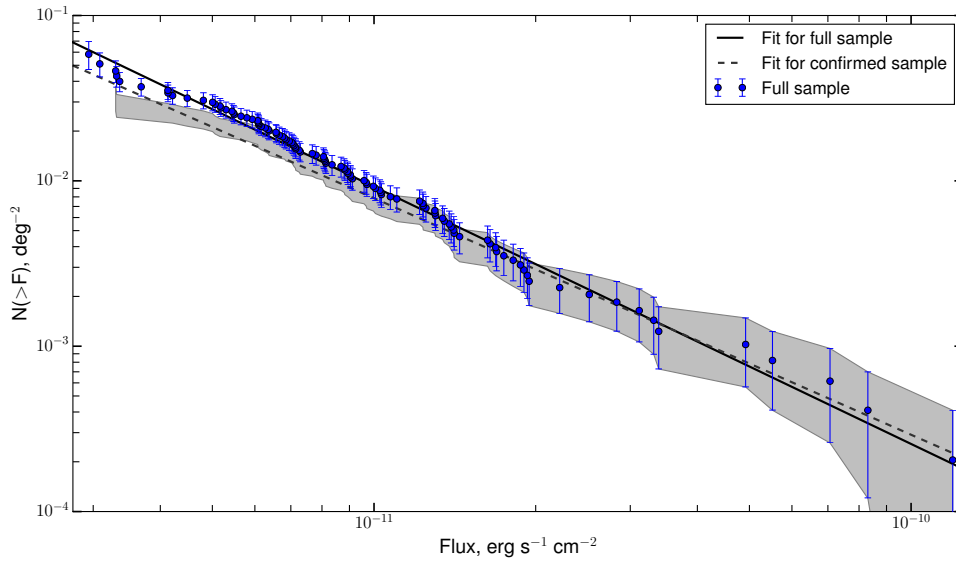


Рис. 3.17. Кривая подсчетов АЯГ (17–60 кэВ). Синими точками показана полная выборка АЯГ (80 подтвержденных АЯГ без блазаров и 25 неидентифицированных источников), а черная линия является наилучшей аппроксимацией степенным законом (параметры аппроксимации даны в Таб. 3.6). Серым показана область соответствующая 1σ ошибкам для чистой выборки из 80 АЯГ, соответствующая аппроксимация степенным законом показана серой прерывистой линией.

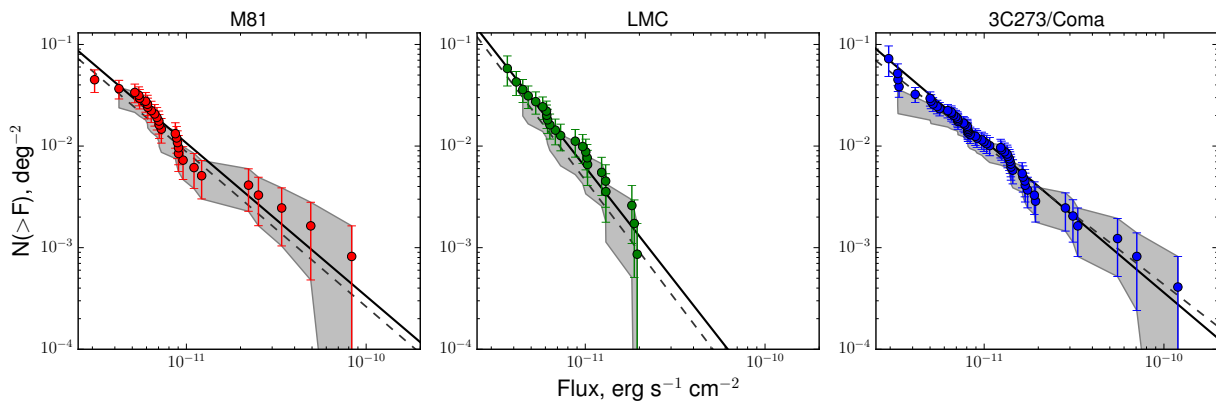


Рис. 3.18. Кривая подсчетов АЯГ (17–60 кэВ) для каждого из трех полей. Цветными точками показаны выборки из АЯГ (за исключением блазаров) и неидентифицированных источников, а черными линиями - наилучшие аппроксимации (параметры приведены в Таб. 3.6). Серым показаны области соответствующие 1σ ошибкам для чистых выборок без неидентифицированных источников, наилучшие аппроксимации для этих выборок показаны прерывистыми серыми линиями.

Таблица 3.6. Параметры наилучшей аппроксимации для кривых подсчетов и оценки на пространственную плотность АЯГ.

Параметр	Единицы	M81	LMC	3C 273/Coma	Total
log N -log S , параметры для полной выборки (подтвержденные АЯГ и неидентифицированные источники)					
α		1.51±0.23	2.26±0.36	1.50±0.17	1.56 ± 0.13
A^1	$\times 10^{-3}$ гр. ⁻²	3.8±0.7	1.3±0.3	4.0±0.5	3.1 ± 0.3
N^2		27	23	55	105
log N -log S , параметры для чистой выборки					
α		1.52±0.27	2.34±0.46	1.37±0.19	1.43 ± 0.14
A^1	$\times 10^{-3}$ гр. ⁻²	3.0±0.6	0.9±0.2	4.0±0.6	2.9 ± 0.3
N^3		22	16	42	80
N^4		12	5	27	44
N^5		9	4	18	31
Пространственные плотности АЯГ оцененные методом $1/V_{max}$					
ρ^6	$\times 10^{-5}$ Мпк ⁻³	14.8±11.6	3.2±2.1	5.4 ± 2.1	7.6 ± 3.5

¹ Нормировка A на потоке 2×10^{-11} эрг с⁻¹ см⁻².

² Число подтвержденных АЯГ (без блазаров) и неидентифицированных источников в поле

³ Число подтвержденных АЯГ (без блазаров).

⁴ Число подтвержденных АЯГ (без блазаров) на $D < 150$ Мпк.

⁵ Число подтвержденных АЯГ (без блазаров) на $D < 150$ Мпк с $L > 10^{42}$ эрг с⁻¹.

⁶ Плотность АЯГ с $D < 150$ Мпк и $L > 10^{42}$ эрг с⁻¹.

Далее полная выборка АЯГ была использована для того, чтобы построить кривые подсчетов каждого из трех внегалактических полей по отдельности (Рис. 3.18). Полученные наклоны и нормировки степенных законов приведены в Таб. 3.6. Параметры, полученные для поля М81 и поля Волос Вероники сопоставимы между собой, а кривая подсчетов АЯГ в поле БМО отличается существенно более крутым наклоном, хотя отличающимся менее чем на 2σ от наклона полученного для полной выборки. Очевидный недостаток ярких АЯГ (с потоками $> 2 \times 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$) в этом направлении был отмечен в работе Лутовинов, Гребенев и Цыганков (2012), тоже по данным обсерватории INTEGRAL.

Хорошо известно, что пространственное распределение галактик в локальной Вселенной является сильно неоднородным на масштабах $\sim 100\text{--}200$ Мпк (Яррет, 2004). Характерная чувствительность обзора IBIS $\sim 5 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ (17–60 кэВ) позволяет детектировать АЯГ со светимостями $L_* \sim 5 \times 10^{43}$ эрг с^{-1} (Сазонов и др., 2014; Сазонов, Чуразов и Кривонос, 2015) на даже больших расстояниях, вплоть до ~ 300 Мпк. Это подтверждается распределением источников по красному смещению и жесткой рентгеновской светимости (Рис. 3.20), построенному по чистой выборке. Таким образом, считая что доля АЯГ среди галактик в локальной Вселенной всюду одинакова, можно использовать кривые подсчетов АЯГ в каждом из полей для оценки плотности материи в этих направлениях (Кривонос и др., 2007; Ажелло и др., 2012).

В качестве грубой оценки можно сравнить количество АЯГ из чистой выборки расположенных на расстояниях $D < 150$ Мпк в каждом из полей. В поле М81 находится 12, в поле БМО - 5, а в поле Волос Вероники 27 таких объектов. Учитывая, что последнее поле в два раза больше по площади чем остальные, получается что разница в плотностях между полями не значительна. Более точную оценку можно получить используя метод $1/V_{max}$ (Шмидт, 1968; Хучра и Саргент, 1973). Анализ был ограничен АЯГ со светимостью более $L > 10^{42}$ эрг с^{-1} , лежащих на расстоянии не более $D < 150$ Мпк (т.е. внутри закрашенной серым области на Рис. 3.20). Ограничение по светимости было введено для того, чтобы исключить из рассмотрения самые тусклые АЯГ, которые могут быть детектированы в обзоре только если они расположены очень близко. Всего было отобрано 9, 4 и 18 АЯГ в полях М81, БМО и Волос Вероники, соответственно. Как видно из Таб. 3.6, плотность АЯГ в направлении на БМО наименьшая, однако статистически совместимая со средней плотностью по всем трем полям.

3.2.5 Заключение

Был проведен глубочайший обзор из выполненных обсерваторией INTEGRAL в жестких рентгеновских лучах: поля М81 и Волос Вероники были покрыты с экспозициями более 9 Мс, а поле БМО с экспозицией более 6 Мс. Достигнута пиковая чувствительность в 0.18 мКраб в диапазоне 17–60 кэВ. Всего в обзоре было зарегистрировано 147 источников со значимостью выше 4σ , 37 из которых обнаружены в жестком рентгеновском диапазоне впервые. Используя архивные данные мы отождествили 13 из этих но-

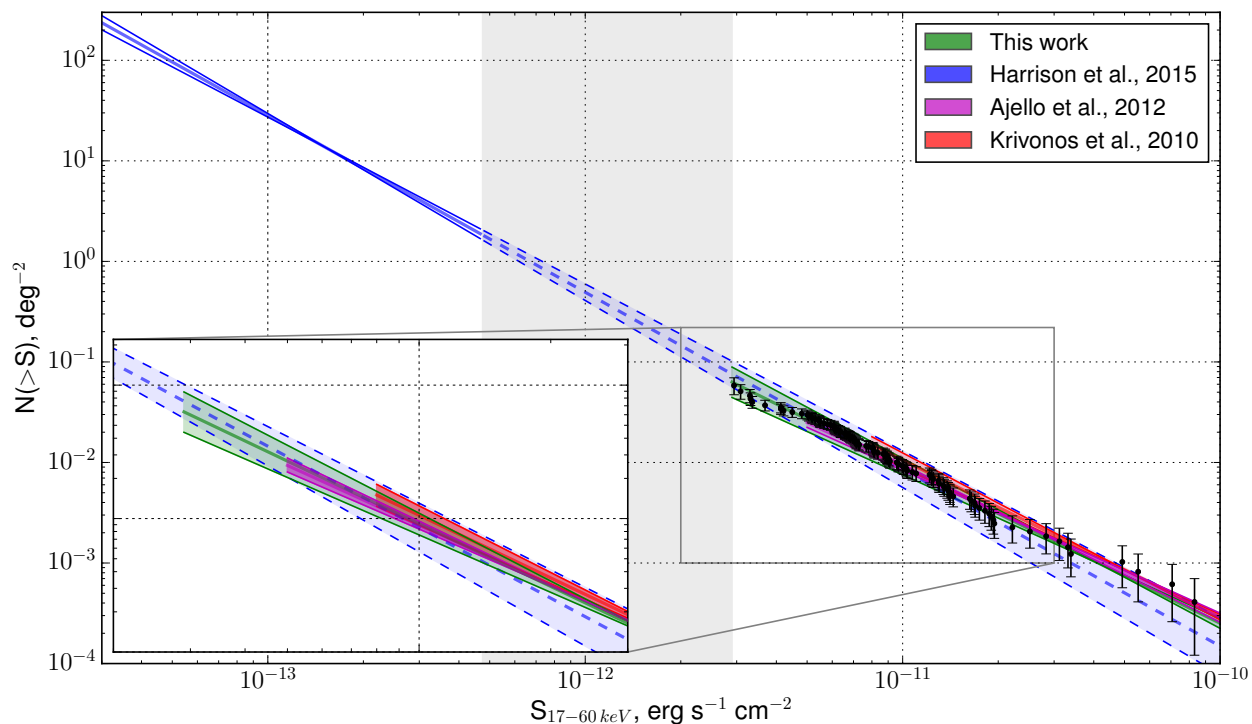


Рис. 3.19. Кривые подсчетов АЯГ в жестком рентгеновском диапазоне по данным различных миссий. Сплошными линиями показаны аппроксимации степенным законом (и соответствующие области ошибок) для следующих телескопов: синим - NuSTAR (Харрисон и др., 2015), фиолетовым Swift/BAT (Ажелло и др., 2012) и красным INTEGRAL/IBIS (Кривонос и др., 2010). Прерывистая синяя линия показывает экстраполяцию результатов NuSTAR в область высоких потоков. Черным изображена кривая подсчетов АЯГ, полученная в этой работе, а зеленым - наилучшая аппроксимация. Измерения NuSTAR и Swift/BAT переведены в диапазон 17–60 кэВ. Серым закрашена область в которой еще не проводились непосредственные измерения.

вых объектов. Полнота обзора составила 83%, 25 объектов (24 новых и SWIFT J0826.2–7033) остаются неидентифицированными.

Чувствительность обзора примерно вдвое выше чем в обзоре всего неба Кривонос и др. (2010). Кривые подсчетов, построенные по полученным данным хорошо аппроксимируются степенным законом до потоков в $\simeq 3 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Кривые подсчетов в полях М81 и Волос Вероники схожи между собой, а наклон кривой подсчетов БМО отличается от ожидаемого $-3/2$ на 2σ . Также в поле БМО наблюдается недостаток ярких АЯГ с потоками более 2×10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$.

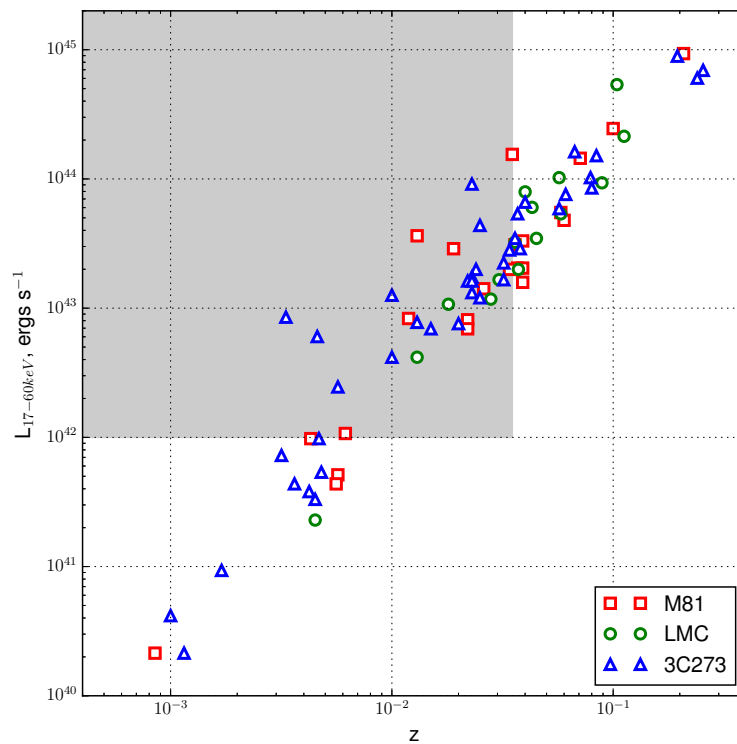


Рис. 3.20. Диаграмма светимость - красное смещение для отождествленных АЯГ (за исключением блазаров). Только источники из закрашенной области использовались для оценки пространственной плотности АЯГ.

Таблица 3.7: Каталог источников зарегистрированных в
обзоре трех полей.

Id	Name ¹	R.A. deg	Dec. deg	S/N	Flux mCrab	D Mpc	z	$\log L$ erg s ⁻¹	Type	Notes
Поле M81										
1	Mrk 3	93.950	71.039	39.4	5.81±0.15		0.013	43.56	Sy2	MU Cam
2	IGR J06253+7334	96.370	73.585	7.6	0.99±0.13		0.019	43.46	CV	
3	Mrk 6	103.043	74.427	22.4	2.37±0.11		0.300	45.34	Sy2	
4	IGR J06571+7802	104.277	78.044	4.2	0.47±0.11		0.100	44.39	Blazar	
5	QSO B0716+714	110.576	71.304	5.9	0.50±0.08		2.172	48.24	Blazar	
6	IGR J07563+5919	119.091	59.321	4.0	0.62±0.16		0.036	43.49	Sy1	MCG +11-11-032
7	PG 0804+761	122.929	76.034	9.4	0.63±0.07		0.035	41.64	Sy2	
8	QSO B0836+710	130.333	70.905	62.2	3.27±0.05	24.4	0.039	44.19	LINER	
9	IGR J08501+6630	132.547	66.515	6.9	0.38±0.06		0.026	43.52	Sy1	2MASX J09254750+6927532
10	IGR J08557+6420	133.839	64.391	11.2	0.67±0.06		0.039	43.15	Sy1.5	2MASX J09293791+6232382
11	NGC 2655	133.901	78.250	6.3	0.43±0.07		0.039	43.20	Sy1	MCG +10-14-025
12	Mrk 110	141.292	52.292	12.2	3.44±0.28		0.058	43.74	Sy2/NLRG	VII Zw 292
13	IGR J09253+6929	141.455	69.481	13.1	0.61±0.05			40.33	LINER	
14	SWIFT J0929.7+6232	142.413	62.556	10.2	0.62±0.06			41.99	ULX	
15	SWIFT J0935.9+6120	143.991	61.314	4.5	0.29±0.07		0.039	43.31	Sy2	NGC 3079
16	SWIFT J0950.5+7318	147.509	73.248	9.3	0.45±0.05		0.039	43.31	Sy2	2RXP J102510.2+671801,
17	M81	148.898	69.080	19.8	0.90±0.05	3.7	0.022	42.84	XBONG	KUG 1021+675
18	M82 X-1	148.973	69.675	7.5	0.34±0.05			41.99		CGCG 333-038
19	SWIFT J1001.7+5543	150.489	55.709	11.7	1.55±0.13	19.1	0.034	43.3	Sy2	MCG +12-10-067
20	IGR J10252+6716	156.324	67.273	7.9	0.38±0.05					
21	SWIFT J1033.6+7303	158.576	73.016	8.3	0.41±0.05					
22	IGR J10380+8435	159.513	84.587	4.4	0.63±0.14					
23	SWIFT J1044.1+7024	161.072	70.431	10.2	0.51±0.05					

Продолжение на следующей странице

Таблица 3.7 – продолжение

Id	Назв. ¹	R.A. гр.	Dec. гр.	S/N	Поток мКраб	D Мпк	z	$\log L$ эрг с ⁻¹	Тип	Замечания
24	QSO J1044+8054	161.240	80.862	5.7	0.50±0.09		1.260	46.84	Blazar	1SXPS J110148.6+722534, 4C 72.16
25	IGR J11015+7224	165.392	72.409	4.0	0.22±0.05		1.459	46.64	Blazar	IRXS J110257.6+702948 Double source (Sy2+blazar)
26	IGR J11030+7027	165.758	70.463	4.1	0.22±0.05					
27	SWIFT J1105.7+5854	166.456	58.913	6.0	0.67±0.11					
28	NGC 3516	166.694	72.566	31.9	1.76±0.06	52.5		42.92	Sy1.5	
29	IGR J11079+7106	166.992	71.109	6.6	0.36±0.05		0.060	43.68	AGN	IRXS J110748.8+710538, 2MASX J11074777+7105326
30	SWIFT J1114.3+7944	168.978	79.698	5.0	0.42±0.08		0.037	43.31	Sy2	MCG +13-08-056
31	SWIFT J1136.7+6738	174.155	67.595	6.8	0.47±0.07		0.134	44.53	Blazar	2MASX J11363009+6737042
32	SWIFT J1142.7+7149	175.909	71.686	6.2	0.42±0.07				CV	DO Dra
33	SWIFT J1143.7+7942	176.199	79.681	9.1	0.85±0.09	27.2		42.03	Sy1.2	UGC 06728
34	IGR J12171+7047	184.288	70.797	5.2	0.48±0.09	25.0		41.71	AGN	1SXPS J121726.3+704806, NGC 4250
35	Mrk 205	185.440	75.305	8.2	0.77±0.09		0.071	44.16	Sy1	
36	3PBC J1231.3+7044	187.944	70.746	4.6	0.49±0.11		0.208	44.97	Sy1.2	2MASS J12313656+7044144
37	IGR J12418+7805	190.462	78.084	4.2	0.49±0.12		0.022	42.91	Sy1.9	RX J1242.8+7807, NPM1G + 78.0048
Поле БМО										
38	IGR J01054-7253	16.223	-72.886	12.4	1.24±0.10				HMXB	2MASS J01044227-7254036
39	SMC X-1	19.285	-73.441	179.0	17.72±0.10				HMXB	
40	SWIFT J0157.8-7300	29.284	-73.063	5.2	0.52±0.10				HMXB	USNO-B1.0 0170-00064697
41	SWIFT J0208.4-7428	31.675	-74.470	4.0	0.40±0.10				HMXB	
42	SWIFT J0308.5-7251	46.950	-72.819	4.6	0.43±0.09		0.028	43.07	Sy1.2	ESO 031-8
43	IGR J03532-6829	58.344	-68.556	6.1	0.51±0.08		0.087	44.17	Blazar	PKS 0352-686
44	IGR J03574-6602	59.375	-66.043	4.0	0.37±0.09					
45	SWIFT J0422.7-5611	65.542	-56.183	4.5	0.91±0.20		0.043	43.78	Sy2	ESO 157-23
46	1H 0419-577	66.533	-57.184	7.6	1.27±0.17		0.104	44.73	Sy1.5	2MASS J04260071-5712017
Продолжение на следующей странице										

Таблица 3.7 – продолжение

Id	Назв. ¹	R.A. гр.	Dec. гр.	S/N	Поток мКр/аб	D Мпк	z	$\log L$ эрг с ⁻¹	Тип	Замечания
47	IGR J04288-6702	67.194	-67.075	6.0	0.43±0.07		0.059	43.91	Cluster	
48	Abell 3266	67.869	-61.462	6.6	0.64±0.10		0.059	43.91	Cluster	
49	IGR J04379-7240	69.492	-72.669	4.3	0.29±0.07		0.058	43.73	Sy2	ESO 118-033
50	SWIFT J0440.2-5941	70.056	-59.662	4.1	0.44±0.11		0.018	43.03	HMXB	
51	SWIFT J0451.5-6949	72.811	-69.795	18.2	1.14±0.06		0.045	43.54	Sy2	
52	ESO 033-G002	74.014	-75.526	12.7	0.91±0.07				HMXB	
53	IGR J05007-7047	75.235	-70.739	13.9	0.85±0.06				Sy1.9	2MASX J05043414-7349269
54	SWIFT J0504.6-7345	76.108	-73.810	7.3	0.48±0.07				AGN	2MASX J05052442-6734358
55	SWIFT J0505.6-6735	76.365	-67.567	10.0	0.62±0.06					
56	IGR J05104-6910	77.622	-69.170	4.3	0.26±0.06				HMXB	[HP99] 946
57	RX J0520.5-6932	80.060	-69.480	9.1	0.54±0.06				LMXB	
58	LMC X-2	80.225	-71.939	10.9	0.66±0.06				HMXB	
59	IGR J05305-6559*	82.864	-65.935	11.2	0.70±0.06				HMXB	2MASS J05324953-6622132
60	LMC X-4	83.197	-66.371	334.7	20.33±0.06		1.238	46.52	HMXB	3XMM J053257.8-705112, MQS J053258.11-705112.9
61	IGR J05329-7051	83.226	-70.853	4.2	0.25±0.06				Blazar?	
62	IGR J05346-5759	83.674	-57.992	7.9	0.87±0.11				CV	TW Pic
63	IGR J05347-6015	83.678	-60.258	10.0	0.86±0.09		0.057	44.01	Sy1	ISXPS J053430.8-601617, 2MASX J05343093-6016153
64	PSR J0537-6910	84.008	-69.124	8.2	0.31±0.06				Pulsar	
65	IGR J05373-8424	84.342	-84.408	4.5	0.72±0.16				HMXB	
66	LMC X-3	84.714	-64.069	10.7	0.70±0.07				HMXB	
67	LMC X-1	84.856	-69.759	26.1	1.53±0.06				HMXB	2MASS J05393883-6944356
68	PSR B0540-69.3	85.017	-69.327	34.4	2.01±0.06				Pulsar	
69	IGR J05414-6858*	85.387	-68.944	12.0	0.71±0.06				HMXB	XMMU J054134.7-682550
70	SWIFT J0541.5-6826	85.420	-68.398	6.2	0.36±0.06				HMXB	3XMM J060730.3-614827, ESO 121-G006
71	IGR J06075-6148	91.899	-61.814	4.2	0.34±0.08	19.9		41.36	AGN	
72	SWIFT J0623.3-6438	95.784	-64.580	6.0	0.43±0.07		0.129	44.46	Blazar	2MASX J06230765-6436211
73	IGR J06239-6052	95.925	-60.987	14.8	1.36±0.09		0.040	43.90	Sy2	ESO 121-28

Продолжение на следующей странице

Таблица 3.7 – продолжение

Id	Назв. ¹	R.A. гр.	Dec. гр.	S/N	Поток мКр/аб	D Мпк	z	$\log L$ эрг с ⁻¹	Тип	Замечания
74	SWIFT J0634.7-7445	98.712	-74.764	5.8	0.43±0.07		0.112	44.33	Sy1	2MASS J06340353-7446377
75	IGR J06354-7516	98.892	-75.249	9.8	0.74±0.08		0.653	46.31	Blazar	PKS 0637-752
76	IGR J06380-7536	99.525	-75.616	4.1	0.31±0.08		0.089	43.97	Sy1.8	2E 0639.5-7535, 2MASX J06374318-7538458
77	IGR J06503-7742	102.599	-77.701	4.4	0.41±0.09		0.0373	43.30	AGN	XMMSL1 J064954.6-774216, 2MASX J06495436-7742143
78	IGR J06569-6534	104.240	-65.570	6.2	0.51±0.08		0.0305	43.22	Sy1	RX J065630-65349, Fairall 265
79	IGR J07296-5854	112.413	-58.905	4.2	0.72±0.17					
80	SWIFT J0747.6-7326	116.989	-73.449	6.8	0.70±0.10		0.036	43.51	LINER?	2MASX J07473839-7325533
81	EXO 0748-676	117.097	-67.756	28.7	3.25±0.11				LMXB	
82	SWIFT J0826.2-7033	126.584	-70.527	9.2	1.31±0.14					1SXPS J082623.1-703143
83	IGR J09025-6814	135.680	-68.219	4.3	0.68±0.15		0.013	42.62	XBONG	NGC 2788A
Поле 3C 273										
84	SWIFT J1144.1+3652	176.118	36.924	5.9	0.56±0.10		0.038	43.46	Sy1	KUG 1141+371
85	IGR J11477+0557	176.931	5.966	4.6	0.40±0.09					
86	SWIFT J1148.3+0901	177.025	9.049	4.2	0.35±0.08		0.069	43.79	Sy1.5	2MASX J11475508+0902284
87	SWIFT J1148.7+2941	177.171	29.609	5.1	0.72±0.14		0.023	43.12	Sy1	MCG +05-28-032
88	3PBC J1152.9+3307	178.186	33.104	4.0	0.43±0.11		1.398	46.89	Blazar	7C 1150+3324
89	SWIFT J1200.8+0650	180.237	6.810	11.9	0.75±0.06		0.036	43.54	Sy2	2MASX J12005792+0648226
90	SWIFT J1201.2-0341	180.334	-3.696	5.6	0.58±0.10		0.020	42.88	Sy1	Mrk 1310
91	IGR J12024-1127	180.622	-11.460	4.3	0.91±0.21					
92	NGC 4051	180.769	44.522	19.9	2.18±0.11	14.0		41.86	Sy1	NGC 4051
93	IGR J12038-1210	180.958	-12.178	4.0	0.87±0.22					
94	NGC 4074	181.115	20.324	8.8	0.94±0.11		0.022	43.21	Sy2	NGC 4074
95	3PBC J1204.7+3109	181.121	31.193	4.9	0.55±0.11		0.025	43.08	Sy1.9	UGC 7064
96	SWIFT J1207.5+3355	181.949	33.854	4.6	0.44±0.10		0.079	44.01	Sy2	B2 1204+34
97	SWIFT J1209.5+4702	182.323	47.036	7.3	0.98±0.13		0.024	43.30	Sy2	Mrk 198
Продолжение на следующей странице										

Таблица 3.7 – продолжение

Id	Назв. ¹	R.A. гр.	Dec. гр.	S/N	Поток мКрАб	D Мпк	z	$\log L$ эрг с ⁻¹	Тип	Замечания
98	NGC 4138	182.363	43.688	12.8	1.33±0.10	20.7		41.99	Sy1.9	
99	IGR J12095-0420	182.394	-4.344	4.0	0.38±0.09			42.93	Sy1.5	NGC 4151
100	NGC 4151	182.628	39.408	305.2	27.67±0.09	13.4	0.023	43.24	Sy1.5	KUG 1208+386
101	IGR J12107+3822	182.671	38.343	10.8	0.97±0.09			41.97	LINER	
102	NGC 4180	183.253	7.036	10.7	0.57±0.05	39.2	0.061	43.88	Sy1	
103	Was 49	183.571	29.578	5.2	0.56±0.11			42.39	Sy1.2	NGC 4235
104	IGR J12172+0710	184.302	7.187	45.3	2.32±0.05	25.0	0.013	42.89	Sy1	
105	Mrk 766	184.600	29.828	13.2	1.35±0.10			40.97	Sy2	
106	NGC 4258	184.727	47.298	7.1	0.99±0.14	7.5	0.240	44.78	Sy1.8	PKS 1217+023
107	3PBC J1220.1+0203	185.022	2.065	4.1	0.23±0.06			44.94	Blazar	
108	IGR J12204+0452	185.120	4.868	4.6	0.24±0.05			44.84	QSO?	1SXPS J122208.8+030717, SDSS J122208.78+030718.4
109	IGR J12208-0711	185.212	-7.192	4.5	0.46±0.10			46.78	Blazar	
110	QSO B1218+304	185.351	30.169	6.0	0.60±0.10			43.21	Sy1.2	
111	IGR J12224+0306	185.606	3.110	4.3	0.23±0.05			45.93	Blazar	
112	4C 04.42	185.620	4.239	16.3	0.84±0.05			42.78	Sy2	
113	Mrk 50	185.851	2.689	16.0	0.86±0.05			40.62	Sy1.8	
114	QSO B1222+216	186.234	21.363	9.5	0.83±0.09			46.15	Blazar	
115	NGC 4388	186.449	12.663	155.7	8.36±0.05	20.6	0.158			
116	NGC 4395	186.456	33.552	13.6	1.22±0.09	4.5				
117	3C 273	187.279	2.052	249.7	13.46±0.05					
118	IGR J12304+0946	187.620	9.776	4.2	0.21±0.05					
119	IGR J12375+2156	189.392	21.944	4.3	0.36±0.08					
120	NGC 4579	189.412	11.804	9.5	0.50±0.05	19.8		41.52	LINER?	
121	SWIFT J1238.6+0928	189.665	9.440	9.2	0.46±0.05		0.032	43.22	AGN	VCC 1759
122	NGC 4593	189.925	-5.356	47.3	3.86±0.08	44.0	0.057	43.10	Sy1	
123	SWIFT J1240.9+2735	190.260	27.505	5.4	0.50±0.09			43.77	Sy2	KUG 1238+278A
124	IGR J12412+3007	190.302	30.125	5.4	0.49±0.09					
125	NGC 4736	192.686	41.151	4.5	0.50±0.11	5.0		40.33	LINER	
126	NGC 4748	193.078	-13.415	5.9	0.95±0.16		0.015	42.84	NLS1	

Продолжение на следующей странице

Таблица 3.7 – продолжение

Id	Назв. ¹	R.A. гр.	Dec. гр.	S/N	Поток мКраб	D Мпк	z	$\log L$ эрг с ⁻¹	Тип	Замечания
127	IGR J12546+1139	193.672	11.663	4.6	0.27±0.06		0.873	46.18	Blazar	RX J1254.6+1141, QSO B1252+119
128	3C 279	194.025	-5.806	11.9	1.10±0.09		0.536	46.28	Blazar	
129	Coma Cluster	194.892	27.932	13.0	1.18±0.09		0.023	43.34	Cluster	
130	SWIFT J1300.1+1635	195.072	16.545	4.7	0.35±0.08		0.080	43.93	Sy1	2MASX J13000533+1632151
131	Mrk 783	195.741	16.396	12.7	0.97±0.08		0.067	44.21	NLS1	
132	NGC 4941	196.042	-5.569	6.9	0.70±0.10	21.2		41.73	Sy2	
133	NGC 4939	196.067	-10.347	8.3	1.15±0.14	38.8	0.010	42.62	Sy2	
134	IGR J13091+1137	197.288	11.641	27.1	1.98±0.07		0.025	43.64	XBONG	NGC 4992
135	IGR J13100+0830	197.507	8.508	4.1	0.29±0.07					
136	IGR J13133-1109	198.319	-11.177	4.1	0.68±0.17		0.034	43.45	Sy1	2MASX J13130580-1107424
137	NGC 5033	198.357	36.583	5.2	0.64±0.12	18.7		41.58	Sy1.9	
138	IGR J13142-0500	198.557	-5.014	4.1	0.47±0.12					
139	IGR J13149+4422	198.823	44.434	8.2	1.14±0.14		0.037	43.73	Sy2	Mrk 248
140	IGR J13169+3733	199.237	37.553	4.1	0.54±0.13		0.195	44.95	AGN	RX J1317.0+3735, 2MASS J13170290+3735329
141	SWIFT J1321.2+0859	200.271	8.941	7.3	0.63±0.09		0.032	43.35	LINER?	NGC 5100 NED02
142	IGR J13310-1355	202.756	-13.931	4.0	1.18±0.29					
143	NGC 5252	204.555	4.550	43.5	4.94±0.11		0.023	43.96	Sy1.9	
144	Mrk 268	205.300	30.392	8.8	1.18±0.13		0.040	43.82	Sy2	
145	3PBC J1342.0+3539	205.546	35.699	5.9	1.01±0.17	16.0		41.64	Sy1.9	NGC 5273
146	IGR J13466+1921	206.696	19.404	4.6	0.57±0.12		0.084	44.18	Sy1.2	2MASX J13462846+1922432
147	IGR J13486+1554	207.168	15.901	4.8	0.57±0.12					

¹ Ранее не зарегистрированные в жестком диапазоне (17 – 60 кэВ) выделены жирным. В погоках источников отмеченных звездочкой возможна систематическая ошибка из-за слипания источников.

3.3 Обзор Галактической плоскости

Как уже было сказано, большую часть доступного времени обсерватория INTEGRAL наблюдает источники, расположенные в Галактической плоскости. Это дает возможность проведения глубоких обзоров Галактической плоскости, подобных проведенных (Кривонос и др., 2012). Эти обзоры крайне важны, поскольку позволяют изучить “тусклый” конец функции светимости галактических рентгеновских двойных - как массивных, так и маломассивных.

Для проведения глубокого обзора Галактической плоскости были использованы все доступные данные, полученные обсерваторией за 14 лет наблюдений. Всего было отобрано 79234 наблюдений, полной продолжительностью ~ 130 Мс. Были построены шесть пересекающихся мозаик неба размером $70^\circ \times 35^\circ$ (с центрами на галактических долготах $l = 0^\circ, \pm 50^\circ, \pm 115^\circ, 180^\circ$) в картезианской проекции. Таким образом, карты неба покрывают область Галактической плоскости с $|b| < 17.5^\circ$. Пиковая чувствительность составила 2.2×10^{-12} эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ в диапазоне 17–60 кэВ или 0.15 мКраб. Таким образом, в этом обзоре была превзойдена чувствительность обзора трех внегалактических полей (0.18 мКраб). 90% площади обзора (12680 кв. градусов) было покрыто с чувствительностью лучше 1 мКраба. Было зарегистрировано 402 источника со значимостями более 4.7σ , не более чем один источник может быть флуктуацией фона, в предположении Пуассоновской статистики. В областях вокруг ярких источников, таких как GRS 1915+105, Crab, Sco X-1 и других, а также в области Галактического центра применялся ручной отбор кандидатов в источники, из-за повышенного уровня систематических шумов. Как видно из Рис. 3.21, в этом обзоре INTEGRAL должен был увидеть все постоянные источники со светимостями выше 10^{35} эрг с $^{-1}$ в балдже Галактики.

Всего было детектирован 41 новый источник жесткого рентгеновского излучения. Для каждого из этих источников был предпринят поиск мягких рентгеновских компаньонов в каталогах 1SXPS и 3XMM-DR5, а так же в каталоге источников из обзора неба обсерваторией ROSAT. Область поиска составляла $3.2'$. Всего было найдено 11 мягких компаньонов. Скорее всего, четыре из этих источников являются АЯГ, проецирующимися на плоскость Галактики. Еще один источник проецируется на ядро близкой галактики NGC 2578, причем в более мягком обзоре Rosat в этой области источников не регистрируется, что позволяет предположить что данный объект является поглощенным АЯГ. Полный список источников и их мягких рентгеновских и оптических компаньонов приведен в Таб. 3.3.

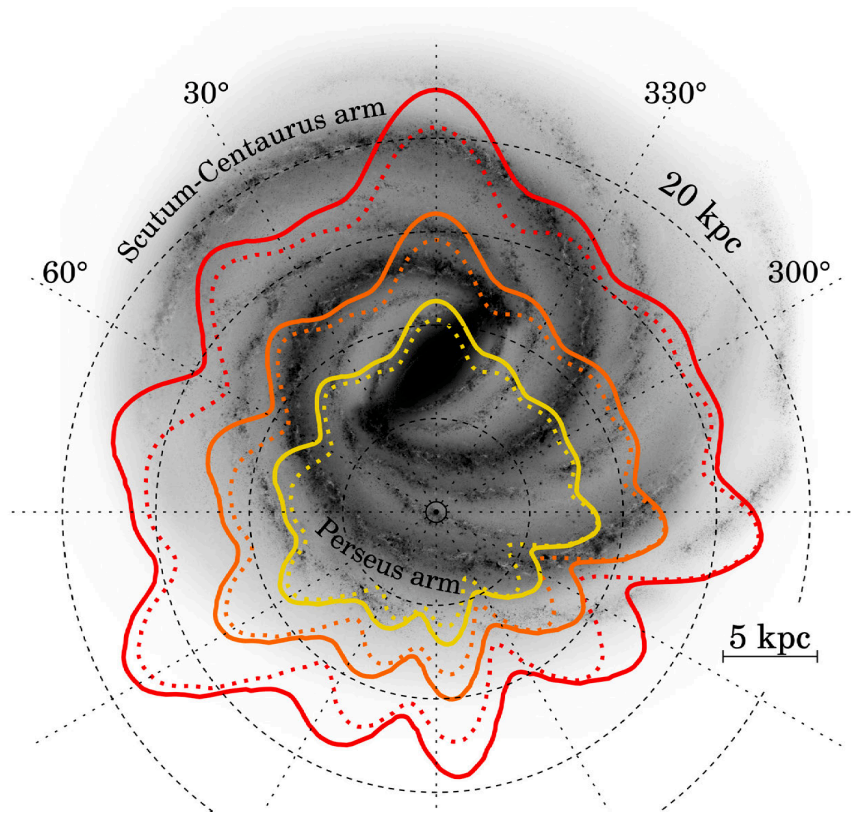


Рис. 3.21. Вид сверху на Млечный путь (взято из Чёрчвелл и др., 2009). Сплошными линиями показаны расстояния до которых постоянные источники со светимостью в 0.5 , 1 и 2 на 10^{35} эрг с^{-1} желтые, оранжевые и красные линии, соответственно) в диапазоне 17 - 60 кэВ могли быть зарегистрированы в 14 летнем обзоре Галактической плоскости телескопом IBIS

Список новых жестких рентгеновских источников найденных в 14-летнем обзоре Галактической плоскости

No.	Название ¹	RA ² (deg)	Dec ² (deg)	Поток ³ (17–60 keV)	S/N	Тип ⁴	Soft X-ray counterpart	Optical/IR counterpart
1	J01017+6519	15.440	65.330	0.61 ± 0.08	8.0			
2	J07141+0146	108.547	1.744	1.44 ± 0.24	6.0			
3	J08215–1320	125.387	-13.339	0.98 ± 0.14	6.9	AGN?		NGC 2578, PGC023449
4	J08321–1808	128.022	-18.141	1.11 ± 0.15	7.3	AGN?	1SXPS J083158.6-180840	
5	J09278–3935	141.965	-39.590	0.66 ± 0.12	5.7			
6	J09331–4725	143.302	-47.441	0.57 ± 0.09	6.2			
7	J11299–6557	172.490	-65.960	0.58 ± 0.10	5.8	AGN?	1RXS J112955.1–655542	2MASS J11295643–6555218
8	J12086–6327	182.157	-63.452	0.54 ± 0.09	6.0			
9	J12489–5930	192.161	-59.507	0.49 ± 0.09	5.5			
10	J12529–6351	193.241	-63.868	0.49 ± 0.09	5.5			
11	J14417–5533	220.427	-55.550	0.69 ± 0.09	7.4	AGN?	1RXS J144116.4–553329	2MASS J14411645–5533306
12	J15550–4306	238.769	-43.090	0.50 ± 0.09	5.7			
13	J16459–2325	251.477	-23.428	1.39 ± 0.13	11.0			
14	J17040–4305	256.010	-43.080	0.44 ± 0.07	6.2		1RXS J170406.3–430637	
15	J17158–2124	258.959	-21.411	0.59 ± 0.08	7.5			
16	J17326–3445	263.169	-34.754	0.29 ± 0.06	5.2		1RXS J173251.1–344728	
17	J17327–4405	263.183	-44.103	0.62 ± 0.09	6.9			
18	J17422–2108	265.560	-21.106	0.25 ± 0.05	5.0			
19	J17570–2500	269.266	-25.015	0.34 ± 0.05	6.4			
20	J17596–2315	269.907	-23.266	0.39 ± 0.06	6.9			
21	J18010–3045	270.271	-30.764	0.37 ± 0.05	7.2			
22	J18013–3222	270.326	-32.371	0.34 ± 0.05	6.4			
23	J18044–1829	271.107	-18.487	0.45 ± 0.07	6.3			
24	J18070–3507	271.750	-35.132	0.30 ± 0.06	4.9			
25	J18102–1751	272.555	-17.853	0.55 ± 0.07	7.4			
26	J18112–2641	272.854	-26.707	0.48 ± 0.06	8.7			
27	J18141–0606	273.525	-6.114	0.45 ± 0.09	5.1			
28	J18147–3400	273.690	-34.010	0.54 ± 0.06	8.6			
29	J18165–3912	274.136	-39.202	0.61 ± 0.09	7.0			

Продолжение на следующей странице

Продолжение

No.	Name ¹	RA ² (deg)	Dec ² (deg)	Flux ³ (17–60 keV)	S/N	Type ⁴	Soft X-ray counterpart	Optical/IR counterpart
30	J18172–1944	274.307	-19.740	0.55 ± 0.07	7.6			
31	J18184–2352	274.610	-23.880	0.96 ± 0.06	15.2	CV?	MACHO 311.37389.3983	
32	J18263–1345	276.576	-13.753	0.55 ± 0.08	6.6	PWN?		
33	J13545–5958	208.621	-59.982	0.54 ± 0.09	6.4			
34	J18544+0839†	283.605	8.661	0.50 ± 0.08	6.7			
35	J19071+0716	286.783	7.274	0.40 ± 0.07	5.7		1SXPS J190706.3+072004	
36	J19305+1851	292.632	18.857	0.78 ± 0.10	7.7	SNR?	1RXS J193029.9+185205	
37	J19421+3613	295.530	36.219	0.61 ± 0.09	6.6			
38	J19577+3339	299.429	33.658	0.46 ± 0.08	5.6			
39	J19504+3318†	297.615	33.311	0.63 ± 0.09	7.4		1RXS J195020.5+331419	
40	J21099+3533	317.490	35.560	0.71 ± 0.11	6.6			
41	J21133+3154	318.328	31.923	0.75 ± 0.15	4.8		1RXS J211319.3+315211	

¹INTEGRAL (IGR) обозначение источника. Крестами † помечены источники, расположенные в областях с высоким систематическим шумом, измеренные потоки могут содержать вклад от ярких соседних источников.

²Экваториальные координаты, эпоха J2000

³Измеренный поток 17–60 кэВ $\times 10^{-11}$ эрг см⁻²с⁻¹.

⁴Тип объекта: AGN – активное ядро галактики, SNR – остаток сверхновой; CV – катаклизмическая переменная; PSR – отдельный пульсар или плерион (PWN). Вопросительным знаком помечены источники с неточной идентификацией

Глава 4

Транзиентные источники

4.1 “Провалившаяся” вспышка рентгеновской новой GRS 1739-278

4.1.1 Введение

Рентгеновская новая GRS 1739-278 была открыта телескопом SIGMA обсерватории GRANAT во время яркой вспышки в 1996 г. (Поль и др., 1996). В последующем детальном исследовании этого уникального события вместе с обсерваторией GRANAT (Варгас и др., 1997) участвовали обсерватории ROSAT (Грейнер и др., 1996), RXTE и Kvant-TTM (Бороздин и др., 1998). Были проведены наблюдения источника оптически телескопами ESO, что позволило отождествить оптический компаньон (Марти и др., 1997). Максимальный поток фотонов от источника составил ~ 800 мКраб в диапазоне 2–10 кэВ (Бороздин и др., 1998). Поведение источника во время вспышки было типичным для кандидатов в черные дыры (Гребенев и др., 1993; Ремиллард и МакКлинтон, 2006; Беллони, 2010). Кривая блеска вспышки имела характерную форму FRED (fast rise - exponential decay) с быстрым подъемом и медленным экспоненциальным спадом. В начале вспышки источник находился в “низком жестком” спектральном состоянии, его рентгеновский спектр хорошо аппроксимировался единым степенным законом вплоть до энергий ≥ 100 кэВ. После достижения максимума вспышки в спектре появилась чернотельная компонента — источник перешел в “высокое мягкое” состояние (Бороздин и др., 1998). Радионаблюдения на VLA (Дурошо и др., 1996) обнаружили радиокомпаньон объекта с переменным излучением, что свидетельствовало о появлении у GRS 1739-278 струйных выбросов (джетов). (Бороздин и Трудолюбов, 2000) обнаружили квазипериодические осцилляции рентгеновского потока от источника (QPO) на частоте 5 Гц в наблюдениях спутника RXTE, во время которых он находился в “очень высоком мягком” спектральном состоянии. В “высоком мягком” состоянии QPO не регистрировалось.

Сначала монитор всего неба ASM обсерватории RXTE, а начиная с 2003 г. — обсерватория INTEGRAL регулярно просматривали область центра Галактики. Вплоть до 2013 г. источник оставался в “выключенном” состоянии. Согласно Кривонос и др. (2010)

верхний предел на интегральный по времени наблюдений обсерваторией INTEGRAL поток фотонов от GRS 1739-278 в диапазоне 20–60 кэВ составлял 0.12 мКраб (3σ , 1 мКраб равен 1.23×10^{-11} эрг см^{-2} с^{-1}).

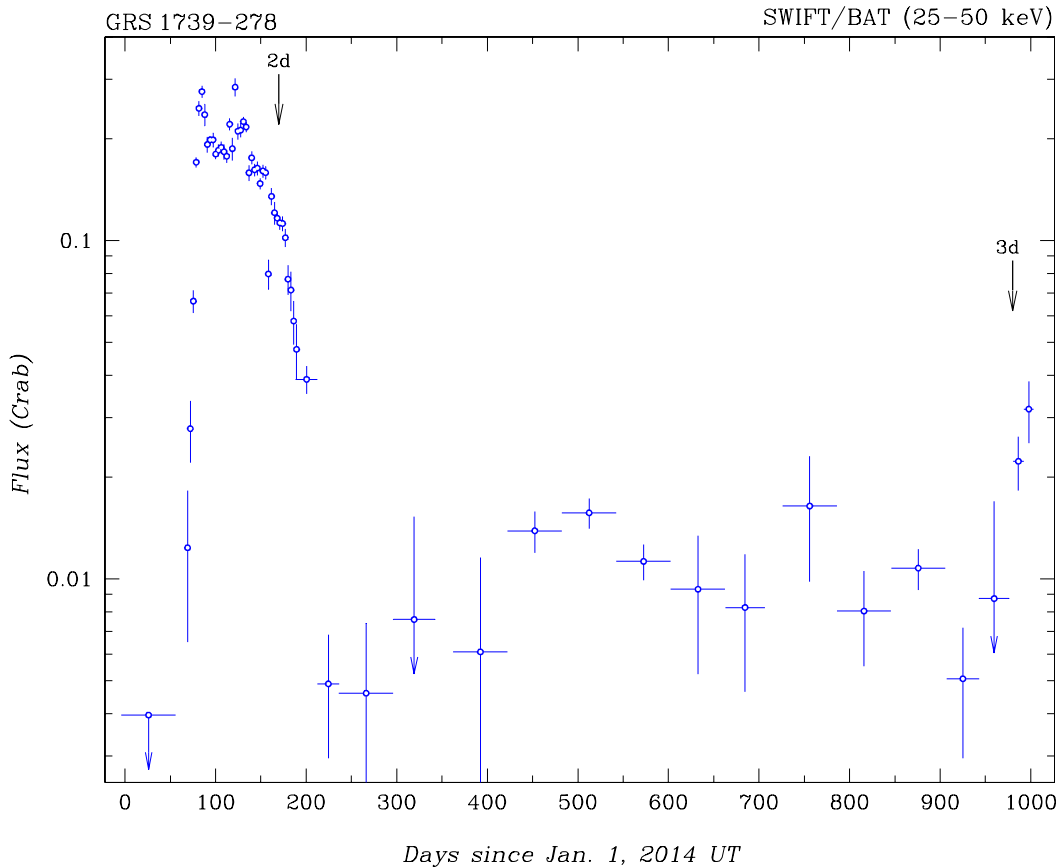


Рис. 4.1. Кривая блеска рентгеновской новой GRS 1739-278 в диапазоне 25–50 кэВ по данным телескопа BAT обсерватории Swift с января 2014 г. по сентябрь 2016 г. (MJD 56658–57661). Хорошо видны мощная вторая вспышка источника и начало третьей (обозначены “2” и “3” соответственно). Временное разрешение во время вспышек составляет 6 дней, между ними — 2 месяца.

В 2014 г. была зарегистрирована вторая вспышка источника (Филишова и др., 2014). Она оказалась более слабой, максимальный поток в диапазоне 2–20 кэВ во время вспышки не превышал уровня ~ 200 мКраб по данным обсерватории MAXI¹. На Рис. 4.1 показана кривая блеска во время второй вспышки и после неё по данным телескопа Swift-BAT в диапазоне энергий 25–50 кэВ. В этом диапазоне максимальный поток достиг почти ~ 300 мКраб, что свидетельствует о жесткости спектра излучения

¹<http://maxi.riken.jp/top/index.php?cid=1&jname=J1742-277>

источника. Из рисунка видно, что хотя вспышка формально закончилась спустя ~ 150 дней после её начала, поток от источника не упал до нуля, а остался на уровне 5–15 мКраб. До второй вспышки он был намного ниже, никакой значимой активности от источника не наблюдалось. Рисунок показывает, что в конце августа - начале сентября 2016 г. поток от источника начал резко расти, что позволило Мереминскому и др. (2016) объявить о начале третьей вспышки. Впрочем, это было сделано не по данным телескопа Swift-BAT, а по данным телескопа IBIS обсерватории INTEGRAL в ходе оказавшихся очень своевременными интенсивных сканирующих наблюдений этой области (по заявке Р.А.Сюняева, Кривонос и др., 2012б). В данной работе для исследования хода развития этой вспышки мы использовали все доступные для нас в настоящее время данные обсерватории INTEGRAL, как по упомянутой заявке, так и полученные в ходе наблюдений по программе мониторинга Галактического балджа (PI: Куулкерс). Использовались также данные двух наблюдений источника обсерваторией Swift, инициированных сообщением Мереминского и др. (2016) и выполненных 21 и 24 сентября (MJD 57652 и 57655), и его наблюдения телескопом РТТ-150 26 сентября (MJD 57657.7).

4.1.2 Наблюдения

Основные результаты были получены с помощью телескопа IBIS/ISGRI (Лебран и др., 2003; Убертини и др., 2003) обсерватории INTEGRAL (Винклер и др., 2003). IBIS/ISGRI — широкоугольный телескоп (полное поле зрения равно $30^\circ \times 30^\circ$ FWZR) с кодирующей апертурой, чувствительный в жестком рентгеновском диапазоне 20–300 кэВ. Угловое разрешение телескопа $13'$ FWHM позволяет уверенно разрешать источник GRS 1739-278, несмотря на его расположение в ближайшей окрестности Галактического центра, плотно заселенной популяцией компактных рентгеновских источников (рис. 4.2). Второй телескоп обсерватории INTEGRAL — JEM-X, данные которого использовались в работе, чувствителен в стандартном рентгеновском диапазоне 3–35 кэВ (Лунд и др., 2003). Поле зрения телескопа JEM-X (диаметром 13.2°) существенно меньше чем у IBIS/ISGRI, из-за чего источник GRS 1739-278 наблюдался заметно реже и с меньшей экспозицией. Область неба вблизи источника наблюдалась обсерваторией INTEGRAL с 29 августа по 27 сентября 2016 г. (MJD 57629–57658), во время орбит спутника 1719–1729 (за исключением орбит 1723 и 1724, в которых проводились калибровочные наблюдения Крабовидной туманности). Отметим, что после коррекции орбиты в 2014 г. ее период уменьшился до 64 часов.

Анализ данных телескопа IBIS/ISGRI начинался с энергетической калибровки событий (обработки списка событий до уровня COR) с использованием стандартного программного обеспечения обсерватории OSA версии 10.1. Далее для получения изображения, кривых блеска и спектров источника данный список событий обрабатывался с использованием специального программного обеспечения, разработанного в ИКИ РАН (Кривонос и др., 2007; Чуразов и др., 2014). Из данных телескопа JEM-X в OSA 10.1 для каждого индивидуального наблюдения извлекались изображения (уровень IMA), даль-

нейшая обработка проводилась в соответствии с процедурами, описанными в Части 3.1.

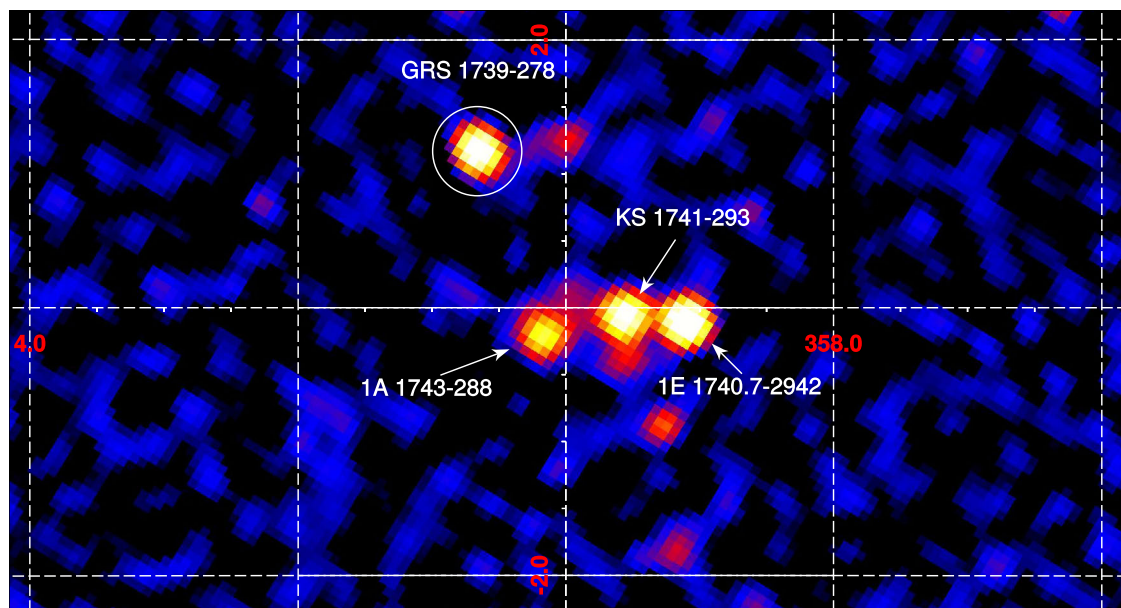


Рис. 4.2. Изображение области галактического центра (карта отношения сигнала к шуму) по данным телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL (20–60 кэВ). Это — мозаика отдельных изображений, полученных во время наблюдений этой области в период с 14 по 21 сентября 2016 г. Горизонтальная центральная ось соответствует галактической плоскости.

Наблюдения обсерваторией Swift были начаты сразу же после обнаружения новой вспышки источника (Нейлсен и др., 2016). Первое наблюдение (ID. 00033812055, далее для краткости обозначаемое как ID. 55) было выполнено 21 сентября (MJD 57652). Телескоп XRT обсерватории наблюдал источник GRS 1739-278 в режиме Photon Counting в течении ~ 1 кс. Второе наблюдение (ID. 56) было проведено через три дня, 24 сентября (MJD 57656). Данные были обработаны с помощью стандартного программного обеспечения телескопа `xrtpipeline` (v.0.12.6, Барроус и др. (2005); Эванс и др. (2009)). С помощью программы `xrtexmap` была построена карта экспозиции, использовавшаяся в дальнейшем для генерации ARF файлов, содержащих информацию об эффективной площади телескопа на разных энергиях. Для построения спектра данные группировались так, чтобы иметь по крайней мере 100 фотонов в одном энергетическом канале. К сожалению, во время этих наблюдений темп счета фотонов от источника был недостаточным для анализа переменности на масштабах секунд и минут.

В инфракрасном диапазоне наблюдения поля вблизи рентгеновского источника GRS 1739-278 были выполнены 26 сентября 2016 г., в 16:50 UT (MJD 57657.701) на Российско-Турецком 1.5-м телескопе при помощи редуктора поля зрения и спектрографа TFOSC. Наблюдения проводились в сложных условиях, на больших зенитных

углах, качество изображений составило около $2.5''$. Были получены прямые изображения в фильтрах r' и i' с экспозицией 300 с.

4.1.3 Результаты

На рис. 4.2 показано интегральное изображение (карта отношения сигнала к шуму S/N) поля рентгеновской новой GRS 1739-278, полученное по данным телескопа IBIS/ISGRI в диапазоне 20–60 кэВ в сентябре 2016 г. (орбиты 1725–1727). На этой карте источник регистрируется на уровне $S/N \simeq 34$ (экспозиция наблюдений составила 62 кс). Указаны также другие обычно яркие рентгеновские источники 1E 1740.7-2942, KS 1741-293 и 1A 1743-288.

На рис. 4.3 показана кривая блеска источника, построенная по данным телескопа IBIS/ISGRI в диапазоне 20–60 кэВ для всех наблюдений, имеющихся в нашем распоряжении. Впервые значимо источник был зарегистрирован 3 сентября 2016 г. с потоком фотонов в 11.1 ± 3.1 мКраб. На рисунке хорошо видны следующие особенности вспышки: медленный рост потока в течение первых ~ 10 дней, ровное “плато” на уровне ~ 30 мКраб продолжительностью около 8 дней, затем быстрое падение потока до уровня ~ 15 мКраб, вблизи которого он оставался по крайней мере еще несколько дней до конца наших наблюдений. Эта картина сильно отличается от поведения источника во время вспышки 2014 г., когда в начале вспышки интенсивность источника в диапазоне 15–50 кэВ увеличилась в десять раз за 8 дней (по данным телескопа BAT, Крим и др. (2014); см. также Рис. 4.1) и достигла ~ 300 мКраб.

В ходе анализа нами были построены и исследованы фотонные спектры источника, полученные телескопом IBIS/ISGRI отдельно для каждой из орбит 1725, 1726 и 1727, во время которых он имел максимальную яркость, а также суммарный спектр для орбит 1728–1729, на спаде его блеска. Все спектры хорошо аппроксимируются простым степенным законом с фотонным индексом $\Gamma \sim 1.7 - 2.0$ (см. Таб. 4.1) без признаков степенного завала на высоких энергиях. Использовалась модель `wabs*powerlaw` пакета XSPEC (Арно, 1996).

В ходе наблюдений источника телескопом Swift-XRT, выполненным на спаде его рентгеновской яркости, он был зарегистрирован на уровне 1.28 ± 0.04 отсч. с^{-1} (отношение $S/N \simeq 30$) в диапазоне 0.5–10 кэВ. Построенные по данным телескопа XRT спектры, также как спектры телескопа IBIS/ISGRI, не содержат каких-либо особенностей и хорошо аппроксимируются простым степенным законом с поглощением. Полученное значение поверхностной плотности нейтрального водорода (предполагалось нормальное солнечное обилие) в направлении на источник $N_{\text{H}} \sim 2.3 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ согласуется с измеренным ранее значением (Миллер и др., 2015). Спектральные параметры модели наилучшей аппроксимации спектров приведены в Таб. 4.2. Ясно, что спектральный индекс излучения в этом узком диапазоне можно было определить лишь с большими ошибками из-за сильной корреляции с величиной фотопоглощения (N_{H}).

Также были реконструированы широкополосные рентгеновские спектры источника с использованием его квазиодновременных наблюдений обсерваториями INTEGRAL и

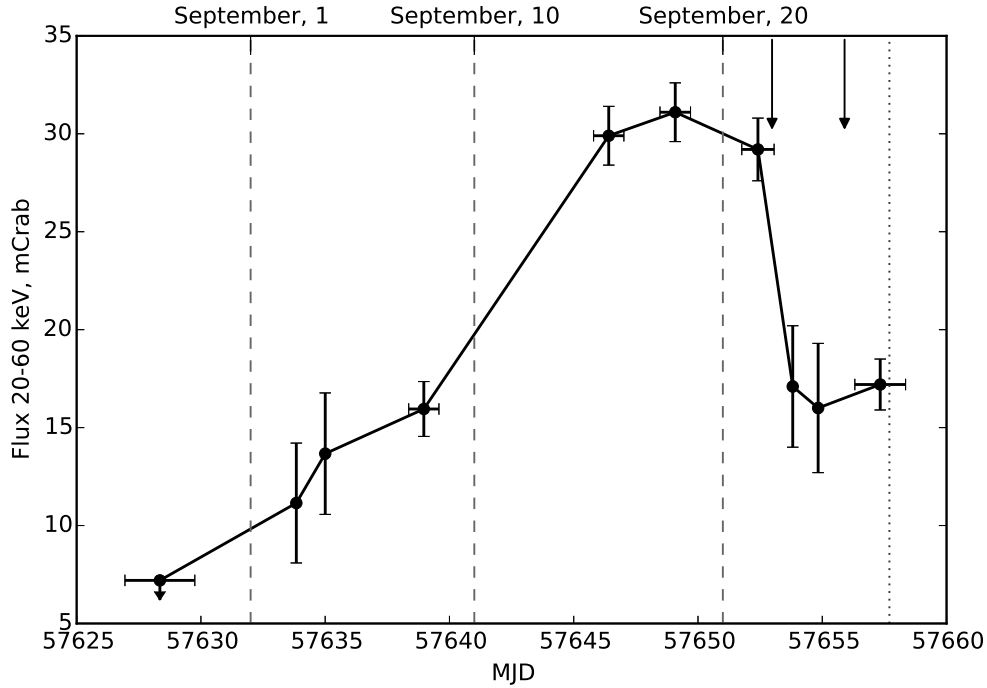


Рис. 4.3. Кривая блеска рентгеновской новой GRS 1739-278 в диапазоне 20–60 кэВ во время ее третьей вспышки, построенная по данным телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. Стрелками указаны моменты проведения наблюдений телескопом Swift-XRT. Период наблюдений на PTT-150 обозначен вертикальной прерывистой линией.

Swift. Для улучшения значимости использовались усредненные спектры, измеренные телескопом ISGRI/IBIS в 1725–1727 и в 1728–1729 орбитах. Спектр, полученный тремя телескопами (XRT 0.3–10 кэВ, JEM-X 5–20 кэВ, IBIS/ISGRI 20–152 кэВ), аппроксимировался одновременно, как и выше, в пакете XSPEC моделью `wabs*powerlaw`. Для учета неодновременности наблюдений и различий в калибровке были введены коэффициенты C_{JEM-X} и C_{XRT} , учитывающие относительные нормировки данных телескопа INTEGRAL–JEM-X и телескопа Swift-XRT относительно данных INTEGRAL–IBIS/ISGRI), покрывающим наибольший временной интервал (напомним, что время видимости источника для телескопа JEM-X много меньше времени его видимости для телескопа IBIS/ISGRI). Широкополосный спектр, полученный вблизи максимума блеска источника (для орбит 1725–1727), приведен на Рис. 4.5. Такой же широкополосный спектр излучения, но без данных телескопа JEM-X был построен для орбит 1728–1729.

Параметры моделей наилучшей аппроксимации приведены в Таб. 4.3. Спектр, полученный во время “плато”, хорошо описывается выбранной моделью (значение χ^2_N , нормированное на степень свободы, равно 0.51. Найденное из аппроксимации значение поверхностной плотности водорода, определяющее фотопоглощение в спектре в пред-

Таблица 4.1. Результат аппроксимации спектров излучения источника GRS 1739-278 в диапазоне 20–100 кэВ, полученных телескопом IBIS/ISGRI в отдельных наблюдениях (орбитах).

Орбита	Дата наблюдения, MJD		Поток ^a 10 ⁻¹⁰ эрг см ⁻² с ⁻¹	Г ^b
	Начало	Конец		
1725	57645.8	57647.0	5.8±2.6	1.73±0.12
1726	57648.5	57649.7	5.6±2.6	1.98±0.12
1727	57651.9	57653.1	5.2±2.8	1.84±0.14
1728–1729	57653.7	57658.3	3.0±1.9	1.81±0.16

^a Поток в диапазоне 20–100 кэВ.

^b Фотонный индекс.

положении нормального солнечного обилия элементов, равно $(2.3 \pm 0.2) \times 10^{22}$ см⁻² во время “плато”, и $(1.7 \pm 0.2) \times 10^{22}$ см⁻² во время затухающей фазы. Оба значения близки к полученной ранее (Грейнер и др., 1996; Миллер и др., 2015) величине в $\simeq 2.1 \times 10^{22}$ см⁻². Хотя данные Таб. 4.3 свидетельствуют об ужесточении спектра (с $\Gamma \simeq 1.86$ до $\Gamma \simeq 1.73$), мы не можем утверждать это с достоверностью. В спектре отсутствуют указания на тепловое чернотельное излучение диска и излучение в флуоресцентной линии Fe K α . В отличие от данных обсерватории NuSTAR (Миллер и др., 2015; Фюрст и др., 2016), полученных во время предыдущей вспышки источника, степенной закон в его спектре продолжается до энергий ~ 150 кэВ без явных признаков экспоненциального завала (с характерными энергиями завала $\leq 40 - 50$ кэВ). Следует отметить, что наблюдения разных телескопов являлись квазиодновременными, а источник демонстрировал переменность как минимум на фактор 2 во время его нахождения на “плато”. Это объясняет сравнительно большие кросс-калибровочные коэффициенты (0.44 и 0.33 для JEM-X и XRT соответственно), из-за которых оказывается сложно точно оценить истинную (непоглощенную) светимость источника. Если использовать в качестве основы данные телескопа IBIS/ISGRI, как покрывающие наибольший временной интервал, то можно оценить среднюю непоглощенную светимость в диапазоне 0.1–100 кэВ, предполагая расстояние равным 8.5 кпк, как $L = 1.55 \times 10^{37}$ эрг с⁻¹ или 0.3% от критической

Таблица 4.2. Параметры аппроксимации спектров излучения источника GRS 1739-278 по данным измерений телескопом Swift-XRT во время его вспышки.

ID	Сеанс наблюдений	Экспозиция с	Поток ^a 10 ⁻¹⁰ эрг см ⁻² с ⁻¹	Г ^b	N _H ^c 10 ²² см ⁻²
	MJD начала				
55	57652	968.9	2.4±0.6	1.74±0.24	2.14±0.43
56	57656	939.0	1.6±0.2	1.50±0.30	1.52±0.19

^a Непоглощенный поток в диапазоне 0.1–10 кэВ.

^b Фотонный индекс.

^c Поверхностная плотность водорода.

Таблица 4.3. Параметры широкополосного (0.1-100 кэВ) спектра рентгеновской новой GRS 1739-278 по данным измерений вблизи максимума вспышки.

INTEGRAL XRT		N_H^a	Γ^b	Поток ^c		C_{JEM-X}^d	C_{XRT}^d	$\chi_N^2(N)^e$
Орбиты	ObsID	10^{22} см^{-2}		0.1-10 кэВ	20-100 кэВ			
1725-1727	55	2.33 ± 0.20	1.86 ± 0.07	8.6 ± 2.3	5.3 ± 1.4	0.44 ± 0.06	0.32 ± 0.05	6.1(12)
1728-1729	56	1.68 ± 0.19	1.73 ± 0.05	1.8 ± 0.1	3.0 ± 0.2	–	0.56 ± 0.18	12.1(10)

^a Поверхностная плотность водорода.

^b Фотонный индекс.

^c Непоглощенный поток, $10^{-10} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

^d Нормировка данных телескопов JEM-X и Swift-XRT относительно IBIS

^e Значение χ_N^2 , нормированное на степень свободы N .

эддингтоновской светимости $L_{Edd} = 1.3 \times 10^{39} \text{ эрг с}^{-1}$ для черной дыры с массой $10M_\odot$.

На месте, указанном Марти и др. (1997), на изображении ближайшей окрестности рентгеновской новой GRS 1739-278, полученном телескопом РТТ-150, ее инфракрасного двойника обнаружено не было. Верхние пределы на уровне достоверности 5σ составили $m(r') \simeq 22.0$ и $m(i') \simeq 20.8$. На рис. 5 эти пределы представлены вместе с рентгеновском спектром с рис. 4. Ранее Гребенев и др. (2014, 2016) было показано, что инфракрасные и оптические наблюдения ряда рентгеновских новых хорошо описываются степенным продолжением их жесткого рентгеновского спектра, скорректированным лишь на поглощение на пыли, соответствующее величине фотопоглощения, искажающего их мягкий рентгеновский спектр. Радионаблюдения рентгеновских новых (Рассел и др., 2006) также предполагают единый степенной спектр. Из рис. 4 однако видно, что из-за сильного межзвездного поглощения в направлении данной новой полученные верхние пределы лежат много выше как степенного продолжения ее жесткого рентгеновского спектра излучения, так и возможного вклада в инфракрасный диапазон чернотельного излучения внешних холодных областей аккреционного диска, окружающего черную дыру в данной системе. Показаны спектры, соответствующие максимальному эддингтоновскому темпу аккреции вещества на черную дыру с массой $10M_\odot$. Красными линиями показан спектр диска, простирающегося внутрь к черной дыре до максимально возможного радиуса круговой устойчивой орбиты $3R_g$, синими — спектр диск с тем же темпом аккреции, но внутренним радиусом $30R_g$. Оба диска дают одинаковый вклад в инфракрасном диапазоне, однако первый диск не может существовать в данной системе, так как дает слишком большой поток мягкого рентгеновского излучения. Отметим, что ранее Гребенев и др. (2016) было показано, что учет рентгеновского прогрева в таких системах, сделанный при естественных предположениях, не может кардинально изменить оценку вклада чернотельного диска в их полное инфракрасное излучение.

В целом, спектральные характеристики и измеренная рентгеновская светимость говорят о том, что источник находился в каноническом “жестком (низком)” рентгеновском состоянии черных дыр. Таким образом эта вспышка пока что оказывается “неудавшейся-

ся” — количество вещества, вовлеченного во время нее в процесс аккреции, оказалось недостаточным для достижения “высокого” состояния с мягкой чернотельной компонентой в спектре, характерного для развитых вспышек. Будущие запланированные (Нейлсен и др., 2016) наблюдения источника телескопами обсерваторий NuSTAR и Chandra смогут подтвердить или опровергнуть этот вывод.

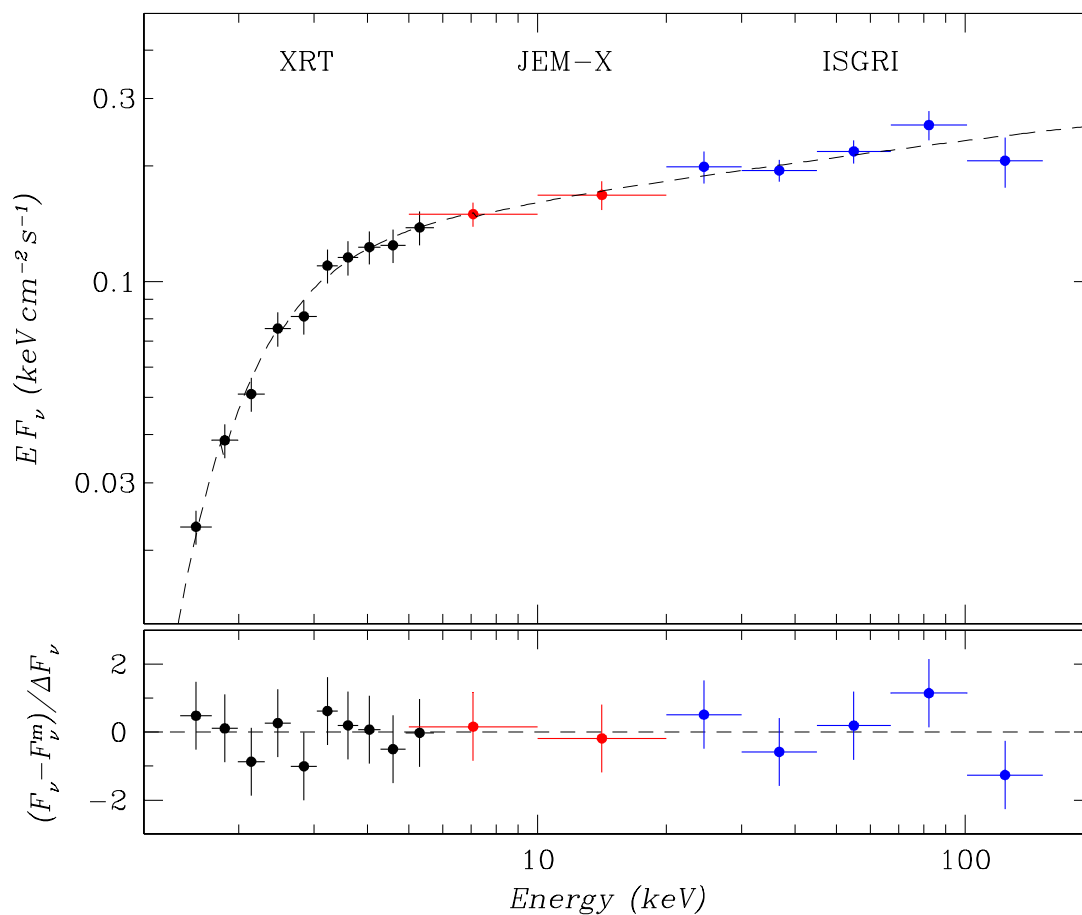


Рис. 4.4. Вверху: широкополосный спектр излучения рентгеновской новой GRS 1739-278 вблизи максимума вспышки и его аппроксимация степенной моделью с поглощением. Черными точками показаны данные телескопа Swift-XRT (ID. 55), красными и синими — усредненные за орбиты 1725–1727 данные телескопов JEM-X и IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. Спектр отнормирован к данным телескопа IBIS/ISGRI. Внизу: Добротность аппроксимации спектра на разных энергиях в смысле накопления χ^2 .

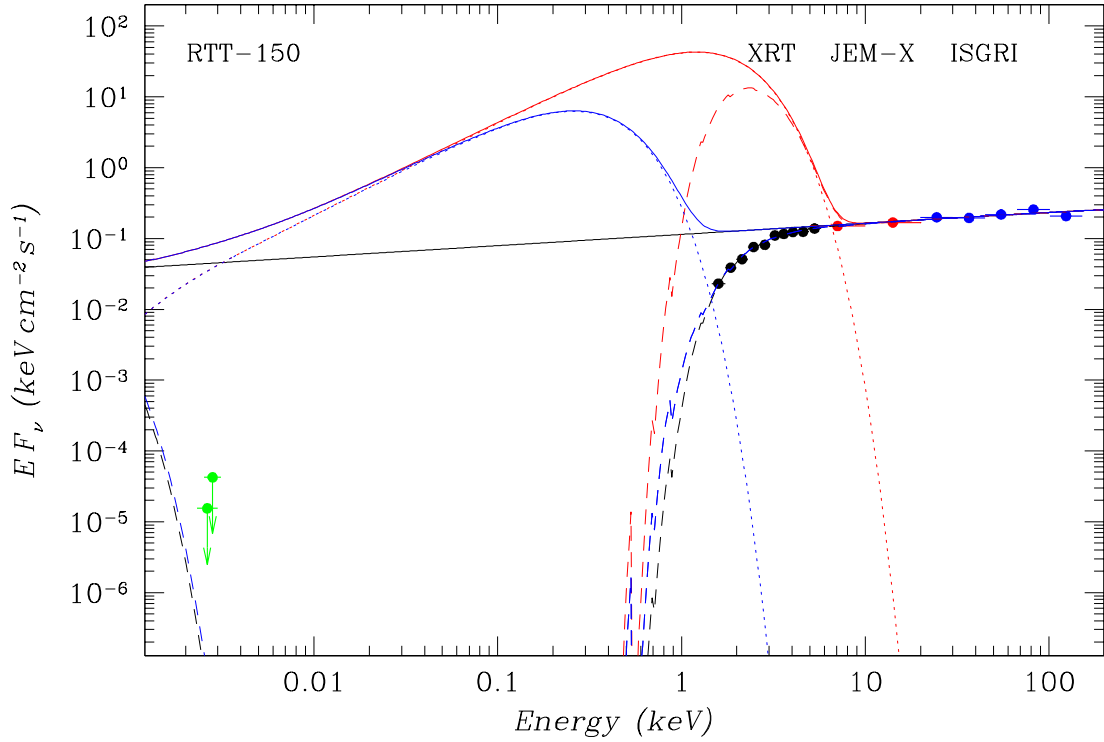


Рис. 4.5. Тот же спектр рентгеновской новой GRS 1739-278, что и на Рис. 4.5, но с добавленными верхними пределами в инфракрасном диапазоне. Ожидаемый поток излучения в этом диапазоне, полученный исходя из степенного продолжения жесткого рентгеновского спектра (черные линии) или с возможным включением чернотельного излучения холодного аккреционного диска (синие и красные линии), лежит много ниже этих пределов. Штриховыми линиями показан спектр с учетом межзвездного поглощения, сплошными — истинный спектр. Пунктирными линиями показан спектр одного диска без учета степенной компоненты. Красными линиями показан спектр диска с максимально возможной околоэддингтоновской светимостью 1.38×10^{39} эрг с^{-1} и внутренним радиусом $3R_g$ (для черной дыры массой $10M_\odot$), синими — спектр диска, соответствующего такому же темпу аккреции, но с внутренним радиусом $30R_g$.

4.2 IGR J17445-2747 - еще один барстер в Галактическом балдже

Рентгеновский источник IGR J17445-2747 был обнаружен гамма-телескопом IBIS (Убертини и др., 2003) обсерватории INTEGRAL (Винклер и др., 2003) при анализе суммарных изображений неба (мозаик), полученных за первые два года ее работы на орбите. Во втором каталоге источников, зарегистрированных этим телескопом (Бёрд и др., 2006), он обозначен как слабый неотожествленный источник постоянного излучения с потоком $(6.8 \pm 0.8) \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазоне энергий 20–40 кэВ. В последующих каталогах (Бёрд и др., 2007, 2010; Кривонос и др., 2007, 2010) источник отмечен уже как сильнопеременный. Наиболее активен он был в феврале-марте 2004 г. (Кривонос и др., 2010), когда поток его излучения в диапазоне 17–60 кэВ достигал $(3.9 \pm 0.3) \times 10^{-11}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Второй телескоп обсерватории INTEGRAL — JEM-X (Лунд и др., 2003), чувствительный в более мягком (стандартном) рентгеновском диапазоне, этой вспышки не зарегистрировал (см. часть 3.1).

С момента открытия источника неоднократно предпринимались попытки уточнить его положение на небе с помощью фокусирующих рентгеновских телескопов с зеркалами косоугольного падения и определить его природу. Однако, наблюдения телескопов Swift-XRT (Ланди и др., 2007) и Chandra (Томсик и др., 2008) ясности не принесли — был обнаружен лишь один источник, хотя и яркий, но лежащий вне формального круга ошибок локализации IGR J17445-2747 телескопом IBIS, имеющего радиус $1.5'$ на уровне достоверности 68% (Кривонос и др., 2007). Оснований считать его связанным с источником IGR J17445-2747 не было — стало уже ясно, что IGR J17445-2747 сильнопеременный, поэтому во время этих довольно коротких наблюдений он просто мог находиться в “выключенном” состоянии. Наконец, в архиве перенаведений обсерватории XMM-Newton Мализия и др. (2010) обнаружили яркий транзиентный источник, названный ими XMMSL1 J174429.4-274609, с пиковым потоком излучения в диапазоне 0.2–12 кэВ $\simeq 1.6 \times 10^{-12}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ и динамическим диапазоном переменности более 40. Основываясь на совпадении в пределах ошибок положений источников на небе и их сильной переменности Мализия и др. (2010) предположили, что XMMSL1 J174429.4-274609 является мягким рентгеновским компаньоном IGR J17445-2747. К сожалению, особенности работы телескопа XMM-Newton в режиме перенаведений существенно ухудшают точность локализации источников. Кросс-корреляция положений источников из каталога перенаведений с оптическими каталогами (Сакстон и др., 2008) показала, что 90%-доверительный интервал на ошибку определения положения составляет $17''$. Это делает практически невозможной оптическую идентификацию данного источника, ввиду высокой плотности звезд вблизи галактического центра, где он расположен.

В настоящей работе сообщается о регистрации от этого источника рентгеновского всплеска I рода, что позволяет отождествить его с аккрецирующей нейтронной звездой со слабым магнитным полем в маломассивной двойной системе (рентгеновским барстером). Краткая информация об этом событии уже была опубликована нами в *Astronomer’s Telegrams* (Мереминский и др., 2017). Здесь приведены подробности этих

наблюдений, а также результаты последующих исследований этого источника, в частности, более точной его локализации.

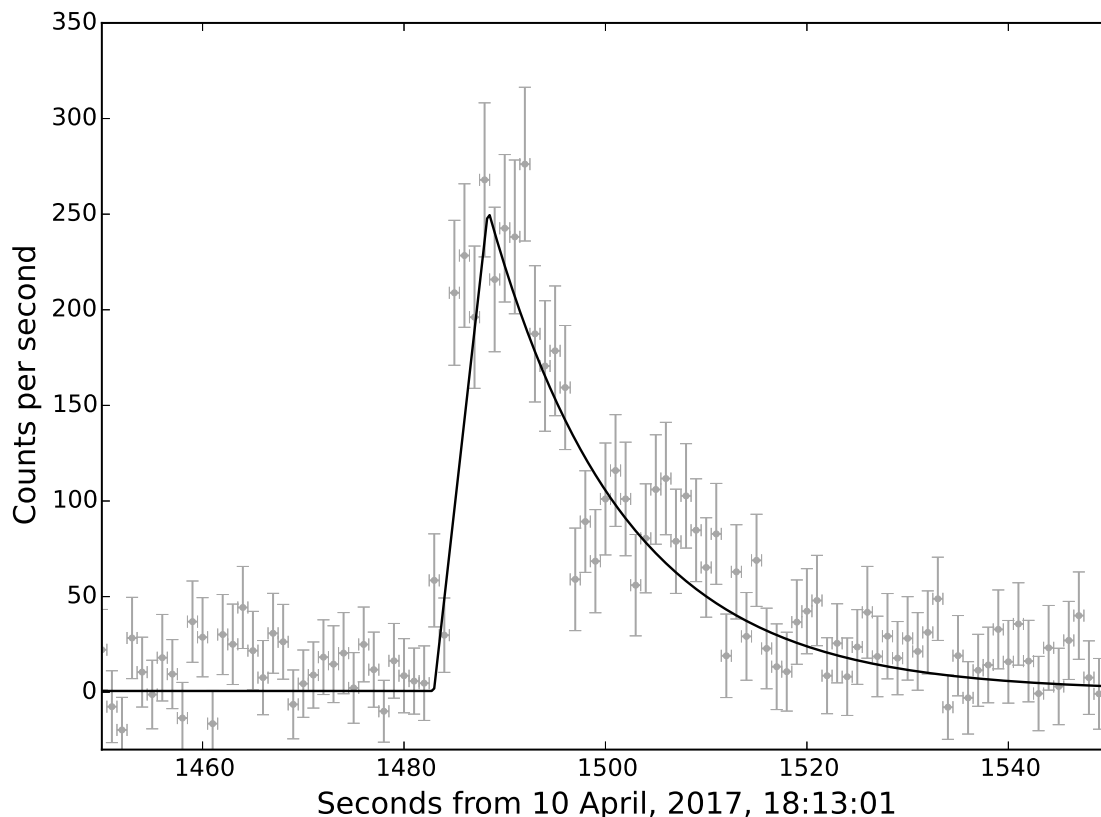


Рис. 4.6. Временной профиль рентгеновского всплеска, зарегистрированного от источника IGR J17445-2747 10 апреля 2017 г., по сумме данных двух модулей телескопа JEM-X. Диапазон энергий 3–10 кэВ, временное разрешение 1 с. Сплошной линией показана аппроксимация профиля моделью FRED (быстрый линейный подъем — медленный экспоненциальный спад). Характерное время подъема $\tau_r = 5.4^{+0.2}_{-5.0}$ с, экспоненциальное время спада $\tau_d = 13.3 \pm 1.9$ с.

4.2.1 Профиль всплеска и его локализация

Всплеск был зарегистрирован телескопом JEM-X (Лунд и др., 2003), 2003) обсерватории INTEGRAL 10 апреля 2017 г., во время сканирующих наблюдений области галактического центра, выполнявшихся по заявке Р.А.Сюняева (см. Кривонос и др. (2012)).

На Рис. 4.6 показан временной профиль всплеска (зависимость скорости счета фотонов от времени). Видно, что он характеризовался резким линейным ростом скорости счета в начале и медленным экспоненциальным спадом в конце. Аппроксимация

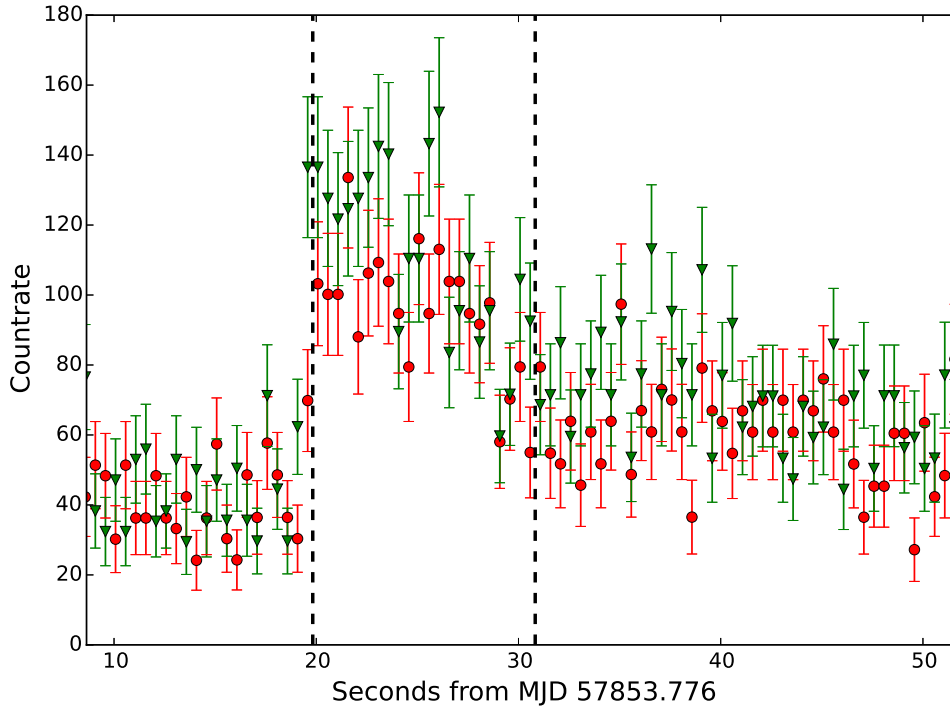


Рис. 4.7. Изменение скорости счета двух модулей телескопа JEM-X во время рентгеновского всплеска. Энергетический диапазон 3–10 кэВ, временное разрешение 0.25 с. Красным (кружками) показаны данные модуля JEM-X1, зеленым (треугольниками) — JEM-X2. Вертикальные штриховые линии ограничивают временной интервал, в котором строилось изображение для идентификации источника всплеска.

соответствующей моделью (FRED), показанная на рисунке сплошной линией, дала характерные времена подъема $\tau_r = C_{\max}/(dC/dt) = 5.45.4^{+0.2}_{-5.0}$ с и спада $\tau_d = 13.3 \pm 1.9$ с скорости счета. Максимум пришелся на 18 часов 37 минуты 49 секунд UTC. Всплеск был зарегистрирован обоими модулями телескопа JEM-X, и на Рис. 4.6 приведена их суммарная скорость счета. На Рис. 4.7 скорости счета двумя модулями даны отдельно и с более высоким временным разрешением (0.25 с).

Для определения источника всплеска нами были построены изображения неба в поле зрения телескопа (карты отношения сигнала к шуму S/N) за все время наведения телескопа в данную область (scw: 180300330010, экспозиция 1750 с) и за 13 с вблизи максимума всплеска (использовавшийся временной интервал отмечен на Рис. 4.7 вертикальными штриховыми линиями). Изображения были получены в диапазоне 3–20 кэВ. Они приведены на Рис. 4.8. Хотя на первом изображении (слева) видно много ярких известных источников, в том барстеров, GX 3+1, KS 1741-293, A1742-294, A1743-288, а также кандидат в черные дыры 1E1740.7-2942 и IGR J17445-2747, лишь один из них, а именно IGR J17445-2747, единственный присутствующий также на втором изображении (справа), может быть ответственен за всплеск. На левом изображении (за все

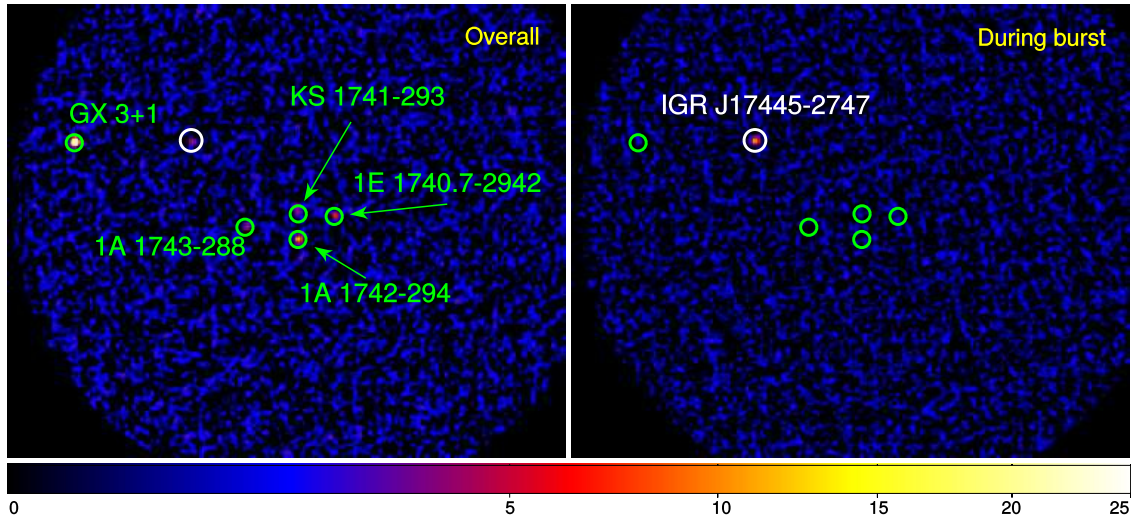


Рис. 4.8. Изображения неба (карты отношения сигнала к шуму S/N), полученные с помощью телескопа JEM-X в диапазоне 3–20 кэВ 10 апреля 2017 г.: слева — за весь сеанс наблюдения, во время которого был зарегистрирован всплеск, справа — за 13 с вблизи максимума всплеска. Зарегистрированные яркие источники постоянного излучения указаны на левом изображении. Белым кружком обозначен источник IGR J17445-2747.

наблюдение) он зарегистрирован на уровне $S/N \simeq 5$, на правом (во время всплеска) — на уровне $S/N \simeq 10$. В этот момент поток фотонов от него в диапазоне 3–10 кэВ был сравним с потоком от Крабовидной туманности. Измеренное положение источника всплеска на небе, $R.A. = 266.133^\circ$, $Dec. = -27.784^\circ$ (эпоха 2000.0), согласуется с положением источника IGR J17445-2747 (его мягкого рентгеновского двойника XMMSL1 J174429.4-274609) с точностью до $1'$, что соответствует обычной погрешности локализации телескопом JEM-X источников сравнимой яркости.

Отметим, что на суммарной мозаике изображений, полученных телескопом JEM-X 7–11 апреля (в рамках наблюдений Р.А. Сюняева и с учетом наблюдений по заявкам Дж. Вилмса и Э. Куулкерса), источник регистрируется более значимо на уровне $S/N = 6.4$ с потоком $F_X \simeq (3.2 \pm 0.5) \times 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазоне 5–10 кэВ.

4.2.2 Уточнение локализации по данным телескопа Swift-XRT

Сразу после обнаружения всплеска (Мереминский и др., 2017) нами были инициированы наблюдения источника IGR J17445-274 телескопом Swift-XRT (Барроус и др., 2005) для определения его точного местоположения. Были выполнены четыре наблюдения — 14 апреля (через 4 дня после всплеска), 1, 6 и 15 мая. Источник в поле зрения был зарегистрирован только во время первых двух наблюдений (ID: 00035353003, 00035353005) со средней скоростью счета фотонов 0.80 ± 0.04 и 0.10 ± 0.01 отсч. с^{-1} , соответственно (Мереминский и др., 2017). Эти наблюдения позволили уточнить положение источника (Мереминский и др., 2017). Кеннеа и др. (2017) отметили, что локализацию источника

можно еще улучшить за счет уменьшения систематической ошибки, если использовать изображения, полученные телескопом Swift-UVOT одновременно с телескопом Swift-XRT, для привязки к известным положениям ярких звезд (Гоад и др., 2007; Эванс и др., 2009). Кеннеа и др. (2017) определили положение источника, R.A. = 266.12647°, Dec. = -27.76685°, используя только первый сеанс наблюдения. В дальнейшем мы повторили эту процедуру по двум сеансам наблюдений источника, во время которых он был ярок, и нашли для его координат: R.A. = 266.12649°, Dec. = -27.76686° (эпоха 2000.0, погрешность 2.1", 90%-доверительный интервал). В пределах ошибки наши измерения согласуются с результатами Кеннеа и др. (2017).

На Рис. 4.9 показано изображение (распределение числа зарегистрированных фотонов) области неба вблизи источника IGR J17445-2747, полученное по данным двух первых его наблюдений (14 апреля и 1 мая 2017 г.) обсерваторией Swift-XRT. Изображение получено в диапазоне 0.3–10 кэВ. Хорошо виден яркий источник в центре. Наложены круги ошибок локализации источника разными телескопами: оранжевый круг — обсерваторией XMM-Newton по данным Первого каталога перенаведений обсерватории XMM-Newton Сакстон и др. (2008), желтый круг — той же обсерваторией по данным недавно опубликованного Второго каталога перенаведений обсерватории XMM-Newton², зеленый круг — по данным телескопа Swift-XRT, полученным во время мониторинга этим телескопом области галактического балджа (Хейнке и др., 2017).

Отметим значительное изменение (и улучшение) положения источника во Втором каталоге перенаведений обсерватории XMM-Newton по сравнению с Первым каталогом. Следует особо отметить жесткость источника — на уровне 0.63, что существенно больше, чем в среднем по каталогу (см. <https://www.cosmos.esa.int/documents/332006/544078/hrplot.gif>). В то же время все круги ошибок захватывают источник лишь на самом краю, что подразумевает возможность присутствия в этой области других близких транзиентных источников, искажающих результаты локализации. Маленький голубой круг показывает ошибку локализации источника по данным наших наблюдений. Очевидно, что она намного качественнее предыдущих локализаций и единственная позволяет попытаться провести оптическое отождествление источника. Такие попытки уже предпринимались (Шоу и др., 2017), однако, полученный результат все еще нельзя считать однозначным.

Помимо более точной локализации источника, наблюдения телескопом Swift-XRT позволяют оценить межзвездное поглощение в его направлении. Для этого использовались спектры излучения, полученные в двух первых сеансах наблюдения, 14 апреля и 1 мая. Спектры одновременно аппроксимировались моделью `TBabs*powerlaw` пакета XSPEC (Арно, 1996), наклон и нормировка степенного закона для каждого спектра являлись независимыми параметрами, а величина поглощения полагалась одинаковой. Обилие считалось солнечным (Вилмс и др., 2000), сечения были взяты из работы Вернер и др. (1996), для аппроксимации использовалась статистика (Кэш, 1979). Таким образом удалось получить ограничение на поверхностную плотность водорода в направлении на источник $N_H \simeq (5.6 \pm 1.3) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Наклоны спектров (фотонные индексы) со-

²см. <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/xmmsl2-ug>

гласуются между собой: $\alpha \simeq 2.06 \pm 0.42$ и 2.16 ± 0.64 , для первого и второго спектров, соответственно, а потоки в диапазоне 5–10 кэВ были равны $F_X \simeq 3.2 (+0.2/-0.7) \times 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ и $4.3 (+0.5/-0.8) \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-1}$, свидетельствуя о быстром затухании источника. Это подтверждает и отсутствие его регистрации в двух последних наблюдениях, 3σ пределы на его поток в эти дни были равны 6×10^{-13} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-1}$, 6 и 15 мая, соответственно.

4.2.3 Спектр всплеска и расстояние до источника

Форма профиля рентгеновского всплеска от источника IGR J17445-274 имеет характерную для всплесков I рода форму — быстрый ($\lesssim 5$ с) подъем и намного более медленный (~ 15 с) спад. Такие всплески являются признаком термоядерного взрыва на поверхности нейтронной звезды со слабым магнитным полем вещества, выпавшего в процессе аккреции в маломассивной рентгеновской двойной системе. Это подтверждает и почти чернотельный спектр излучения, зарегистрированный во время всплеска.

Спектр всплеска был нами восстановлен в соответствии с процедурой, описанной в части 3.1, в пяти каналах от 4 до 14 кэВ для того же интервала времени вблизи максимума всплеска, который использовался для построения изображения (справа) на Рис 4.8 (отмечен вертикальными штриховыми линиями на Рис 4.7). При аппроксимации спектра использовалась диагональная матрица, основанная на данных наблюдений телескопом JEM-X Крабовидной туманности, проведенных за несколько дней до регистрации всплеска (были отобраны наведения, в которых Крабовидная туманность находилась не более чем в 3° от центра поля зрения). Полученный в результате спектр представлен на Рис. 4.10. Видно, что он очень мягок, каким и должен быть спектр всплеска I рода.

Его аппроксимация моделью черного тела $T\text{Babs}*\text{bbodyrad}$ с поглощением, зафиксированным на значении N_{H} , полученным при наблюдении источника телескопом Swift-XRT, дала температуру черного тела, равную $kT_{bb} \simeq 1.6 \pm 0.3$ кэВ. Предполагая, что излучение идет со всей поверхности нейтронной звезды радиусом $R_{bb} = 12$ км и пренебрегая искажениями спектра из-за комптонизации, можно оценить минимальное расстояние до источника $d_{\text{min}} \simeq 5$ кпк. Полный болометрический поток в максимуме вспышки составляет $F_{bb} \simeq 2.1 \times 10^{-8}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Аппроксимация спектра виновским законом (см. Гребенев и др., 2002) дает следующие значения температуры $kT_W \simeq 1.60 \pm 0.25$ кэВ и болометрического потока $F_W = (L_W/4\pi d^2) \simeq 1.9 \times 10^{-8}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Радиус фотосферы нейтронной звезды оказывается бóльшим радиуса, оцененного в пределе чернотельной модели. В условиях действия насыщенной комптонизации должен формироваться спектр как раз виновской формы, а не планковской (чернотельной) (Компанеец, 1957).

Как известно, предельная светимость барстеров во время всплесков ограничивается критическим эддингтоновским уровнем, по достижении которого начинается быстрое фотосферное расширение нейтронной звезды и отток вещества (например, Левин и др., 1993). Хотя мы не выявили признаков фотосферного расширения во временном профиле всплеска, предполагая, что светимость во время вспышки все же достигла

эддингтоновского уровня и что масса нейтронной звезды равна стандартному значению $M = 1.4 M_{\odot}$, мы можем оценить максимальное расстояние до источника IGR J17445-2747 $d_{\max} \simeq 12.3$ кпк (для случая аккреции чистого гелия) и $d_{\max} \simeq 7.7$ кпк (для случая аккреции вещества с солнечным обилием).

4.2.4 Заключение

В работе доложено о регистрации от плохо изученного транзиентного рентгеновского источника галактического балджа IGR J17445-2747 рентгеновского всплеска I-рода, что позволяет идентифицировать его как маломассивную рентгеновскую двойную систему, в которой компактным объектом является нейтронная звезда. Высокое поглощение на луче зрения, близость к направлению на центр Галактики и полученные нижний (5 кпк) и верхний (12.3 кпк) пределы на расстояние до него делает наиболее вероятным расположение этого источника в балдже Галактики.

Это не первый рентгеновский барстер, открытый обсерваторией INTEGRAL. Ранее, два до этого неизвестных барстера, AX J1754.2-2754 и IGR J17380-3749, были открыты/выявлены в архивных данных телескопа IBIS обсерватории Человеков и Гребенев (2007, 2010) в рамках специальной программы, направленной на поиск всплесков I рода (Человеков и др., 2006; Человеков и Гребенев, 2011; Человеков и др., 2017), которая проводится в нашем отделе. Еще четыре барстера, XTE J1739-285, IGR J17254-3257 (1RXS J172525.5-325717), IGR J17597-2201 и 1RXS J180408.9-342058, были выявлены Брандт и др. (2005, 2006, 2007) и Шеневез и др. (2012) в данных телескопа JEM-X. В случае IGR J17380-3749 благодаря всплеску был открыт новый источник, в других случаях речь шла об установлении природы уже известных, но неотожествленных источников (IGR J17597-2201 был открыт тоже обсерваторией INTEGRAL, но за несколько лет до наблюдения всплеска, см. Лутовинов и др. (2003)). Эти открытия показывают, что в Галактике может скрываться много все еще неизвестных барстеров с низким уровнем аккреции (и светимости). Должны пройти годы, чтобы на их поверхности накопилась необходимая для термоядерного взрыва критическая масса вещества. Рентгеновские всплески в этих источниках происходят крайне редко, но это — реальный шанс их обнаружить и установить их природу, и его упускать нельзя.

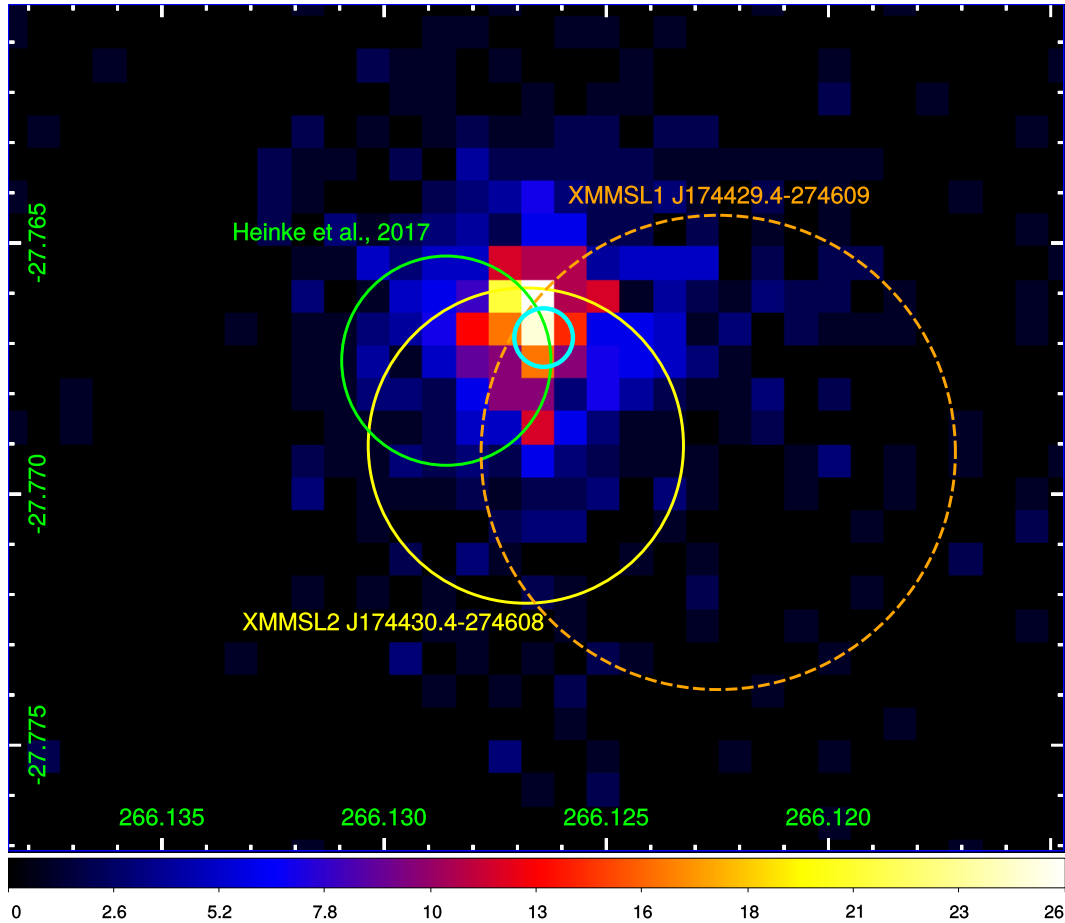


Рис. 4.9. Изображение неба, полученное телескопом Swift–XRT в диапазоне 0.3–10 кэВ по сумме двух первых сеансов наблюдений источника IGR J17445-2747 (14 апреля и 1 мая 2017 г., полная экспозиция ~ 2100 с). Большой пунктирный (оранжевый) круг — область ошибок локализации источника по данным Первого каталога перенаведений обсерватории XMM-Newton (Сакстон и др., 2008), желтый круг — по данным Второго каталога перенаведений обсерватории XMM-Newton, зеленый круг — по данным Хейнке и др. (2017) и маленький голубой круг — по данным наших наблюдений (см. также Кеннеа и др. (2017)). Изображение смещено относительно оригинального так, чтобы соответствовать небесным координатам.

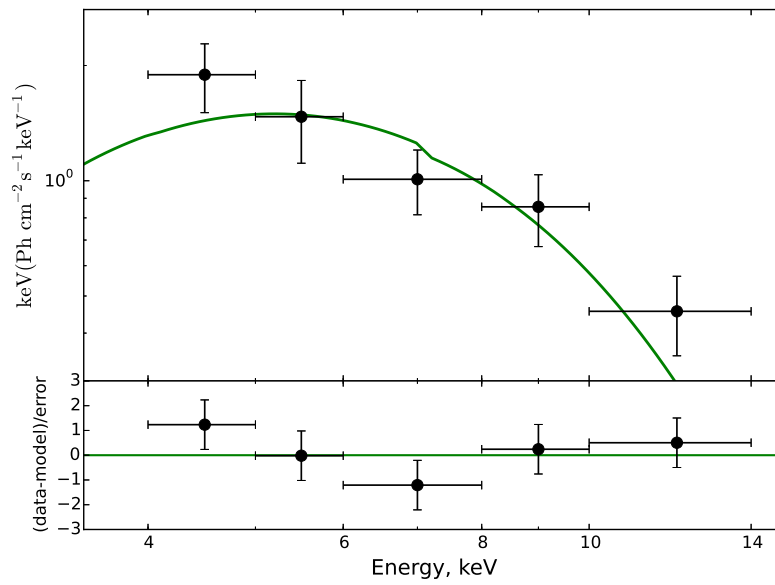


Рис. 4.10. Спектр излучения, полученный вблизи максимума вспышки по данным двух модулей телескопа ЖЕМ-Х. Сплошной (зеленой) линией показана аппроксимация спектра законом черного тела с kT_{bb} кэВ.

Глава 5

Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведен обзор области центра Галактики телескопом JEM-X в диапазонах энергий 5–10 и 10–35 кэВ. Зарегистрировано 105 источников, большинство из которых LMXB. Получена функция светимости (в диапазоне 5-10 кэВ) постоянных LMXB в интервале $8 \times 10^{34} \dots 6 \times 10^{38}$ эрг с^{-1} , её форма хорошо соответствует предсказанию модели Гильфанова (2004). Исследован вклад сильнопеременных LMXB в усредненную за большой период времени (10 лет) функцию светимости, добавка таких источников начинает превосходить вклад постоянных источников на светимостях ниже 10^{36} эрг с^{-1} . Показано, что пространственное распределение LMXB следует распределению массы Галактики в трех-компонентной модели Бакала и Сонейры (1980).
2. Проведен глубокий обзор трех внегалактических полей телескопом IBIS в диапазоне энергий 17–60 кэВ. Зарегистрировано 147 источников, 37 из которых были обнаружены впервые. С использованием данных телескопов Swift-XRT, XMM и ROSAT 13 (из 37) новых источников были отождествлены с известными оптическими компаньонами и классифицированы как АЯГ. Наклон кривой подсчетов источников соответствует ожидаемому ($-3/2$) вплоть до потоков $\approx 3 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, а нормировка незначительно меньше значения, полученного в обзоре всего неба (Кривонос и др., 2010). Нормировка кривой подсчетов АЯГ в направлении на БМО ниже чем для других полей, а наклон кривой - круче. Этот эффект вызывается отсутствием в этом направлении ярких АЯГ. Оценки плотности АЯГ в локальной Вселенной в направлении на все три поля согласуются между собой.
3. Для 11 из 41 новых жестких рентгеновских источников, зарегистрированных в 14-летнем обзоре Галактической плоскости были найдены мягкие рентгеновские компаньоны. Четыре из них являются кандидатами в АЯГ. Еще один кандидат в поглощенные АЯГ найден на основании совпадения положения с центром близкой оптической галактики.
4. Обнаружена и исследована вспышка рентгеновской новой GRS 1739-278. Вспышка оказалась “неудавшейся”, источник не перешел из низкого жесткого состояния в

высокое мягкое, о чем свидетельствуют полученные широкополосные (0.8-100 кэВ) спектры.

5. Обнаружен первый рентгеновский всплеск I типа от источника IGR J17445-2747. Это позволило установить, что компактным объектом в этой системе является нейтронная звезда. Получены уточненные небесные координаты источника и пределы на расстояние до него ($5.0 \lesssim D \lesssim 12.3$ кпк). Регистрация всплеска позволяет предположить, что IGR J17445-2747 - маломассивная рентгеновская двойная, расположенная в балдже Галактики.

Список публикаций по теме диссертации

1. "Deep hard X-ray survey of the Large Magellanic Cloud"
Grebenev, S. A., Lutovinov, A. A., Tsygankov, S. S., Mereminskiy, I. A., 2013, MNRAS, 428, 50-57
2. "Обзор области Галактического центра в рентгеновских лучах телескопом JEM-X обсерватории INTEGRAL"
Гребенев С.А., Мереминский И.А., 2015, Письма в Астрономический Журнал, 41, 826
3. "INTEGRAL/IBIS deep extragalactic survey: M81, LMC and 3C 273/Coma fields"
Mereminskiy I.A., Krivonos R.A., Lutovinov A.A., Sazonov S.Yu., Revnivtsev M.G., Sunyaev R.A., 2016, MNRAS, 459, 140-150
4. "New hard X-ray sources discovered in the ongoing INTEGRAL Galactic plane survey after 14 years of observations"
Krivonos R.A., Tsygankov S.S., Mereminskiy I.A., Lutovinov A.A., Sazonov S.Yu., Sunyaev R.A., 2017, MNRAS, 470, 512-516
5. "Вспышка рентгеновской новой GRS 1739-278 в сентябре 2016 г"
Мереминский И.А., Филиппова Е.В., Кривонос Р.А., Гребенев С.А., Буренин Р.А., Сюняев Р.А., 2017, Письма в Астрономический Журнал, 43, 194
6. "IGR J17445-2747 - еще один рентгеновский барстер в балдже Галактики"
Мереминский И.А., Гребенев С.А., Сюняев Р.А., 2017, Письма в Астрономический Журнал, 43, 727
7. "Рентгеновские всплески I рода, обнаруженные телескопом JEM-X обсерватории INTEGRAL в 2003-2015 гг"
Человеков И.В., Гребенев С.А., Мереминский И.А., Просветов А.В., 2017, Письма в Астрономический Журнал, 43, 859

Нерецензируемые публикации:

8. "INTEGRAL sees a rising flux from the historical X-ray nova GRS 1739-278"
Mereminskiy, I., Krivonos, R., Grebenev, S., Filippova, E., Sunyaev, R., 2016, ATel, 9517
9. "The new X-ray outburst of GRO J1744-28 detected with INTEGRAL"
Mereminskiy, I. A., Grebenev, S. A., Krivonos, R. A., 2017, ATel, 10073
10. "First detection of a thermonuclear X-ray burst from IGR J17445-2747 (with INTEGRAL/JEM-X)"
Mereminskiy, I. A., Grebenev, S. A., Krivonos, R. A., Chelovekov, I. V., Sunyaev, R. A., 2017, ATel, 10256
11. "Discovery of SWIFT J174429.9-274557 - a soft X-ray counterpart of the X-ray burster IGR J17445-2747"
Mereminskiy, I. A., Grebenev, S. A., Krivonos, R. A., Chelovekov, I. V., Sunyaev, R. A., 2017, ATel, 10272
12. "Detection of the low-frequency QPOs in MAXI J1535-571"
Mereminskiy, I. A., Grebenev, S. A., 2017, ATel, 10734

Литература

- [1] Ажелло и др. (Ajello, M. and Alexander, D. M. and Greiner, J. and Madejski, G. M. and Gehrels, N. and Burlon, D.), 2012, ApJ, 749, 12
- [2] Ажелло и др. (Ajello, M. and Rebusco, P. and Cappelluti, N. and Reimer, O. and Böhringer, H. and Greiner, J. and Gehrels, N. and Tueller, J. and Moretti, A.), 2009, ApJ, 690, 367-388
- [3] Арно К.А. (Arnaud, K. A.), 1996, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 101, 17
- [4] Бааде и Цвики (Baade, W. and Zwicky, F.), 1934, Proceedings of the National Academy of Science, 20, 259-263
- [5] Бакал Дж.Н. и Сонеира Р.М. (Bahcall, J. N. and Soneira, R. M.), 1980, ApJS, 44, 73-110
- [6] Бакал Дж.Н. (Bahcall, J. N.), 1986, Annual review of astronomy and astrophysics, 24, 577-611
- [7] Барроус и др. (Burrows, D. N. and Hill, J. E. and Nousek, J. A. and Kennea, J. A. and Wells, A. and Osborne, J. P. and Abbey, A. F. and Beardmore, A. and Mukerjee, K. and Short, A. D. T. and Chincarini, G. and Campana, S. and Citterio, O. and Moretti, A. and Pagani, C. and Tagliaferri, G. and Giommi, P. and Capalbi, M. and Tamburelli, F. and Angelini, L. and Cusumano, G. and Bräuninger, H. W. and Burkert, W. and Hartner, G. D.), 2005, Space Science Reviews, 120, 165-195
- [8] Баумгартнер и др. (Baumgartner, W. H. and Tueller, J. and Markwardt, C. B. and Skinner, G. K. and Barthelmy, S. and Mushotzky, R. F. and Evans, P. A. and Gehrels, N.), 2013, ApJS, 207, 19
- [9] Беллони Т. (Belloni, T. M.), 2010, Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag
- [10] Бороздин и др. (Borozdin, K. N. and Revnivtsev, M. G. and Trudolyubov, S. P. and Aleksandrovich, N. L. and Sunyaev, R. A. and Skinner, G. K.), 1998, AstL, 24, 435-444
- [11] Бороздин К.Н. и Трудолоубов С.П. (Borozdin, K. N. and Trudolyubov, S. P.), 2000, ApJL, 533, L131-L134

- [12] Брандт и др. (Brandt, S. and Kuulkers, E. and Bazzano, A. and Courvoisier, T. J.-L. and Domingo, A. and Ebisawa, K. and Gehrels, N. and Kretschmar, P. and Krivonos, R. and Lund, N. and Markwardt, C. and Mowlavi, N. and Oosterbroek, T. and Orr, A. and Paizis, A. and Roques, J.-P. and Shaw, S. E. and Wijnands, R.), 2005, *ATel*, 622
- [13] Брандт и др. (Brandt, S. and Budtz-Jørgensen, C. and Chenevez, J.), 2006, *ATel*, 778
- [14] Брандт и др. (Brandt, S. and Budtz-Jørgensen, C. and Gotz, D. and Hurley, K. and Frontera, F.), 2007, *ATel*, 1054
- [15] Бёрд и др. (Bird, A. J. and Barlow, E. J. and Bassani, L. and Bazzano, A. and Bélanger, G. and Bodaghee, A. and Capitanio, F. and Dean, A. J. and Fiocchi, M. and Hill, A. B. and Lebrun, F. and Malizia, A. and Mas-Hesse, J. M. and Molina, M. and Moran, L. and Renaud, M. and Sguera, V. and Shaw, S. E. and Stephen, J. B. and Terrier, R. and Ubertini, P. and Walter, R. and Willis, D. R. and Winkler, C.), 2006, *ApJ*, 636, 765-776
- [16] Бёрд и др. (Bird, A. J. and Malizia, A. and Bazzano, A. and Barlow, E. J. and Bassani, L. and Hill, A. B. and Bélanger, G. and Capitanio, F. and Clark, D. J. and Dean, A. J. and Fiocchi, M. and Götz, D. and Lebrun, F. and Molina, M. and Produit, N. and Renaud, M. and Sguera, V. and Stephen, J. B. and Terrier, R. and Ubertini, P. and Walter, R. and Winkler, C. and Zurita, J.), 2007, *ApJS*, 170, 175-186
- [17] Бёрд и др. (Bird, A. J. and Bazzano, A. and Bassani, L. and Capitanio, F. and Fiocchi, M. and Hill, A. B. and Malizia, A. and McBride, V. A. and Scaringi, S. and Sguera, V. and Stephen, J. B. and Ubertini, P. and Dean, A. J. and Lebrun, F. and Terrier, R. and Renaud, M. and Mattana, F. and Götz, D. and Rodriguez, J. and Belanger, G. and Walter, R. and Winkler, C.), 2010, *ApJS*, 186, 1-9
- [18] Бёрд и др. (Bird, A. J. and Bazzano, A. and Malizia, A. and Fiocchi, M. and Sguera, V. and Bassani, L. and Hill, A. B. and Ubertini, P. and Winkler, C.), 2016, *ApJS*, 223, 15
- [19] Варгас и др. (Vargas, M. and Goldwurm, A. and Laurent, P. and Paul, J. and Jourdain, E. and Roques, J.-P. and Borrel, V. and Bouchet, L. and Sunyaev, R. and Churazov, E. and Gilfanov, M. and Novikov, B. and Dyachkov, A. and Khavenson, N. and Sukhanov, K. and Kuleshova, N.), 1997, *ApJL*, 476, L23-L26
- [20] Варвик и др. (Warwick, R. S. and Saxton, R. D. and Read, A. M.), 2012, *A&A*, 548, A99
- [21] Вестергаард Н. Дж. (Westergaard, N. J.), 2009, *The Extreme Sky: Sampling the Universe above 10 keV*
- [22] Вернер и др. (Verner, D. A. and Ferland, G. J. and Korista, K. T. and Yakovlev, D. G.), 1996, *ApJ*, 465, 487
- [23] Вилла и др. (Villa, G. and Page, C. G. and Turner, M. J. L. and Cooke, B. A. and Ricketts, M. J. and Adams, D. J. and Pounds, K. A.), 1976, *MNRAS*, 176, 609-620

- [24] Вилмс и др. (Wilms, J. and Allen, A. and McCray, R.), 2000, *ApJ*, 542, 914-924
- [25] Винклер и др. (Winkler, C. and Courvoisier, T. J.-L. and Di Cocco, G. and Gehrels, N. and Giménez, A. and Grebenev, S. and Hermsen, W. and Mas-Hesse, J. M. and Lebrun, F. and Lund, N. and Palumbo, G. G. C. and Paul, J. and Roques, J.-P. and Schnopper, H. and Schönfelder, V. and Sunyaev, R. and Teegarden, B. and Ubertini, P. and Vedrenne, G. and Dean, A. J.), 2003, *A&A*, 411, L1-L6
- [26] Вольтер Г. (Wolter, H.), 1952, *Annalen der Physik*, 445, 94-114
- [27] Вогес и др. (Voges, W. and Aschenbach, B. and Boller, T. and Bräuninger, H. and Briel, U. and Burkert, W. and Dennerl, K. and Englhauser, J. and Gruber, R. and Haberl, F. and Hartner, G. and Hasinger, G. and Kürster, M. and Pfeffermann, E. and Pietsch, W. and Predehl, P. and Rosso, C. and Schmitt, J. H. M. M. and Trümper, J. and Zimmermann, H. U.), 1999, *A&A*, 349, 289-405
- [28] Вуд и др. (Wood, K. S. and Meekins, J. F. and Yentis, D. J. and Smathers, H. W. and McNutt, D. P. and Bleach, R. D. and Friedman, H. and Byram, E. T. and Chubb, T. A. and Meidav, M.), 1984, *ApJS*, 56, 507-649
- [29] Грейнер и др. (Greiner, J. and Dennerl, K. and Predehl, P.), 1996, *A&A*, 314, L21-L24
- [30] Гребенев и др. (Grebenev, S. and Sunyaev, R. and Pavlinsky, M. and Churazov, E. and Gilfanov, M. and Dyachkov, A. and Khavenson, N. and Sukhanov, K. and Laurent, P. and Ballet, J. and Claret, A. and Cordier, B. and Jourdain, E. and Niel, M. and Pelaez, F. and Schmitz-Fraysse, M. C.), 1993, *A&AS*, 97, 281-287
- [31] Гребенев С.А., Павлинский М.Н. и Сюняев Р.А. (Grebenev, S. A. and Pavlinsky, M. N. and Sunyaev, R. A.), 1996, *Roentgenstrahlung from the Universe*, 141-142
- [32] Гребенев и др. (Grebenev, S. A. and Lutovinov, A. A. and Pavlinsky, M. N. and Sunyaev, R. A.), 2002, *AstL*, 28, 799-810
- [33] Гребенев С.А. (Grebenev S.A.), 2010, arXiv preprint arXiv:1004.0293
- [34] Гребенев и др. (Grebenev, S. A. and Lutovinov, A. A. and Tsygankov, S. S. and Winkler, C.), 2012, *Nature*, 490, 373-375
- [35] Гребенев и др. (Grebenev, S. A. and Lutovinov, A. A. and Tsygankov, S. S. and Mereminskiy, I. A.), 2013, *MNRAS*, 428, 50-57
- [36] Гребенев и др. (Grebenev, S. A. and Prosvetov, A. V. and Burenin, R. A.), 2014, *AstL*, 40, 171-176
- [37] Гребенев и др. (Grebenev, S. A. and Prosvetov, A. V. and Burenin, R. A. and Krivonos, R. A. and Mescheryakov, A. V.), 2016, *AstL*, 42, 69-81

- [38] Гётц и др. (Götz, D. and Mereghetti, S. and Merlini, D. and Sidoli, L. and Belloni, T.), 2006, *A&A*, 448, 873-880
- [39] Гoad и др. (Goad, M. R. and Tyler, L. G. and Beardmore, A. P. and Evans, P. A. and Rosen, S. R. and Osborne, J. P. and Starling, R. L. C. and Marshall, F. E. and Yershov, V. and Burrows, D. N. and Gehrels, N. and Roming, P. W. A. and Moretti, A. and Capalbi, M. and Hill, J. E. and Kennea, J. and Koch, S. and vanden Berk, D.), 2007, *A&A*, 476, 1401-1409
- [40] Гильфанов М.Р. (Gilfanov, M.), 2004, *MNRAS*, 349, 146-168
- [41] ГРИММ Г.-Дж., Гильфанов М.Р. и Сюняев Р.А. (Grimm, H.-J. and Gilfanov, M. and Sunyaev, R.), 2002, *A&A*, 391, 923-944
- [42] Дурошо и др. (Durouchoux, P. and Smith, I. A. and Hurley, K. and Schultz, A. S. B. and Waters, L. B. F. M. and van Paradijs, J. and Wallyn, P. and Hjellming, R. M. and Rupen, M. P. and Marti, J. and Mirabel, F. and Rodriguez, L. F.), 1996, *IAUC*, 6383
- [43] Джиаконни и др. (Giacconi, R. and Gursky, H. and Paolini, F. R. and Rossi, B. B.), 1962, *Physical Review Letters*, vol. 9, Issue 11, pp. 439-443
- [44] Дегенаар и др. (Degenaar, N. and Wijnands, R. and Reynolds, M. T. and Miller, J. M. and Altamirano, D. and Kennea, J. and Gehrels, N. and Haggard, D. and Ponti, G.), 2014, *ApJ*, 792, 109
- [45] Кабаллеро и др. (Caballero, I. and Zurita Heras, J. A. and Mattana, F. and Soldi, S. and Laurent, P. and Lebrun, F. and Natalucci, L. and Fiocchi, M. and Ferrigno, C. and Rohlfs, R.), 2013, *arXiv*, 1304.1349
- [46] Кароли и др. (Caroli, E. and Stephen, J. B. and Di Cocco, G. and Natalucci, L. and Spizzichino, A.), 1987, *Space Science Reviews*, 45, 349-403
- [47] Кусумано и др. (Cusumano, G. and La Parola, V. and Segreto, A. and Ferrigno, C. and Maselli, A. and Sbarufatti, B. and Romano, P. and Chincarini, G. and Giommi, P. and Masetti, N. and Moretti, A. and Parisi, P. and Tagliaferri, G.), 2010, *A&A*, 524, A64
- [48] Кеннеа и др. (Kennea, J. A. and Heinke, C. O. and Bahramian, A. and Maccarone, T. and in't Zand, J. and Kuulkers, E. and Degenaar, N. and Shaw, A. W. and Sivakoff, G. R. and Strader, J. and Wijnands, R.), 2017, *ATel*, 10273
- [49] КИМ и др. (Kim, D.-W. and Fabbiano, G. and Kalogera, V. and King, A. R. and Pellegrini, S. and Trinchieri, G. and Zepf, S. E. and Zezas, A. and Angelini, L. and Davies, R. L. and Gallagher, J. S.), 20076, *ApJ*, 652, 1090-1096
- [50] Компанец, А.С. (Kompaneets, A.S.), 1957, *Soviet Physics JETP*, 4, 730-737

- [51] Козловский и др. (Kozłowski, S. and Kochanek, C. S. and Jacyszyn, A. M. and Udalski, A. and Szymański, M. K. and Poleski, R. and Kubiak, M. and Soszyński, I. and Pietrzyński, G. and Wyrzykowski, Ł. and Ulaczyk, K. and Pietrukowicz, P.), 2012, *ApJ*, 746, 27
- [52] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Vikhlinin, A. and Churazov, E. and Lutovinov, A. and Molkov, S. and Sunyaev, R.), 2005, *ApJ*, 625, 89-94
- [53] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Revnirtsev, M. and Lutovinov, A. and Sazonov, S. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2007, *A&A*, 475, 775-784
- [54] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Revnirtsev, M. and Churazov, E. and Sazonov, S. and Grebenev, S. and Sunyaev, R.), 2007, *A&A*, 463, 957-967
- [55] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Revnirtsev, M. and Tsygankov, S. and Sazonov, S. and Vikhlinin, A. and Pavlinsky, M. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2010, *A&A*, 519, A107
- [56] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Tsygankov, S. and Revnirtsev, M. and Grebenev, S. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2010, *A&A*, 523, A61
- [57] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Tsygankov, S. and Lutovinov, A. and Revnirtsev, M. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2012, *A&A*, 545, A27
- [58] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Tsygankov, S. and Lutovinov, A. and Revnirtsev, M. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2015, *MNRAS*, 448, 3766-3774
- [59] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Tsygankov, S. and Revnirtsev, M. and Sazonov, S. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2012, *A&A*, 537, A92
- [60] Крим и др. (Krimm, H. A. and Barthelmy, S. D. and Baumgartner, W. and Cummings, J. and Gehrels, N. and Lien, A. Y. and Markwardt, C. B. and Palmer, D. and Sakamoto, T. and Stamatikos, M. and Ukwatta, T.), 2014, *ATel*, 5986
- [61] Куулкерс и др. (Kuulkers, E. and Shaw, S. E. and Paizis, A. and Chenevez, J. and Brandt, S. and Courvoisier, T. J.-L. and Domingo, A. and Ebisawa, K. and Kretschmar, P. and Markwardt, C. B. and Mowlavi, N. and Oosterbroek, T. and Orr, A. and Rísquez, D. and Sanchez-Fernandez, C. and Wijnands, R.), 2007, *A&A*, 466, 595-618
- [62] Куранов А.Г., Постнов К.А. и Ревнивцев М.Г. (Kuranov, A. G. and Postnov, K. A. and Revnirtsev, M. G.), 2014, *AstL*, 40, 29-45
- [63] Кэш, В. (Cash, W.), 1976, *ApJ*, 228, 939-947
- [64] Ланди и др. (Landi, R. and Masetti, N. and Bassani, L. and Capitanio, F. and Fiacchi, M. T. and Bird, A. J. and Hill, A. B. and Gehrels, N. and Markwardt, C. B. and Perri, M.), 2007, *ATel*, 1273

- [65] Лебран и др. (Lebrun, F. and Leray, J. P. and Lavocat, P. and Crétole, J. and Arquès, M. and Blondel, C. and Bonnin, C. and Bouère, A. and Cara, C. and Chaleil, T. and Daly, F. and Desages, F. and Dzitko, H. and Horeau, B. and Laurent, P. and Limousin, O. and Mathy, F. and Mauguen, V. and Meignier, F. and Molinié, F. and Poindron, E. and Rouger, M. and Sauvageon, A. and Tourrette, T.), 2003, *A&A*, 411, L141-L148
- [66] Левин и др. (Lewin, W. H. G. and van Paradijs, J. and Taam, R. E.), 1993, *Space Science Reviews*, 62, 223-389
- [67] Лутовинов и др. (Lutovinov, A. and Walter, R. and Belanger, G. and Lund, N. and Grebenev, S. and Winkler, C.), 2003, *ATel*, 155
- [68] Лутовинов и др. (Lutovinov, A. and Revnivitsev, M. and Gilfanov, M. and Shtykovskiy, P. and Molkov, S. and Sunyaev, R.), 2005, *A&A*, 444, 821-829
- [69] Лутовинов и др. (Lutovinov, A. A. and Vikhlinin, A. and Churazov, E. M. and Revnivitsev, M. G. and Sunyaev, R. A.), 2008, *ApJ*, 687, 968-975
- [70] Лутовинов А.А., Гребенев С.А. и Цыганков С.С. (Lutovinov, A. A. and Grebenev, S. A. and Tsygankov, S. S.), 2012, *AstL*, 38, 492-496
- [71] Лунд и др. (Lund, N. and Budtz-Jørgensen, C. and Westergaard, N. J. and Brandt, S. and Rasmussen, I. L. and Hornstrup, A. and Oxborrow, C. A. and Chenevez, J. and Jensen, P. A. and Laursen, S. and Andersen, K. H. and Mogensen, P. B. and Rasmussen, I. and Omø, K. and Pedersen, S. M. and Polny, J. and Andersson, H. and Andersson, T. and Kämäräinen, V. and Vilhu, O. and Huovelin, J. and Maisala, S. and Morawski, M. and Juchnikowski, G. and Costa, E. and Feroci, M. and Rubini, A. and Rapisarda, M. and Morelli, E. and Carassiti, V. and Frontera, F. and Pellicciari, C. and Loffredo, G. and Martínez Núñez, S. and Reglero, V. and Velasco, T. and Larsson, S. and Svensson, R. and Zdziarski, A. A. and Castro-Tirado, A. and Attina, P. and Gorla, M. and Giulianelli, G. and Cordero, F. and Rezazad, M. and Schmidt, M. and Carli, R. and Gomez, C. and Jensen, P. L. and Sarri, G. and Tiemon, A. and Orr, A. and Much, R. and Kretschmar, P. and Schnopper, H. W.), 2003, *A&A*, 411, L231-L238
- [72] Мализия и др. (Malizia, A. and Bassani, L. and Sguera, V. and Stephen, J. B. and Bazzano, A. and Focci, M. and Bird, A. J.), 2010, *MNRAS*, 408, 975-982
- [73] Марти и др. (Marti, J. and Mirabel, I. F. and Duc, P.-A. and Rodriguez, L. F.), 1997, *A&A*, 323, 158-162
- [74] Мереминский и др. (Mereminskiy, I. and Krivonos, R. and Grebenev, S. and Filippova, E. and Sunyaev, R.), 2016, *ATel*, 9517
- [75] Мереминский и др. (Mereminskiy, I. A. and Grebenev, S. A. and Krivonos, R. A. and Chelovekov, I. V. and Sunyaev, R. A.), 2017, *ATel*, 10256

- [76] Мереминский и др. (Mereminskiy, I. A. and Grebenev, S. A. and Krivonos, R. A. and Chelovekov, I. V. and Sunyaev, R. A.), 2017, ATel, 10272
- [77] Мерц и Янг (Mertz, L and Young, N.O.), 1961, Proceedings of the International Conference on Optical Instrumentation, 305
- [78] Миллер и др. (Miller, J. M. and Tomsick, J. A. and Bachetti, M. and Wilkins, D. and Boggs, S. E. and Christensen, F. E. and Craig, W. W. and Fabian, A. C. and Grefenstette, B. W. and Hailey, C. J. and Harrison, F. A. and Kara, E. and King, A. L. and Stern, D. K. and Zhang, W. W.), 2015, ApJ, 799, L6
- [79] Молюков и др. (Molkov, S. V. and Cherepashchuk, A. M. and Lutovinov, A. A. and Revnivitsev, M. G. and Postnov, K. A. and Sunyaev, R. A.), 2003, AstL, 30, 534-539
- [80] Молюков С.В, Лутовинов А.А и Фаланга М. (Molkov, S. V. and Lutovinov, A. A. and Falanga, M.), 2015, AstL, 41, 562-574
- [81] Нейлсен и др. (Neilsen, J. and Motta, S. and Ponti, G. and Coriat, M. and Fender, R. and Corbel, S.), 2016, ATel, 9541
- [82] Ода, М. (Oda, M.), 1965, Applied Optics, 4, 143-143
- [83] Палтани и др. (Paltani et al.), 2008, A&A, 485, 707-718
- [84] Павлинский М.Н., Гребенев С.А. и Сюняев Р.А. (Pavlinsky, M. N. and Grebenev, S. A. and Sunyaev, R. A.), 1994, ApJ, 425, 110-121
- [85] Поль и др. (Paul, J. and Bouchet, L. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 1996, IAUC, 6348
- [86] Постнов К.А. и Куранов А.Г. (Postnov, K. A. and Kuranov, A. G.), 2005, AstL, 31, 7-14
- [87] Рассел и др. (Russell, D. M. and Fender, R. P. and Hynes, R. I. and Brocksopp, C. and Homan, J. and Jonker, P. G. and Buxton, M. M.), 2006, MNRAS, 371, 1334-1350
- [88] Ревнивцев и др. (Revnitsev, M. G. and Sunyaev, R. A. and Varshalovich, D. A. and Zheleznyakov, V. V. and Cherepashchuk, A. M. and Lutovinov, A. A. and Churazov, E. M. and Grebenev, S. A. and Gilfanov, M. R.), 2004, AstL, 30, 382-389
- [89] Ревнивцев и др. (Revnitsev, M. and Sazonov, S. and Jahoda, K. and Gilfanov, M.), 2004, A&A, 418, 927-936
- [90] Ревнивцев и др. (Revnitsev, M. and Lutovinov, A. and Churazov, E. and Sazonov, S. and Gilfanov, M. and Grebenev, S. and Sunyaev, R.), 2008, A&A, 491, 209-217
- [91] Ревнивцев и др. (Revnitsev, M. and Sazonov, S. and Krivonos, R. and Ritter, H. and Sunyaev, R.), 2008, A&A, 489, 1121-1127

- [92] Ревнивцев и др. (Revnivtsev, M. and Postnov, K. and Kuranov, A. and Ritter, H.), 2011, *A&A*, 526, A94
- [93] Ремиллард Р.А. и МакКлинток Дж. И. (Remillard, R. A. and McClintock, J. E.), 2006, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 44, 49-92
- [94] Роминг и др. (Roming, P. W. A. and Kennedy, T. E. and Mason, K. O. and Nousek, J. A. and Ahr, L. and Bingham, R. E. and Broos, P. S. and Carter, M. J. and Hancock, B. K. and Huckle, H. E. and Hunsberger, S. D. and Kawakami, H. and Killough, R. and Koch, T. S. and McLelland, M. K. and Smith, K. and Smith, P. J. and Soto, J. C. and Boyd, P. T. and Breeveld, A. A. and Holland, S. T. and Ivanushkina, M. and Pryzby, M. S. and Still, M. D. and Stock, J.), 2005, *Space Science Reviews*, 120, 95-142
- [95] Росен и др. (Rosen, S. R. and Webb, N. A. and Watson, M. G. and Ballet, J. and Barret, D. and Braitto, V. and Carrera, F. J. and Ceballos, M. T. and Coriat, M. and Della Ceca, R. and Denkinson, G. and Esquej, P. and Farrell, S. A. and Freyberg, M. and Gris e, F. and Guillout, P. and Heil, L. and Law-Green, D. and Lamer, G. and Lin, D. and Martino, R. and Michel, L. and Motch, C. and Nebot Gomez-Moran, A. and Page, C. G. and Page, K. and Page, M. and Pakull, M. W. and Pye, J. and Read, A. and Rodriguez, P. and Sakano, M. and Saxton, R. and Schwope, A. and Scott, A. E. and Sturm, R. and Traulsen, I. and Yershov, V. and Zolotukhin, I.), 2016, *A&A*, 590, A1
- [96] Сазонов и др. (Sazonov, S. and Revnivtsev, M. and Krivonos, R. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2007, *A&A*, 462, 57-66
- [97] Сазонов С.Ю., Лутовинов А.А. и Кривонос Р.А. (Sazonov S.Y., Lutovinov A.A. and Krivonos R.A.), 2014, *AstL*, 40, 65-74
- [98] Сазонов С.Ю., Чуразов Е.М. и Кривонос Р.А. (Sazonov, S. and Churazov, E. and Krivonos, R.), 2015, *MNRAS*, 454, 1202-1220
- [99] Сакано и др. (Sakano, M. and Koyama, K. and Murakami, H. and Maeda, Y. and Yamauchi, S.), 2002, *ApJS*, 138, 19-34
- [100] Сакстон и др. (Saxton, R. D. and Read, A. M. and Esquej, P. and Freyberg, M. J. and Altieri, B. and Bermejo, D.), 2008, *A&A*, 480, 611-622
- [101] Санчес-Фернандес, С. (S nchez-Fern ndez, C.), 2012, *Astrostatistics and Data Mining*, 223
- [102] Скиннер и др. (Skinner, G. K. and Willmore, A. P. and Eyles, C. J. and Bertram, D. and Church, M. J.), 1987, *Nature*, 330, 544-547
- [103] Стикель М. и Кюхр Х., С. (Stickel, M. and Kuehr, H.), 1993, *A&AS*, 100, 395-411
- [104] Сугизаки и др. (Sugizaki, M. and Mitsuda, K. and Kaneda, H. and Matsuzaki, K. and Yamauchi, S. and Koyama, K.), 2001, *ApJS*, 134, 77-102

- [105] Сюняев и др. (Siuniaev, R. A. and Churazov, E. M. and Gil'Fanov, M. R. and Pavlinskii, M. and Grebenev, S. and Dekhanov, I. and Kuznetsov, A. V. and Iyamburenko, N. S. and Skinner, G. K. and Patterson, T. G.), 1991, *Advances in Space Research*, 11, 177-185
- [106] Сюняев и др. (Syunyaev, R. and Pavlinskii, M. and Churazov, E. and Gilfanov, M. and Grebenev, S. and Markevich, M. and Dekhanov, I. and Yamburenko, N. and Babalyan, G.), 1991, *Soviet Astronomy Letters*, 17, 42
- [107] Томсик и др. (Tomsick, J. A. and Chaty, S. and Rodriguez, J. and Walter, R. and Kaaret, P.), 2008, *ApJ*, 685, 1143-1156
- [108] Убертини и др. (Ubertini, P. and Lebrun, F. and Di Cocco, G. and Bazzano, A. and Bird, A. J. and Broenstad, K. and Goldwurm, A. and La Rosa, G. and Labanti, C. and Laurent, P. and Mirabel, I. F. and Quadrini, E. M. and Ramsey, B. and Reglero, V. and Sabau, L. and Sacco, B. and Staubert, R. and Vigroux, L. and Weisskopf, M. C. and Zdziarski, A. A.), 2003, *A&A*, 411, L131-L139
- [109] Уолтер и др. (Walter et al.), 2015, *A&ARv*, 23, 99
- [110] Филиппова и др. (Filippova, E. and Kuulkers, E. and Skådt, N. M. and Alfonso-Garzon, J. and Beckmann, V. and Bird, A. J. and Brandt, S. and Chenevez, J. and Del Santo, M. and Domingo, A. and Ebisawa, K. and Jonker, P. G. and Kretschmar, P. and Markwardt, C. B. and Oosterbroek, T. and Paizis, A. and Pottschmidt, K. and Sanchez-Fernandez, C. and Wijnands, R. and Bozzo, E. and Ferrigno, C.), 2014, *ATel*, 5991
- [111] Форман и др. (Forman, W. and Jones, C. and Cominsky, L. and Julien, P. and Murray, S. and Peters, G. and Tananbaum, H. and Giacconi, R.), 1978, *ApJS*, 38, pp. 357-412
- [112] Фридман, Г. (Friedman, H.), 1964, *Scientific American*, vol. 210, issue 6, pp. 36-45
- [113] Фюрст и др. (Fuerst, F. and Tomsick, J. A. and Yamaoka, K. and Dauser, T. and Miller, J. M. and Clavel, M. and Corbel, S. and Fabian, A. C. and Garcia, J. and Harrison, F. A. and Loh, A. and Kaaret, P. and Kalemci, E. and Migliari, S. and Miller-Jones, J. C. A. and Pottschmidt, K. and Rahoui, F. and Rodriguez, J. and Stern, D. and Stuhlinger, M. and Walton, D. J. and Wilms, J.), 2016, *ApJ*, 831, 115
- [114] Харрисон и др. (Harrison, F. A. and Aird, J. and Civano, F. and Lansbury, G. and Mullaney, J. R. and Ballantyne, D. R. and Alexander, D. M. and Stern, D. and Ajello, M. and Barret, D. and Bauer, F. E. and Balokovic, M. and Brandt, W. N. and Brightman, M. and Boggs, S. E. and Christensen, F. E. and Comastri, A. and Craig, W. W. and Del Moro, A. and Forster, K. and Gandhi, P. and Giommi, P. and Grefenstette, B. W. and Hailey, C. J. and Hickox, R. C. and Hornstrup, A. and Kitaguchi, T. and Koglin, J. and Luo, B. and Madsen, K. K. and Mao, P. H. and Miyasaka, H. and Mori, K. and Perri, M. and Pivovarov, M. and Puccetti, S. and Rana, V. and Treister, E. and Walton, D. and Westergaard, N. J. and Wik, D. and Zappacosta, L. and Zhang, W. W. and Zoglauer, A.), *ApJ*, 831, 185

- [115] Хейнке и др. (Heinke, C., O. and Bahramian, A. and Maccarone, T. and in't Zand, J. and Kennea, J. and Kuulkers, E. and Degenaar, N. and Shaw, A., W. and Sivakoff, G., R. and Strader, J. and Wijnands, R.), 2017, ATel, 10265
- [116] Холт, С. (Holt, S. S.), 1976, *Astrophysics and Space Science*, 42, 123-141
- [117] Хучра и Саргент (Huchra, J. and Sargent, W. L. W.), 1973, *ApJ*, 186, 433-443
- [118] Шоппер и др. (Schnopper, H. W. and Bradt, H. V. and Rappaport, S. and Boughan, E. and Burnett, B. and Doxsey, R. and Mayer, W. and Watt, S.), 1970, *ApJL*, 161, L161
- [119] Чуразов и др. (Churazov, E. and Sunyaev, R. and Isern, J. and Knödlseider, J. and Jean, P. and Lebrun, F. and Chugai, N. and Grebenev, S. and Bravo, E. and Sazonov, S. and Renaud, M.), 2014, *Nature*, 512, 406-408
- [120] Человеков и др. (Chelovekov, I. V. and Grebenev, S. A. and Sunyaev, R. A.), 2006, *AstL*, 32, 456-477
- [121] Человеков И.В. и Гребенев С.А. (Chelovekov, I. V. and Grebenev, S. A.), 2007, *AstL*, 33, 807-813
- [122] Человеков И.В. и Гребенев С.А. (Chelovekov, I. V. and Grebenev, S. A.), 2010, *AstL*, 36, 895-903
- [123] Человеков И.В. и Гребенев С.А. (Chelovekov, I. V. and Grebenev, S. A.), 2011, *AstL*, 37, 597-620
- [124] Человеков и др. (Chelovekov, I. V., Grebenev, S. A., Mereminskiy, I. A., Prosvetov, A. V.), 2017, *AstL*, 43, 859-874
- [125] Шеневез и др. (Chenevez, J. and Kuulkers, E. and Brandt, S. and Wijnands, R. and Alfonso-Garzón, J. and Beckmann, V. and Bird, T. and Del Santo, M. and Domingo, A. and Ebisawa, K. and Jonker, P. and Kretschmar, P. and Markwardt, C. and Oosterbroek, T. and Paizis, A. and Pottschmidt, K. and Sánchez-Fernández, C.), 2012, ATel, 4050
- [126] ШМИДТ М. (Huchra, J. and Sargent, W. L. W.), 1968, *ApJ*, 151, 393
- [127] Шоу и др. (Shaw, A. W. and Heinke, C. O. and Sivakoff, G. R. and Bahramian, A. and Strader, J. and Maccarone, T. J. and Kennea, J. A. and Kuulkers, E. and in't Zand, J. J. M. and Wijnands, R. and Degenaar, N.), 2017, ATel, 10305
- [128] Эбисава и др. (Ebisawa, K. and Bourban, G. and Bodaghee, A. and Mowlavi, N. and Courvoisier, T. J.-L.), 2003, *A&A*, 411, L59-L62
- [129] Эванс и др. (Evans, P. A. and Beardmore, A. P. and Page, K. L. and Osborne, J. P. and O'Brien, P. T. and Willingale, R. and Starling, R. L. C. and Burrows, D. N. and Godet, O. and Vetere, L. and Racusin, J. and Goad, M. R. and Wiersema, K. and Angelini, L.

and Capalbi, M. and Chincarini, G. and Gehrels, N. and Kennea, J. A. and Margutti, R. and Morris, D. C. and Mountford, C. J. and Pagani, C. and Perri, M. and Romano, P. and Tanvir, N.), 2009, MNRAS, 397, 1177-1201

[130] Эванс и др. (P. A. Evans and J. P. Osborne and A. P. Beardmore and K. L. Page and R. Willingale and C. J. Mountford and C. Pagani and D. N. Burrows and J. A. Kennea and M. Perri and G. Tagliaferri and N. Gehrels), ApJS, 210, 8

[131] Яппет Т. (Jarrett, T.), 2004, PASA, 21, 396-403