

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Человеков Иван Васильевич

**СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АККРЕЦИРУЮЩИХ
НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД СО СЛАБЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПО
ДАНЫМ ОРБИТАЛЬНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ ГРАНАТ, RXTE И
ИНТЕГРАЛ**

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

Москва
2006

В первую очередь я хочу выразить глубокую благодарность своим учителям: Гордюнину Сергею Алексеевичу, Бега Рудольфу Карловичу и Парфеновой Людмиле Сергеевне. Именно эти люди помогли мне встать на научную стезю.

Деятельность, а тем более формирование современного ученого невозможны без научного коллектива. Мне посчастливилось работать в лучшем, на мой взгляд, - коллективе отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Огромное спасибо Александру Лутовинову, Сергею Молькову, Михаилу Ревнивцеву, Алексею Вихлинину, Роману Кривоносу и многим другим за вашу помощь и плодотворное сотрудничество.

И, конечно же, особую благодарность я хочу выразить моему научному руководителю Сергею Андреевичу Гребеневу. С самых первых моих шагов в астрофизике он чутко и неустанно поддерживал меня и передавал все лучшее, чем гордится российская астрофизическая школа.

Посвящается моим родителям

Содержание

Введение	5
I ОРБИТАЛЬНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ОБСЕРВАТОРИИ	9
1 ПРИБОРЫ ОРБИТАЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ	11
1.1 ГРАНАТ	11
1.1.1 Телескоп АРТ-II	11
1.2 RXTE	13
1.2.1 Детектор PCA	13
1.2.2 Детектор HEXTE	14
1.2.3 Монитор всего неба ASM	14
1.3 ИНТЕГРАЛ	15
1.3.1 Телескоп IBIS	16
1.3.2 Рентгеновский монитор JEM-X	18
II МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ЯРКИХ МАЛОМАССИВНЫХ ДВОЙНЫХ	21
2 СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ VDLE	23
2.1 Введение	23
2.2 Спектр погранслоя	24
2.3 Модель с чернотельным диском	25
2.4 Спектр центральной области диска	26
2.5 Наблюдения	28
2.6 Обсуждение	29
III РЕНТГЕНОВСКИЕ БАРСТЕРЫ	31
3 MX 0836-42	33
3.1 Введение	33
3.2 Наблюдения и анализ данных	33
3.3 Спектр постоянного излучения	38
3.4 Рентгеновские всплески	42
3.5 Обсуждение	48
4 KS 1731-260	51
4.1 Введение	51
4.2 Наблюдения	53
4.3 Спектр постоянного излучения	54

4.4	Рентгеновские всплески	59
4.5	Обсуждение	63
5	GX 354-0 (4U 1728-34)	65
5.1	Введение	65
5.2	Наблюдения	66
5.3	Рентгеновские всплески	68
5.4	Спектр постоянного излучения	72
5.5	Обсуждение	80
 IV КАТАЛОГ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЛЕСКОВ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА IBIS/ISGR1 ОБСЕРВАТОРИИ ИНТЕГРАЛ ЗА 2003- 2005 гг		83
6	КАТАЛОГ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЛЕСКОВ	85
6.1	Введение	85
6.2	Наблюдения и методы обработки данных	87
6.3	Результаты	88
6.3.1	Новый рентгеновский барстер	90
6.3.2	Ранее известные барстеры	90
6.3.3	Другие источники всплесков	121
6.4	Обсуждение	121
Заключение		123

ВВЕДЕНИЕ

Еще в 30-х годах XX века, вскоре после открытия нейтрона, было предсказано существование нейтронных звезд с радиусом ~ 10 км и плотностью, близкой к ядерной. Мощные гравитационные и магнитные поля, сверхвысокие плотности вещества и излучения, достижимые вблизи нейтронных звезд, делают их уникальными естественными лабораториями для исследования физических процессов в экстремальных условиях и проверки современных теорий.

Многие нейтронные звезды входят в состав двойных систем и излучают в рентгеновском и гамма-диапазонах за счет аккреции вещества звезды-спутника. Такие рентгеновские системы можно подразделить на два класса: массивные и маломассивные (в англоязычной литературе приняты аббревиатуры НМХВ и ЛМХВ соответственно). Маломассивные двойные рентгеновские системы, т.е. системы, состоящие из аккрецирующей нейтронной звезды и оптической звезды-спутника, принадлежащей к позднему спектральному классу и имеющей массу порядка солнечной, образуют достаточно многочисленную группу среди рентгеновских источников Галактики. В качестве компактного объекта в такой системе может выступать либо нейтронная звезда, либо черная дыра звездной массы. Далее мы рассматриваем ЛМХВ-системы, компактным объектом в которых является нейтронная звезда. Свойства таких систем сильнее всего зависят от величины магнитного поля нейтронной звезды. Можно выделить два типа источников: молодые системы с сильным магнитным полем ($B \sim 10^{12}$ Гс) и сравнительно старые системы со слабым полем ($B \sim 10^9$ Гс). Первые в подавляющем большинстве являются пульсарами, т.е. рентгеновскими источниками, от которых регистрируются периодически повторяющиеся импульсы излучения. Нас будут интересовать системы со слабым полем. Этот тип объектов очень разнообразен в своих проявлениях. Излучение, регистрируемое от таких объектов, может характеризоваться рентгеновскими всплесками (длительностью от нескольких секунд до десятков минут), мощными продолжительными вспышками (длящимися дни и даже месяцы), дипами (резкими провалами на кривой блеска), наконец, квазипериодическими осцилляциями потока излучения. От нескольких таких объектов были обнаружены килогерцевые квазипериодические и когерентные пульсации, свидетельствующие о том, что нейтронные звезды в этих системах вращаются со скоростью несколько сот оборотов в секунду.

Большинство "слабых" ЛМХВ, светимость которых составляет $L \sim 10^{36} - 10^{37}$ эрг/с, являются барстерами, т.е. источниками, демонстрирующими всплески рентгеновского излучения. Величина постоянного потока излучения от них, как правило, в несколько раз меньше, чем от "ярких" источников.

Теоретические модели рентгеновских всплесков основываются на рассмотрении процесса аккреции вещества на нейтронную звезду. Предложено два сценария всплеска. В одном энергия для вспышки черпается из ядерной энергии, запасенной в аккрецирующем веществе, выпавшем на поверхность нейтронной звезды. Во втором - высвобождается гравитационная потенциальная энергия па-

дающего вещества. Существуют весоые доказательства того, что рентгеновские всплески I рода, характеризующиеся быстрым подъемом и медленным экспоненциальным спадом потока излучения, происходят за счет термоядерной неустойчивости оболочки нейтронной звезды. Неустойчивость аккреционного потока, вероятно, является причиной всплесков II рода, наблюдаемых, например, от известного источника “Быстрый барстер” (4U 1730-335).

В простой физической картине потенциальное ядерное топливо в виде водорода и гелия аккрецирует на нейтронную звезду с оптического компаньона. По мере накопления аккреционного вещества на поверхности звезды оказываемое им высокое давление приводит к возникновению ядерных реакций, конечным результатом которых является образование ядер железа с плотностью $\rho \leq 10^{11}$ г см⁻³. Переход в железо при широком диапазоне внешних условий носит взрывной характер. Из-за температурной зависимости скорости ядерных реакций эти слои подвержены термической неустойчивости, возникающей в результате экзотермических реакций. Высвобожденная ядерная энергия выносится на поверхность и становится причиной непродолжительных (порядка десятков секунд) рентгеновских вспышек - всплесков.

Термоядерная модель успешно описывает основные черты рентгеновских всплесков, в частности, малое время возрастания интенсивности излучения до максимума (~ 1 с), долгое время квазиэкспоненциального спада ($\sim 15 - 300$ с), периоды повторения вспышек (несколько часов), энерговыделение ($\sim 10^{39} - 10^{40}$ эрг), отношение энергии, выделяемой между всплесками, к энергии, выделяемой во время всплеска, $\sim 100 - 1000$, и смягчение спектра по мере спада интенсивности излучения. Сравнение экспериментальных данных с предсказаниями теории позволяет определить параметры, характеризующие область взрыва, — поверхность нейтронной звезды.

Постоянное излучение аккрецирующих нейтронных звезд со слабым магнитным полем формируется в двух геометрически разделенных областях вблизи звезды. Во-первых, это пограничный слой, который образуется в месте соприкосновения аккреционного диска и поверхности нейтронной звезды. Энерговыделение в погранслое связано с резким уменьшением скорости аккрецирующего вещества с кеплеровской скорости на внутренней границе диска $\Omega_k = (GM/R^3)^{1/2}$ до значительно меньшей скорости Ω вращения самой звезды. На единицу массы вещества энерговыделение составляет $0.5R^2\Omega_k^2 = 0.5MG/R$. Во-вторых, это собственно аккреционный диск, излучающий за счет гравитационной энергии падающего вещества. Здесь выделяется тоже $0.5MG/R$ (в пределе ньютоновской гравитации), т.е. светимости погранслоя и аккреционного диска должны совпадать.

Разделение двух спектральных компонент и определение физических параметров системы стало важнейшей проблемой при исследовании постоянного рентгеновского излучения маломассивных рентгеновских двойных. Недавно было предложено выделять излучение погранслоя из общего спектра излучения системы с помощью частотно-разрешенной рентгеновской фурье-спектроскопии ([21]). Предполагалось, что излучение аккреционного диска должно характеризоваться меньшей степенью хаотической переменности по сравнению с излучением погранслоя в диапазоне фурье-частот $f \gtrsim 0.5 - 1$ Гц и может вносить свой вклад в общую переменность потока излучения лишь в области малых фурье-частот. Считая спектр излучения погранслоя равным перенормированному частотно-разрешенному спектру, что верно с заранее неизвестной точностью, можно разделить две компоненты спектра.

Во второй главе диссертации предлагается способ решения данной задачи.

Структура диссертации

Диссертация состоит из четырех частей.

Первая часть диссертации состоит из одной главы, посвященной краткому описанию орбитальных обсерваторий ГРАНАТ, RXTE и ИНТЕГРАЛ и технических характеристик приборов в составе этих обсерваторий, данные с которых были использованы в работе.

Вторая часть диссертации состоит из одной главы, посвященной описанию спектральной модели BDLE, предложенной для аппроксимации спектров рентгеновского излучения ярких маломассивных рентгеновских двойных систем, содержащих нейтронную звезду со слабым магнитным полем в качестве компактного объекта. Модель учитывает две спектральные компоненты, связанные с излучением пограничного слоя, образующегося в месте соприкосновения аккреционного диска и поверхности нейтронной звезды, и излучением собственно диска. Компоненты связаны между собой соотношением светимостей (в ньютоновском случае — просто равенством, отсюда название модели: Boundary layer — Disk Luminosity Equality). Поэтому форма и нормировка формирующихся интегральных спектров полностью определяются лишь четырьмя параметрами: темпом аккреции, наклоном диска, температурой внешних слоев погранслоя и радиусом нейтронной звезды. Спектр погранслоя полагается комптонизованным - виновским либо тепловым, модифицированным рассеянием в экспоненциальной атмосфере. Существенно, что при рассматриваемых значениях темпа аккреции излучение центральных областей диска также является виновским, с температурой, заметно большей его эффективной температуры.

Модель BDLE была адаптирована для использования с известным пакетом HEAsoft и успешно применена к аппроксимации спектров, измеренных у реальных рентгеновских источников.

Третья часть диссертации состоит из одной главы, посвященной изучению отдельных барстеров, т.е. маломассивных двойных систем, содержащих нейтронную звезду со слабым магнитным полем в качестве компактного объекта, в потоке рентгеновского излучения от которых наблюдаются всплески. Рассмотрены временное и спектральное поведение барстеров MX0836-42, KS1731-260 и GX354-0 в спокойном состоянии и во время всплеска.

Четвертая часть диссертации состоит из одной главы, которая посвящена поиску всплесков от рентгеновских барстеров по данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ, а также исследованию их свойств. Проанализировано более 25 тысяч временных историй наблюдений, проведенных детектором IS-GRI/IBIS в диапазоне энергий 15-25 кэВ. Обнаружено более 1900 всплесков, 390 из которых удалось отождествить с известными источниками рентгеновского излучения. Открыт один ранее неизвестный рентгеновский источник - барстер. Проведен подробный анализ более 60 всплесков, зарегистрированных от рентгеновского барстера GX354-0: исследованы статистические распределения числа всплесков по их длительности, уровню максимального потока и периоду рекуррентности.

Часть I

**ОРБИТАЛЬНЫЕ
РЕНТГЕНОВСКИЕ
ОБСЕРВАТОРИИ**

Глава 1

ПРИБОРЫ ОРБИТАЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

1.1 ГРАНАТ

1.1.1 Телескоп АРТ-П

Астрономический рентгеновский телескоп АРТ-П (рис. 1.1) с кодирующей апертурой, созданный совместными усилиями отдела Астрофизики Высоких Энергий ИКИ РАН и бывшего Особого Конструкторского Бюро ИКИ РАН (г. Бишкек), является одним из двух основных телескопов обсерватории ГРАНАТ, которая работала на высокоапогейной орбите (начальная высота апогея 200000 км, перигея – 2000 км) с 1 декабря 1989 г. по 1998 г. Телескоп состоит из четырех идентичных модулей, каждый из которых в свою очередь состоит из позиционно-чувствительного детектора, кодирующей маски и коллиматора. В табл.1.1 приведены основные технические параметры телескопа. Конструкция телескопа АРТ-П основана на геометрии с полным кодированием. Используется многомотивная URA маска (4x4 мотива), при этом на входном окне детектора помещается 3x3 мотива. Оригинальная конструкция телескопа обеспечивала полное кодирование во всем поле зрения, позволяя при этом компенсировать искажения, связанные с затенением стенками коллиматора. В качестве позиционно-чувствительного детектора используется многопроволочная пропорциональная камера. Более подробное описание телескопа АРТ-П, его конструкции и принципов работы можно найти в работе [45].

Полезное время наблюдения телескопом АРТ-П определялось размером выделяемой бортовой памяти на данный сеанс (максимальный объем ~14 Мбайт, обычно использовалось 7 Мбайт) и интенсивностью источника (источников) в поле зрения. При наблюдении фиксировались координаты прихода каждого фотона на детектор, его энергия и момент прихода. Это позволяло проводить точную локализацию, тайминг и спектрометрию источников, а также восстанавливать рентгеновское изображение участка неба, оказавшегося в поле зрения. По накоплении ~ 10^4 событий (5 байт/событие) наблюдение прерывалось на 25 с для передачи информации в бортовую память. В среднем прерывание происходит примерно раз в 150-170 с. в зависимости от яркости наблюдаемого источника. При совместной работе с телескопом СИГМА наблюдения прерывались каждый час на ~ 12 мин для передачи информации из телескопа СИГМА в долговременную память. "Мертвое" время детектора АРТ-П составляет ~ 580 мкс



Рис. 1.1. Общий вид обсерватории ГРАНАТ.

при регистрации полезного события и ~ 50 мкс при регистрации заряженной частицы. Как говорилось выше, телескоп АРТ-П состоит из четырех модулей, идентичных по составу аппаратуры, однако, физические свойства и параметры модулей заметно отличаются. Данные наблюдений, пусть даже одного и того же источника, полученные с помощью разных модулей отличаются по своему качеству. В частности, в 1990 г. наблюдения проводились в основном 1-м и 4-м модулями телескопа, имеющими достаточно высокую чувствительность на энергиях от 2.5 до ~ 25 кэВ. В 1991-92 гг. наблюдения проводились 3-м модулем, эффективным лишь на энергиях выше ~ 6 кэВ. Поэтому по данным этого модуля был крайне затруднен качественный спектральный анализ.

Табл. 1.1. Технические характеристики телескопа АРТ-П.

Параметры	Значение
Энергетический диапазон ^a	2 – 60 кэВ
Полное поле зрения	$3^{\circ}.6 \times 3^{\circ}.4$
Угловое разрешение (FWHM)	$5'.3$
Точность локализации	$\sim 1'.5$
Эффективная площадь одного модуля ^b	312.5 см^2
Временное разрешение	$1/256 \text{ с}$
Энергетическое разрешение на 6 кэВ	22%

^a максимум чувствительности приходится на диапазон 2.5 – 30.0 кэВ

^b с учетом затенения маской

1.2 RXTE

Орбитальная обсерватория RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) (рис. 1.2) была выведена на низкую круговую орбиту Земли (высота: 580 км, наклонение: 23°) 30 декабря 1995 г. Период обращения обсерватории составляет ~ 90 мин. Научные приборы обсерватории позволяют проводить исследования излучения в диапазоне энергий от 2 до 250 кэВ и во временном диапазоне от микросекунд до месяцев. В процессе работы над диссертацией были использованы данные, полученные детекторами PCA и HEXTE и монитором всего неба ASM обсерватории RXTE.

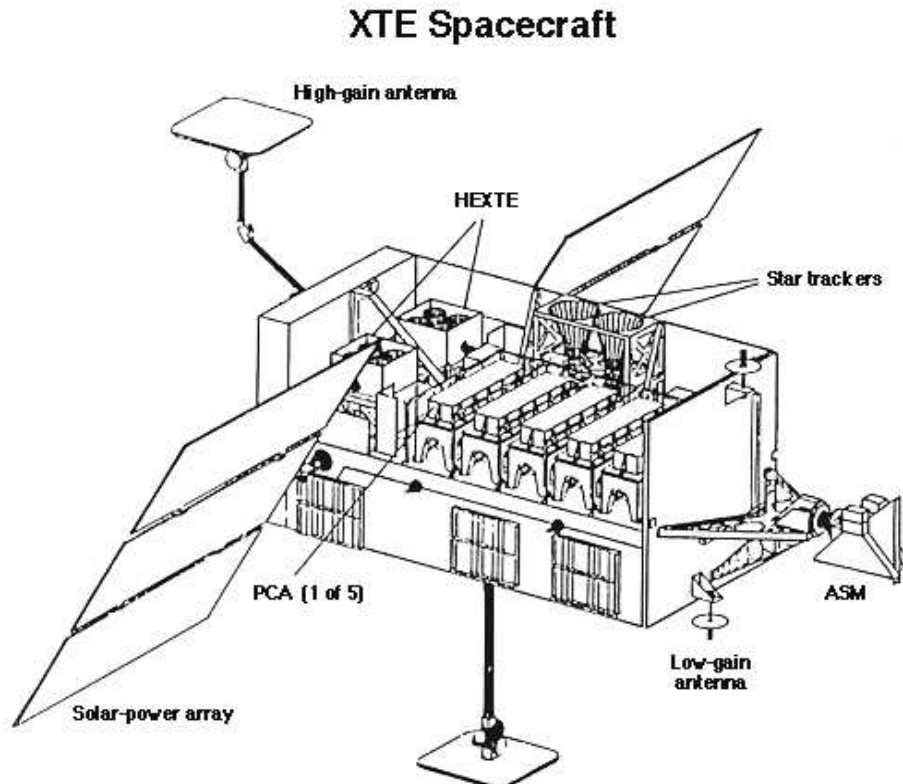


Рис. 1.2. Общий вид обсерватории RXTE.

1.2.1 Детектор PCA

Детектор PCA (Proportional Counter Array) представляет из себя массив из пяти коллимированных пропорциональных счетчиков заполненных ксеноном. Энергетический диапазон чувствительности детекторов составляет $\sim 3 - 40$ кэВ. Сотовый коллиматор ограничивает поле зрения прибора: $\sim 1^\circ \times 1^\circ$. Несмотря на то, что спектрометр не имеет пространственного (углового) разрешения, он может использоваться для локализации ярких источников, работая в режиме сканирования. Такой режим нередко используется в наблюдениях обсерватории и, в отдельных случаях, позволяет локализовать яркие источники с точностью лучше 2 угл. мин.

Передний слой каждого детектора заполнен пропаном, прозрачным для рентгеновских фотонов с энергией выше 3 кэВ, и используется для частичной филь-

трации фоновых частиц ¹. Основной объем детекторов занимает ксенон с малой примесью метана под давлением ~ 1.1 атм. Система, снимающая ток с каждого детектора, состоит из трех слоев катодов, каждый из которых подразделен на две части - "правую" (R) и "левую" (L). В каждый из детекторов встроены калибровочный источник рентгеновского излучения Am^{241} (схема счетчика приведена на рис. 1.3). Полная эффективная площадь детекторов РСА составляет ~ 6500 см² на энергии 6 кэВ, а энергетическое разрешение на той же энергии составляет 18 %. Основные технические характеристики прибора представлены в табл. 1.2.

Табл. 1.2. Технические характеристики спектрометра РСА.

Рабочий диапазон энергии	2.5 – 60 кэВ
Энергетическое разрешение	$\leq 18\%$ на 6 кэВ
Временное разрешение	1 мкс
Пространственное разрешение (FWHM)	1°
Количество детекторов	5
Эффективная площадь каждого детектора	~ 1250 см ²
Чувствительность	0.1 мКраб

Сигнал с детекторов РСА обрабатывается бортовой системой EDS (Experiment Data System), которая позволяет записывать время прихода фотонов с разрешением ~ 1 мкс (2^{-20} сек.) в 256 энергетических каналах. Мертвое время прибора составляет ~ 10 мкс для каждого регистрируемого фотона (эта величина несколько растет с ростом энергии фотона) и ~ 150 мкс на каждую высокоэнергетичную частицу. Поток Крабовидной туманности в диапазоне РСА составляет ~ 2500 отсчетов в секунду в одном детекторе.

1.2.2 Детектор HEXTE

Спектрометр HEXTE (High Energy X-ray Timing Experiment) состоит из двух кластеров, каждый из которых в свою очередь состоит из четырех сцинтилляционных счетчиков. Кластеры могут перенаводиться, поворачиваясь на 1.5° или 3.0° вокруг взаимноперпендикулярных осей каждые 16-128 сек. Это сделано для того, чтобы измерять уровни фонового излучения во время наблюдений. В поле зрения каждого из кластеров смонтирован радиоактивный источник Am^{241} , который используется для автоматической калибровки. В табл. 1.3 приведены основные технические характеристики прибора.

Зарегистрированные детекторами события обрабатываются встроенной системой обработки данных и затем помещаются в общий поток телеметрии спутника. Средняя скорость обработки данных при этом составляет 5 кбит/с.

1.2.3 Монитор всего неба ASM

Монитор всего неба ASM (рис. 1.4) состоит из трех широкоугольных теневых камер, каждая из которых оборудована ксеноновым пропорциональным счетчиком. Суммарная эффективная площадь прибора составляет 90 см². В табл. 1.4 приведены основные технические характеристики прибора.

¹так называемый вето-слой

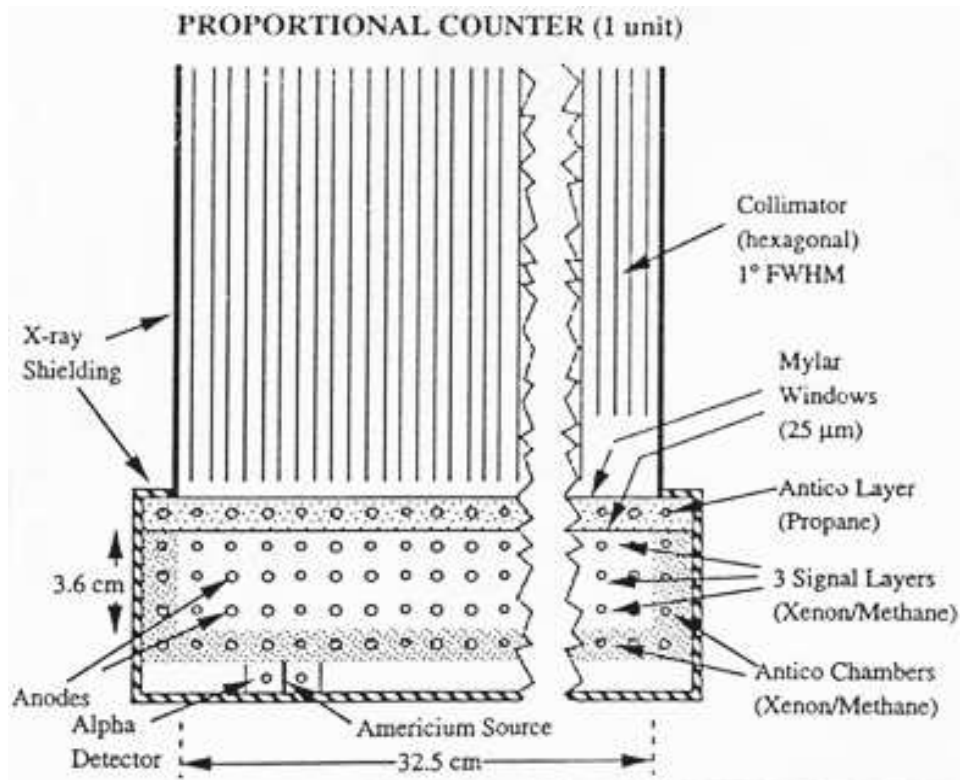


Рис. 1.3. Схема отдельного пропорционального счетчика.

Табл. 1.3. Технические характеристики спектрометра HEXTE.

Рабочий диапазон энергии	15 – 250 кэВ
Энергетическое разрешение	15% на 60 кэВ
Временное разрешение	8 мкс
Поле зрения (FWHM)	1°
Количество детекторов	2 кластера по 4 NaI/CsI сцинтиляционных счетчика
Эффективная площадь каждого детектора	~ 800 см ²
Чувствительность	1 Краб = 360 отсчетов/с/кластер

События, зарегистрированные прибором, обрабатываются вышеупомянутой системой EDS, а затем вставляются в поток телеметрии спутника.

1.3 ИНТЕГРАЛ

Международная астрофизическая обсерватория ИНТЕГРАЛ (рис. 1.5) была выведена на высокоапогейную орбиту (перигей 9300 км, апогей 153000 км) с периодом 72 часа российской ракетой-носителем ПРОТОН 17 октября 2002 г. Столь вытянутая орбита и большая высота перигея позволяют проводить практически непрерывные наблюдения со спутника (85% времени) в условиях постоянного фона вне радиационных поясов Земли. В состав научной аппаратуры обсерватории входят: рентгеновский и гамма телескоп IBIS, гамма спектрометр SPI, рентгеновский телескоп JEM-X и оптический монитор OMC.

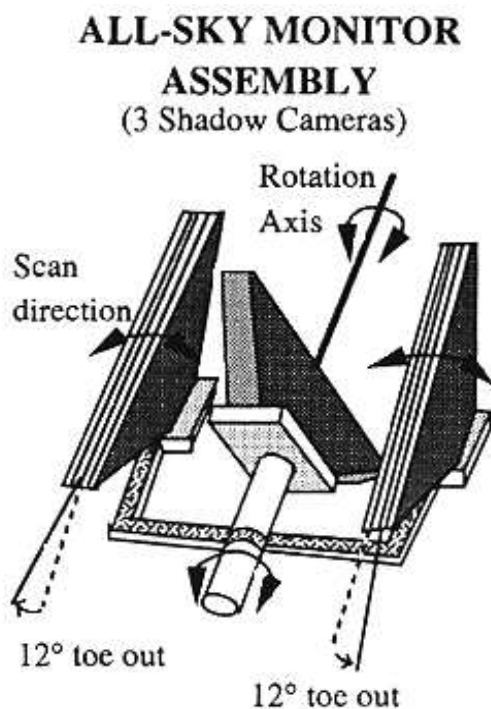


Рис. 1.4. Схема работы монитора всего неба ASM.

Табл. 1.4. Технические характеристики монитора всего неба ASM.

Рабочий диапазон энергии	2 – 10 кэВ
Энергетическое разрешение	$\leq 18\%$ на 6 кэВ
Временное разрешение	обзор 80 % неба каждые 90 мин.
Пространственное разрешение (FWHM)	$3' \times 15'$
Количество теневых камер	3
Поле зрения одной теневой камеры	$6^\circ \times 90^\circ$
Эффективная площадь прибора	$\sim 90 \text{ см}^2$
Чувствительность	30 мКраб

1.3.1 Телескоп IBIS

Обзор технических характеристик прибора

Телескоп гамма лучей IBIS ([116]) на борту орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ предназначен для наблюдения всех известных классов источников гамма излучения от самых компактных галактических объектов до внегалактических объектов. Прибор обладает широкими возможностями в области построения изображений участков неба в его поле зрения и идентификации источников, а также высокой спектральной чувствительностью как в узких линиях, так и в континууме. Следует отметить возможности прибора по локализации слабых источников с точностью до нескольких минут дуги, в диапазоне энергии от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ. В таблице 1.5 приведен обзор технических характеристик телескопа IBIS.

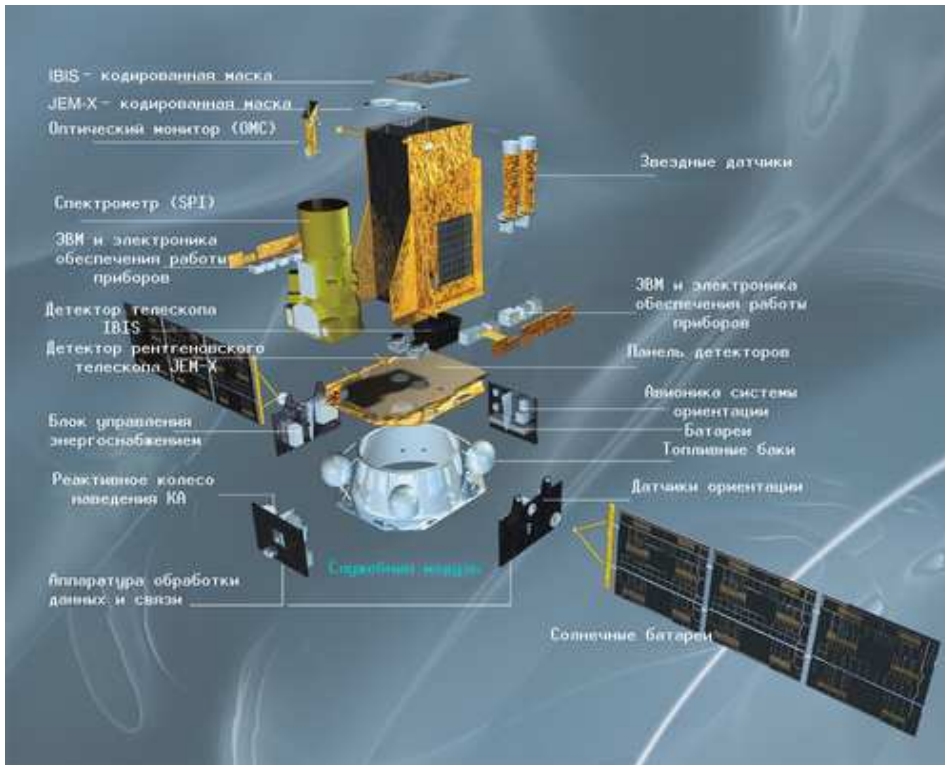


Рис. 1.5. Общая схема орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ.

Общее устройство

IBIS представляет собой детектор гамма лучей с возможностью построения изображений участков неба в поле зрения прибора. За кодирующей апертурой расположены два различных работающих одновременно детектора, что позволяет обеспечить широкий энергетический диапазон работы прибора - от 20 кэВ до 10 МэВ.

Кодирующая апертура оптимизирована для получения изображений с высоким угловым разрешением. Угловое разрешение телескопа определяется, в основном, пространственным разрешением массива детекторов, т.к. дифракцией в этом диапазоне длин волн можно пренебречь. Угловое разрешение телескопа с кодирующей апертурой $d\theta$ определяется соотношением между размером элемента маски кодирующей апертуры C (11.2 мм) и расстоянием между апертурой и массивом детекторов H (3133 мм).

$$d\theta = \arctan\left(\frac{C}{H}\right) = 12' \quad (1.1)$$

Детекторы IBIS состоят из большого числа маленьких полностью независимых чувствительных элементов.

Детекторный массив IBIS состоит из двух слоев, ISGRI и PICsIT: первый из них состоит из 128×128 твердотельных полупроводниковых кадмиево-теллуриевых (CdTe) детекторов, а второй из сцинтилляционных кристаллов цезий-йод (CsI). Такое устройство прибора позволяет обеспечить высокую энергетическую чувствительность как в линиях так и в континууме в широком рабочем энергетическом диапазоне IBIS. В том случае, когда событие задействует чувствительные элементы как ISGRI так и PICsIT, такое устройство прибора позволяет определять трехмерные траектории фотонов. Использование алгоритмов Комптона для восстановления данных позволяет с хорошей степенью

Табл. 1.5. Технические характеристики телескопа IBIS.

Рабочий диапазон энергии	15 кэВ – 10 МэВ
Энергетическое разрешение (FWHM)	7% на 100 кэВ 9% на 1 МэВ
Эффективная площадь	ISGRI: 960 см ² на 50 кэВ PICsIT: 870 см ² на 300 кэВ (для одиночных событий) PICsIT: 275 см ² на 1 МэВ (для кратных событий)
Поле зрения	9° × 9° (полное кодирование) 19° × 19° (50% кодирование)
Угловое разрешение (FWHM)	12'
Точность локализации точечного источника (90% радиус ошибок)	30'' на 100 кэВ 60'' на 1 МэВ
Чувствительность в континууме фотонов см ⁻² с ⁻¹ кэВ ⁻¹ (значимость детектирования 3σ, ΔE = E/2, период накопления сигнала 10 ⁶ с)	3.8 × 10 ⁻⁷ на 100 кэВ 1 – 2 × 10 ⁻⁷ на 1 МэВ
Чувствительность в линии фотонов см ⁻² с ⁻¹ (3σ, период накопления сигнала 10 ⁶ с)	1.3 × 10 ⁻⁵ на 100 кэВ 4 × 10 ⁻⁵ на 1 МэВ
Абсолютная временная точность (3σ)	ISGRI: 61 μс PICsIT: 4 мс

точности отфильтровать и отбросить те фотоны, которые не связаны с излучением исследуемых источников в поле зрения прибора, и, тем самым, улучшить соотношение полезного и шумового сигнала (S/N).

В жестком рентгеновском диапазоне апертура детектора ограничена пассивной защитой, закрывающей весь объем от детекторных пластин до кодирующей маски. Активная система защиты, собранная на основе ВГО сценциляторов, закрывает детекторы снизу и пространство между детекторами с четырех сторон.

1.3.2 Рентгеновский монитор JEM-X

Обзор научных характеристик

Европейский рентгеновский монитор (JEM-X) ([62]) на борту орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ используется для решения трех основных научных задач:

- Получение данных, дополняющих наблюдения основных приборов обсерватории (IBIS и SPI) в области более низких энергий. Если источник достаточно яркий для детектирования в гамма диапазоне, его яркости в рентгеновском диапазоне, обычно, бывает достаточной для его регистрации и идентификации с помощью JEM-X. Дополнительная информация об изменении потока излучения от источника или его спектральной переменности может оказаться важной для интерпретации данных, полученных в гамма диапазоне. К тому же, JEM-X обладает более высоким, в сравнении

с основными приборами обсерватории, угловым разрешением, что помогает при идентификации источников, находящихся в густонаселенных областях неба.

- В ходе периодического сканирования области галактической плоскости JEM-X способен быстро выдавать предупреждения о возникновении новых переменных источников или регистрации необычного поведения ранее известных источников. Излучение от некоторых из этих источников может быть зарегистрировано лишь с помощью JEM-X.
- Получение независимых научных результатов, касающихся регистрации новых источников, обладающих мягким спектром, попавших в поле зрения прибора в ходе плановых наблюдений.

Наблюдения при помощи приборов JEM-X, IBIS и SPI проводятся одновременно. Как и основные приборы обсерватории, JEM-X представляет собой телескоп с кодирующей апертурой. Обзор технических характеристик JEM-X приведен в таблице 1.6.

Табл. 1.6. Технические характеристики телескопа JEM-X

Энергетический диапазон	3-35 кэВ Первичный диапазон 35-75 кэВ Вторичный диапазон
Энергетическое разрешение	$\Delta E/E = 0.40 \times (E/1 \text{ кэВ})^{-1/2}$
Эффективная площадь	
Поле зрения (диаметр)	4.8° (100 % кодирование) 7.5° (50 % кодирование) ^a
Угловое разрешение (FWHM)	3'
Относительная ошибка локализации точечных источников (для источников со степенью значимости детектирования 10σ)	≤ 30''
Чувствительность в энергетическом континууме (изолированный источник на оси прибора)	1.3 × 10 ⁻⁵ фот. см ⁻² с ⁻¹ @ 6 кэВ 8.0 × 10 ⁻⁶ фот. см ⁻² с ⁻¹ @ 30 кэВ для наблюдения длительностью 10 ⁶ с и степенью значимости детектирования сигнала 3 σ
Чувствительность в узкой линии (изолированный источник на оси прибора)	1.7 × 10 ⁻⁵ фот. см ⁻² с ⁻¹ @ 6 кэВ 5.0 × 10 ⁻⁵ фот. см ⁻² с ⁻¹ @ 30 кэВ для наблюдения длительностью 10 ⁶ с и степенью значимости детектирования сигнала 3 σ
Временное разрешение	122 μс

^aЧувствительность для фотонов, приходящих в таком направлении падает в два раза по сравнению с таковой для фотонов, приходящих точно по оси прибора.

Общее устройство

JEM-X состоит из двух идентичных телескопов с кодирующей апертурой, оси которых параллельны осям других приборов обсерватории. Детекторная си-

стема построена на основе массива микрополосковых детекторов (MSGC), заполненных газом, находящимся под высоким давлением. Она расположена на расстоянии 3.4 м от кодирующей маски. На рис. 1.6 схематически изображено устройство одного из модулей JEM-X. Каждый из двух модулей включает в себя: детектор, блок вспомогательной электроники и кодирующую маску.

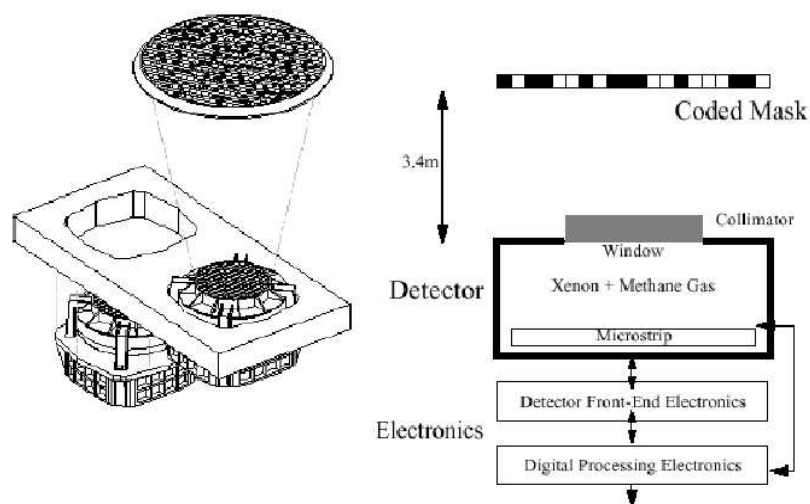


Рис. 1.6. Слева: Общее устройство JEM-X. Показаны два модуля и одна из кодирующих масок. Справа: Функциональная диаграмма одного из модулей

Каждый из детекторов JEM-X представляет собой заполненную газом блиноподобную микрополосковую камеру, площадь которой составляет 500 см^2 . Газ, заполняющий каждую из камер, представляет собой смесь ксенона (90%) и метана (10%), находящуюся под давлением в 1.5 бар. Входящие фотоны претерпевают фото-электронное поглощение в ксеноне, вызывая появление облака ионов. Это облако ускоряется и растет в ионной лавине, возникающей в сильном электрическом поле, создаваемом в области микрополосковых анодов, и вызывает появление на аноде электронного импульса. Положение возникновения лавины ионов по направлению, перпендикулярному микрополосковым анодам, определяется по центруиду зарегистрированного заряда. Другая координата события вычисляется по показаниям датчиков-электродов, смонтированных в нижнюю поверхность микрополосковой пластины (MSP).

Входное окно детектора сделано из тонкой (250 мкм) бериллиевой фольги, непроницаемой для газа, заполняющего детектор, однако, хорошо пропускающего мягкое рентгеновское излучение.

Коллиматор, состоящий из квадратных ячеек, закреплен сверху на входном окне детектора. Материалы, из которых изготовлен коллиматор (молибден, медь, алюминий), подобраны из соображений ослабления фоновой К-флуорисценции. Для построения матриц отклика приборов на орбите, в каждый из детекторов встроены четыре радиоактивных источника: 2 источника ^{55}Fe и 2 источника ^{109}Cd в JEM-X1, и 4 источника ^{109}Cd в JEM-X2. Каждый из источников облучает определенный участок микрополосковой пластины. ^{109}Cd излучает фотоны на энергиях 22 кэВ и 88 кэВ, ^{55}Fe излучает неразрешимый дуплет на энергии 6 кэВ. Также фотоны на энергиях 7.5 и 8.2 кэВ излучаются никелиевой рамой, на которую крепятся источники ^{109}Cd . Состояние газа в детекторе постоянно проверяется с помощью этих источников.

Часть II

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
СПЕКТРОВ ЯРКИХ
МАЛОМАССИВНЫХ
ДВОЙНЫХ**

Глава 2

СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ BDLE

2.1 Введение

Спектры излучения ярких $L_X \gtrsim 10^{37}$ эрг с^{-1} маломассивных рентгеновских двойных, содержащих аккрецирующую нейтронную звезду со слабым магнитным полем, в диапазоне $h\nu \gtrsim 2$ кэВ имеют достаточно простой вид и могут быть успешно аппроксимированы гладкой экспоненциально обрывающейся функцией, подобной закону тормозного излучения оптически тонкой плазмы с $kT_e \sim 5 - 10$ кэВ. Такой закон, однако, трудно увязать с ожидаемой картиной аккреции в системе (например, [135]; [46]; [95]), предполагающей присутствие в спектре, по крайней мере, двух компонент: одной, связанной с излучением оптически толстого холодного $kT \sim 1 - 2$ кэВ аккреционного диска, и второй, - с излучением тоже оптически непрозрачной, но более горячей $kT \sim 2 - 3$ кэВ радиационно-доминированной плазмы в пограничном слое, образующемся в месте соприкосновения диска с поверхностью нейтронной звезды. Энерговыведение в этом слое происходит из-за торможения аккрецирующего вещества от кеплеровской скорости $v_K = \sqrt{GM_*/R_*} = \omega_K R_*$, которую оно имеет в аккреционном диске, до значительно меньшей скорости вращения нейтронной звезды $v_s = \omega_s R_*$. Здесь и далее M_* и R_* — масса и радиус нейтронной звезды.

Хотя попытки учесть обе компоненты при описании спектров реальных источников предпринимались, например, Митсуда и др. ([79]) использовал в анализе суперпозицию спектра излучения многоцветного диска и чернотельного спектра, Вайт и др. ([13]) — суперпозицию комптонизованного (т.е. искаженного из-за рассеяния на высокотемпературных электронах) спектра диска и чернотельного спектра, Гильфанов и др. ([21]) и Ревнивцев, Гильфанов ([98]) — спектра многоцветного диска и комптонизованного спектра, их нельзя назвать успешными, т.к. в большинстве случаев надежно отделить одну компоненту излучения от другой не удавалось, а в результате аппроксимации определялся большой набор плохо связанных между собой, сильно закоррелированных параметров, не позволяющий сделать какие-либо физические выводы.

Митсуда и др. ([79]) отметили, что жесткая компонента излучения таких источников характеризуется намного большей степенью быстрой хаотической переменности, чем мягкая компонента, связанная с излучением диска. Они предложили использовать это свойство для разделения компонент и добились на этом пути заметных успехов. Новую жизнь в эту идею вдохнули Гильфанов и др. ([21]), воспользовавшись для разделения переменной и постоянной компонент спектра излучения ярких маломассивных рентгеновских двойных метода-

ми дискретного фурье-анализа. Однозначное отождествление выявленной таким образом переменной компоненты излучения с пограничным слоем на поверхности нейтронной звезды представляется нам не вполне корректным, поскольку при характерных для таких источников высоких светимостях внутренние зоны диска становятся радиационно-доминированными и подверженными сильной неустойчивости ([134]), а потому — подобно погранслою, но с несколько отличным спектром — должны давать заметный вклад в переменную составляющую полного рентгеновского излучения системы.

В настоящей работе предлагается простая, физически разумная, самосогласованная модель, которая может быть широко использована для аппроксимации и анализа наблюдаемых рентгеновских спектров излучения маломассивных двойных, аккрецирующих с достаточно высоким темпом $\dot{M} \gtrsim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$. В основе модели лежит известный факт равенства энерговыделения в диске и в погранслою (в ньютоновском пределе, либо более сложное их соотношение в общерелятивистском случае, например, [103]; [112]). Отсюда название модели: Boundary layer - Disc Luminosity Equality (BDLE). Модель зависит лишь от четырех параметров: темпа аккреции \dot{M} , радиуса нейтронной звезды R_* , который считается большим или равным радиусу ее предельной устойчивой орбиты $R_0 = 3R_g = 6GM_*/c^2$, средней температуры поверхности погранслоя kT_b и угла наклона аккреционного диска относительно наблюдателя θ . Вообще говоря, модель зависит также от массы нейтронной звезды M_* , но мы всюду полагаем ее фиксированной и равной $1.4M_{\odot}$.

2.2 Спектр погранслоя

Жесткая компонента спектра, связанная с излучением горячего пограничного слоя в общем случае с трудом поддается простому моделированию. Однако, при больших светимостях, характерных для обсуждаемых источников $L_X \gtrsim 10^{37}$ эрг с^{-1} , она может быть аппроксимирована виновским законом излучения ([27]; [114]). При таких светимостях плазма в “погранслою” становится оптически толстой и разреженной в силу давления излучения. Наблюдаемый спектр формируется при комптонизации низкочастотных тормозных фотонов, испущенных в глубине слоя плазмы, подобно тому, как формируется спектр рентгеновских всплесков с признаками фотосферного расширения (например, [59]; [61]; [140]; [3]; [139]; [47]), либо спектр микроволнового излучения в ранней Вселенной ([44]).

Наблюдаемый спектр формируется в разных участках погранслоя (или слоя растекания) и, вообще говоря, должен представлять собой интеграл от потока излучения по всей излучающей поверхности. Насколько оправдано аппроксимировать такой спектр однотемпературной функцией? Ответ заключается в том, что с одной стороны, и в чисто пограничном слое, и в слое растекания поток с единицы поверхности очень близок к эддингтоновскому, а спектральная температура излучения определяется лишь абсолютной величиной потока. С другой стороны, плазма растекается по поверхности нейтронной звезды, стремясь уравнять радиационное давление в разных областях и, соответственно, выравнивает поток излучения по всей излучающей поверхности. Поэтому температура поверхности погранслоя должна быть приблизительно одинаковой по всей области излучения.

Предположив, что поверхность “погранслоя” перпендикулярна аккреционному диску и излучает изотропно, что диск плоский и поэтому перехватывает половину всего испущенным погранслоем рентгеновского излучения и что пе-

рехваченное излучение отражается зеркально (под углом падения), спектр виновской компоненты излучения можно выразить через светимость “погранслоя” в виде (Гребенев и др., 2002)

$$F_b \simeq \frac{2}{\pi} \left(\frac{L_b \sin i}{\sigma_B T_b^4 d^2} \right) \left(\frac{1+\beta}{2} \right) \frac{h\nu^3}{c^2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_b}\right), \quad (2.1)$$

где T_b и L_b — температура внешних слоев “погранслоя” и его светимость, σ_B — постоянная Стефана-Больцмана, i — угол наклона диска и $\beta \simeq 0.4$ — альбедо его поверхности.

При понижении светимости до $L_X \lesssim 10^{37}$ эрг с⁻¹ плазма в “погранслое” становится более прозрачной. Параметр комптонизации $y = 4(kT_b/m_e c^2)\tau_T^2$ падает до единицы и спектр перестает быть виновским. Рассеяние фотонов на электронах (без изменения частоты) все еще играет определяющую роль в его формировании, приводя к так называемому “модифицированному спектру излучения экспоненциальной атмосферы” ([43]). Модель с таким спектром использовалась нами при аппроксимации спектров непрерывного излучения рентгеновского барстера KS 1731-260.

2.3 Модель с чернотельным диском

Как уже отмечалась, реалистичная модель спектра обсуждаемых источников должна содержать также вторую более мягкую компоненту, связанную со спектром излучения аккреционного диска. В начальном приближении эта компонента может быть аппроксимирована спектром излучения “многоцветного” чернотельного диска ([133]).

Прямое использование двухкомпонентной модели, состоящей из виновского спектра и спектра “многоцветного” диска, приводит к неразумно большому числу независимых параметров для описания относительно простых наблюдаемых спектров аккрецирующих нейтронных звезд. Для уменьшения числа параметров мы использовали условие равенства внутренних светимостей двух спектральных компонент

$$L_d = L_b = \frac{GM_* \dot{M}}{2R_*}, \quad (2.2)$$

верное в случае невращающейся нейтронной звезды со слабым магнитным полем в пределе ньютоновской гравитации¹. Здесь L_d — светимость диска, M_* и R_* — масса и радиус нейтронной звезды и \dot{M} — темп аккреции. Предполагается, что радиус звезды $R_* \gtrsim R_0$, где $R_0 = 6 GM_*/c^2$ — радиус ее предельной устойчивой орбиты, так что внутренний край аккреционного диска подходит почти к самой поверхности звезды. В простейшем случае приближительного равенства $R_* \simeq R_0$ светимость компонент $L_d = L_b \simeq 1/12 \dot{M} c^2$.

Спектр излучения чернотельной области диска можно выразить в виде ([133])

$$F_d \simeq \frac{2\pi \cos i}{d^2} \int_{R_*}^{\infty} B_\nu(T) R dR = \frac{3}{2} \left(\frac{L_d \cos i}{\sigma_B T_d^4 d^2} \right) \int_1^{\infty} B_\nu(T_s) r dr, \quad (2.3)$$

¹Учет вращения звезды (с частотой ν_*) лишь слегка искажает это равенство $L_b/L_d \simeq (1 - 2\pi\nu_*/\Omega_K)^2 \simeq 0.9$, где $\Omega_K = (GM_*/R_*^3)^{1/2}$ — кеплеровская угловая скорость вещества на внутреннем крае диска. В общей теории относительности L_b может заметно превышать L_d , в частности, в шварцшильдовской метрике $L_b/L_d \simeq 2.2$, если радиус звезды равен радиусу ее предельной устойчивой орбиты $R_* = R_0$, и $L_b/L_d \simeq 1 + 0.5R_0/R_*$, если $R_* \gg R_0$ ([103]; [112]).

где $B_\nu(T_s)$ — функция Планка и T_s — температура поверхности диска на расстоянии $R = r R_*$ от его центра

$$T_s = T_d r^{-3/4} \left(1 - r^{-1/2} + (1 - \beta)/6\right)^{1/4}, \quad T_d = \left(\frac{3}{4\pi\sigma_B} \frac{L_d}{R_*^2}\right)^{1/4}. \quad (2.4)$$

Отметим, что значения L_b и L_d соответствуют светимостям погранслоя и всего диска, до учета эффектов отражения и поглощения.

При известном расстоянии до системы d полный спектральный поток излучения в этой модели $F_t = F_d + F_b$ зависит от четырех параметров: L_d , T_d , T_b и i . Зная L_d и T_d и используя соотношение (2.4), можно определить радиус нейтронной звезды $R_* \simeq (3L_d/4\pi\sigma_B T_d^4)^{1/2}$, а используя соотношение (2.2) и полагая массу нейтронной звезды $M_* = 1.4M_\odot$, — темп аккреции \dot{M} .

2.4 Спектр центральной области диска

При характерных для ярких LMXB светимостях в центральной области диска радиационное давление превышает газовое, комптоновское рассеяние доминирует в непрозрачности и поэтому — спектр ее излучения сильно отличается от чернотельного.

В этой области полутолщина диска ([133])

$$z_0 = \frac{3}{8\pi} \frac{\dot{M}\sigma_T f}{cm_p} \simeq 1.0 \times 10^6 \dot{m} f \text{ см},$$

где σ_T — сечение томсоновского рассеяния и $f = 1 - r^{-1/2} + (1 - \beta)/6$, $r = R/R_*$, а $\dot{m} = \dot{M}/10^{-8}M_\odot \text{ год}^{-1}$. Оптическая полутолщина диска по томсоновскому рассеянию

$$\tau_0 = \frac{32\pi c^2 m_p}{9\alpha} \frac{1}{\sigma_T \dot{M}\omega f} \simeq 1.3 m^{-1/2} \dot{m}^{-1} r_*^{3/2} r^{3/2} (\alpha f)^{-1},$$

где α — параметр вязкости, $r_* = R_*/10$ км и $m = M/1.4 M_\odot$. Плотность плазмы внутри диска не зависит от z и равна

$$n_e = \frac{\tau_0}{\sigma_T z_0} = 2.0 \times 10^{18} m^{-1/2} \dot{m}^{-2} r_*^{3/2} r^{3/2} \alpha^{-1} f^{-2} \text{ см}^{-3}.$$

При аккреции на нейтронную звезду оптическая полутолщина диска составляет в наиболее внутренней области диска (области основного выделения энергии) $\tau_0 \sim 5 - 10$, соответственно параметр комптонизации $y = 4kT_e/m_e c^2 \tau_T^2 < 1$ и комптоновское рассеяние не успевает переместить низкочастотные фотоны в более жесткую область спектра, а лишь модифицирует чернотельный спектр за счет удлинения траекторий фотонов

$$F_\nu \simeq \pi B_\nu \frac{2\sqrt{4\alpha_{\text{ff}}}}{\sqrt{3(\alpha_{\text{ff}} + \alpha_T)} + \sqrt{4\alpha_{\text{ff}}}}.$$

В жесткой области спектра, где $\alpha_{\text{ff}} \ll \alpha_T$

$$F_\nu \simeq \pi B_\nu \left(\frac{16}{3} \frac{\alpha_{\text{ff}}}{\alpha_T}\right)^{1/2} \sim \frac{x^{3/2} \exp(-x)}{(1 - \exp(-x))^{1/2}}$$

([102]). Здесь $x = h\nu/kT_e$. Поток излучения с единицы поверхности диска

$$Q_-^{mb} \simeq 1.82 \times 10^{-4} T_e^{2.25} N_e^{0.5} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}.$$

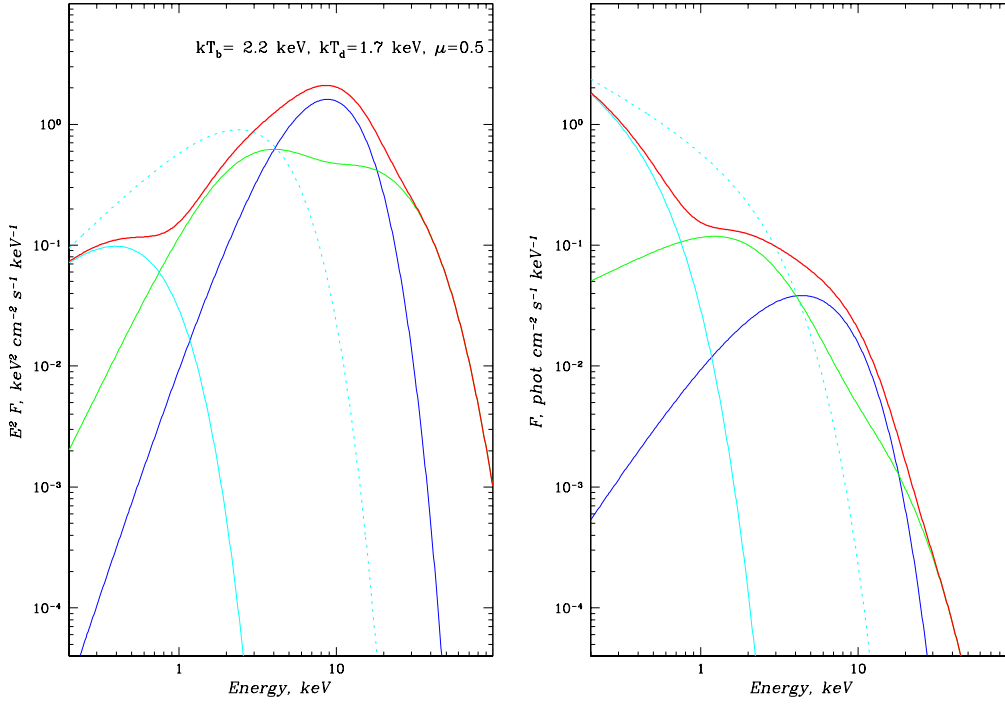


Рис. 2.1. Моделирование спектра яркого рентгеновского источника моделью BDLE.

Сравнение с законом энергосвечения в диске

$$Q_+ = \frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}_*}{R^3} \left(1 - \sqrt{\frac{R_*}{R}} + \frac{1-\beta}{6} \right)$$

позволяет определить температуру его поверхности и рассчитать интегральный спектр излучения внутренней зоны по формуле, аналогичной (2.3).

В более внешних областях диска $y \gtrsim 1$ и становится важной комптонизация, а спектр вновь принимает виновскую форму. Чтобы рассчитать формирующийся в этой зоне на данном радиусе спектр, включая его нормировку, мы искали решение уравнения Компанейца (1956) методом, предложенным Павловым и др. ([94]) (см. также [115]) для расчета спектров рентгеновских всплесков (т.е. формирующихся в экспоненциальной атмосфере). Нас интересовал случай однородного распределения плотности и температуры. Опуская промежуточные выкладки, приведем выражения для локального потока излучения

$$Q_-^w \simeq 6.07 \times 10^{23} (kT_e/\text{keV})^4 G(kT_e, N_e) \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1},$$

где

$$G = \frac{(N_e/5.8 \times 10^{22} \text{ см}^{-3})^{1/2} (kT_e/\text{кэВ})^{-7/4}}{(N_e/5.8 \times 10^{22} \text{ см}^{-3})^{1/2} (kT_e/\text{кэВ})^{-7/4} + \sqrt{3}} \ln^2 \frac{2.25}{x_*},$$

а значение x_* можно найти из выражения

$$x_* \simeq 2.65 \times 10^{-11} N_e^{1/2} (kT_e/\text{кэВ})^{9/4} \ln^{1/2} \frac{2.25}{x_*}$$

Для сравнения, поток чернотельного излучения в таком виде равен

$$Q_-^{bb} \simeq 1.03 \times 10^{24} (kT_e/\text{keV})^4 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1},$$

Сравнение Q_-^w с энерговыделением в диске Q_+ позволяет определить локальную температуру поверхности диска в этой зоне и рассчитать интегральный спектр по формулам, аналогичным (2.1) и (2.3). Вне радиационно-доминированной области диска спектр его излучения полагался чернотельным и рассчитывался по формуле, аналогичной (2.3), в которой интегрирование проводилось от границы зоны $R_1 \gg R_*$.

На рис. 2.1 приведен модельный спектр излучения маломассивной рентгеновской двойной для случая $kT_d = 1.7$ кэВ и $kT_b = 2.2$ кэВ и наклона $\cos i = 0.5$ (показан красной линией). Приведены также спектры отдельных компонент модели: погранслоя (синяя линия), радиационно-доминированной зоны диска (зеленая линия) и чернотельной области диска (циановая линия). Пунктиром показан спектр полностью чернотельного диска, соответствующего тем же параметрам (темпу аккреции и наклону). Любопытно, что в результирующем спектре излучение аккреционного диска доминирует не только на низких энергиях, но и на самых высоких, тогда как излучение погранслоя отвечает за центральную область спектра. Сумма компонент неплохо воспроизводит гладкие спектры излучения реальных источников в их спокойном состоянии.

Программа адаптирована для использования в стандартном пакете XSPEC/HEASOFT, что позволит широко применять ее для аппроксимации наблюдаемых спектров у ярких маломассивных систем.

2.5 Наблюдения

Табл. 2.1. Результаты аппроксимации спектров исследуемых источников моделью BDLE.

Название источника	N_H^a [57]	kT_b^b (кэВ)	kT_d^c (кэВ)	i^d (град.)	L^e 10^{37}	χ^2_f
4U1608 – 52	1.46 ± 0.02	2.372 ± 0.008	1.452 ± 0.001	23.7 ± 0.1	6.0	0.82
ScoX – 1	0.29 ± 0.03	2.473 ± 0.008	1.401 ± 0.007	20.6 ± 0.2	5.2	0.67
GX340 + 0	5.00 ± 0.90	2.446 ± 0.012	1.418 ± 0.003	11.7 ± 0.2	5.4	0.98
GX349 + 2	0.88 ± 0.02	1.860 ± 0.015	1.495 ± 0.004	26.8 ± 0.3	6.6	1.40
GX5 – 1	2.54 ± 0.19	2.449 ± 0.001	1.303 ± 0.002	35.0 ± 0.2	3.8	0.41
GX17 + 2	1.73 ± 0.04	2.910 ± 0.003	1.416 ± 0.002	34.6 ± 0.3	5.4	0.83
CygX – 2	0.28 ± 0.04	2.727 ± 0.013	1.438 ± 0.007	24.8 ± 0.6	5.6	0.77

a - фотопоглощение в направлении на систему ($\times 10^{22}$ ат. см $^{-2}$)

b - температура внешних слоев пограничного слоя

c - температура, характеризующая внутреннюю область аккреционного диска

d - наклонение аккреционного диска

e - болометрическая светимость системы (эрг с $^{-1}$)

f - значение χ^2 приведенного на число степеней свободы $N=35$

Для проверки состоятельности модели BDLE спектра постоянного рентгеновского излучения двойной системы с дисковой аккрецией вещества на нейтронную звезду со слабым магнитным полем были использованы данные на-

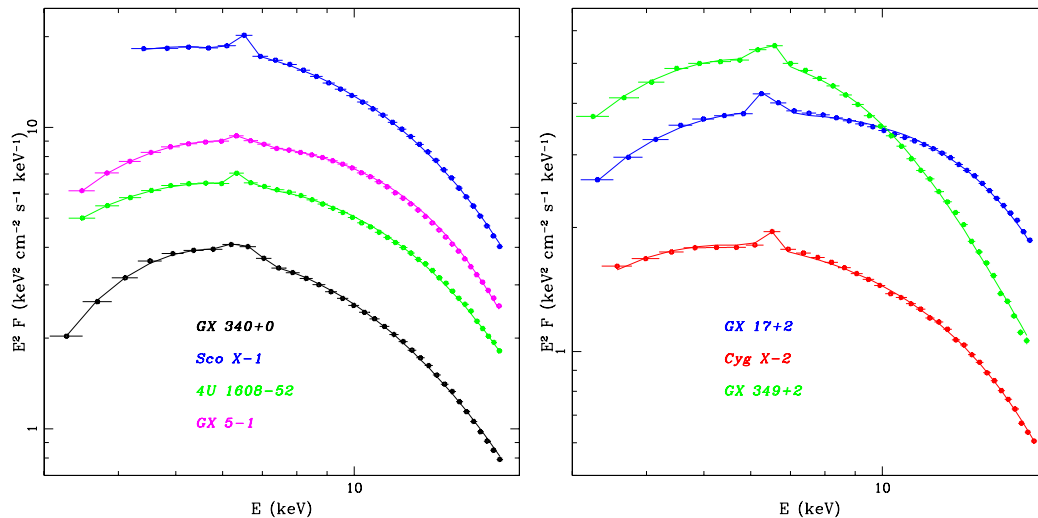


Рис. 2.2. Аппроксимация спектров излучения ярких рентгеновских источников моделью BDLE.

блюдений рентгеновским детектором PCA орбитальной обсерватории RXTE семи рентгеновских источников: 4U1608-52, CygX-2 (2142+380), GX17+2 (1813-140), GX340+0 (1642-455), GX349+2 (1702-363), GX5-1 (1758-250) и ScoX-1 (1617-155). Все они относятся к классу двойных маломассивных рентгеновских систем (LMXB). Первые три из них известны как рентгеновские барстеры. 4U1608-52 - это транзитный атолл источник, а остальные 6 относятся к классу Z источников ([121]). В табл. 2.1 приведены значения параметров спектральной модели BDLE, полученные при аппроксимации спектров исследуемых источников. Соответствующие спектры приведены на рис. 2.2. Приведенные значения χ^2 указывают на то, что модель хорошо аппроксимирует данные. В табл. 2.1 также приведены значения уровня фотопоглощения в направлении на каждый из этих источников, полученные различными авторами на основе данных различных рентгеновских обсерваторий. В процессе аппроксимации исследуемых в данной работе спектров значения фотопоглощения в направлении на каждый из источников были зафиксированы нами на уровне приведенном в этой таблице.

2.6 Обсуждение

В данной работе представлена модель спектра излучения двойной системы с дисковой аккрецией вещества на нейтронную звезду со слабым магнитным полем - BDLE. Среди моделей, которые применяются для описания спектров подобных систем, явным преимуществом BDLE является ее физичность: различные компоненты излучения в системе связаны в рамках физически обоснованной модели. Несомненным минусом модели является ее упрощенный характер. Это наиболее простая модель подобной излучающей системы, которая предполагает равенство светимостей аккреционного диска и пограничного слоя. Такое предположение верно лишь в ньютоновском приближении и применимо к реальным системам лишь с некоторой точностью. Учитывая условия, существующие вблизи такого гравитирующего объекта, как нейтронная звезда, несомненно необходимо учитывать эффекты теории относительности, такие как красное смещение, увеличение видимого потока излучения за счет искривления лучей (blending) и т.д. Эти эффекты мы планируем учесть при создании следующей

версии модели BDLE. Следующим шагом в улучшении модели будет учет вращения нейтронной звезды, как в рассмотрении эффектов теории относительности (использование метрики Керра вместо метрики Шварцшильда), так и в гидродинамическом рассмотрении процесса торможения аккрецирующего вещества в пограничном слое. Большинство подобных эффектов вносит вклад в наблюдаемую светимость в виде поправок на уровне $\lesssim 10\%$, поэтому их учет требует все более и более качественных наблюдательных данных.

Часть III

РЕНТГЕНОВСКИЕ БАРСТЕРЫ

Глава 3

MX 0836-42

3.1 Введение

Транзиентный рентгеновский источник MX 0836-42 был открыт в 1971 г. спутником OSO-7 ([75]). Его положение почти совпало с вероятным положением точечного источника, зарегистрированного в декабре 1970 г. и феврале 1971 г. обсерваторией Uhuru ([49]). Интенсивность излучения последнего оказалась слишком низкой, так что он не вошел в официальный каталог источников Uhuru ([76]; [51]). В 1990 г. рентгеновским монитором всего неба WATCH на борту орбитальной обсерватории ГРАНАТ вблизи MX 0836-42 был зарегистрирован яркий транзиентный источник ([106]). Поток излучения от него в диапазоне 5-15 кэВ во время этих наблюдений достиг уровня, сравнимого с потоком излучения от Крабовидной туманности. Точность локализации источника составила лишь 1° . Анализ данных обсерватории ROSAT показал, что в этой области имеются два точечных источника, расположенные на расстоянии 24 мин. дуги друг от друга ([120]). Наличие двух источников было позднее подтверждено по данным телескопа АРТ-П обсерватории ГРАНАТ [106]. От северного из этих источников были обнаружены рентгеновские всплески I рода, что позволяет отнести MX 0836-42 к классу маломассивных двойных рентгеновских систем, содержащих нейтронную звезду со слабым магнитным полем, а от южного GRS 0834-430 - рентгеновские пульсации с периодом ~ 12 с, что характеризует его как рентгеновский пульсар ([24]). Исследования излучения источника MX 0836-42 показали, что его спектр можно описать моделью степенной зависимости потока фотонов от энергии со значением фотонного индекса ~ 1.5 ([2]). В данной работе, основываясь на данных, полученных в 2003-2004 гг. приборами орбитальных обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE, впервые построен и исследован широкополосный спектр излучения источника в спокойном состоянии в диапазоне энергий 3-120 кэВ и спектр его излучения во время рентгеновских всплесков. Обсуждаются свойства рентгеновских всплесков, зарегистрированных от источника.

3.2 Наблюдения и анализ данных

Анализ данных монитора JEM-X и телескопа IBIS проводился при помощи пакета программ обработки данных OSA 4.1, распространяемого Центром научных данных обсерватории ИНТЕГРАЛ (ISDC). Для построения кривых блеска и спектров излучения источника MX 0836-42 были использованы значения потоков излучения, полученные в результате восстановления изображения участка неба в поле зрения прибора и идентификации наблюдаемых источников. Вос-

Табл. 3.1. Наблюдения источника MX 0836-42 телескопами JEM-X и IBIS орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ

Начало наблюдения, UTC	Завершение наблюдения, UTC	Экспозиция IBIS, с	Экспозиция JEM-X, с	Поток ^а IBIS/ISGRI, мКраб
2003				
28.03	<i>Mar 28</i>	6571	—	53.94 ± 2.16
05.04	<i>Apr 5</i>	6600	—	59.95 ± 1.77
20.04	<i>Apr 20</i>	6600	—	27.85 ± 1.76
29.04	<i>Apr 29</i>	6713	4513	6.45 ± 1.68
14.05	<i>May 14</i>	8802	4399	10.60 ^б
29.05	<i>May 29</i>	6600	2200	16.30 ^б
05.06	<i>Jun 5</i>	8917	2201	9.84 ^б
12.06	<i>Jun 15</i>	202879	93575	1.95 ^б
16.06	<i>Jun 18</i>	142958	94976	3.13 ± 0.39
19.06	<i>Jun 21</i>	193103	88973	2.24 ^б
26.06	<i>Jun 27</i>	106271	85499	2.66 ^б
28.06	<i>Jun 30</i>	192907	122629	2.05 ^б
01.07	<i>Jul 3</i>	175646	145142	1.95 ^б
04.07	<i>Jul 6</i>	113051	98261	2.60 ^б
27.11	<i>Nov 29</i>	206101	54131	80.56 ± 0.38
30.11	<i>Dec 2</i>	206942	113931	81.12 ± 0.32
03.12	<i>Dec 5</i>	186043	97123	77.59 ± 0.35
06.12	<i>Dec 8</i>	207723	88880	74.39 ± 0.33
09.12	<i>Dec 11</i>	193980	98270	69.01 ± 0.32
24.12	<i>Dec 24</i>	6714	4514	69.37 ± 2.22
2004				
02.01	<i>Jan 2</i>	4463	2263	57.17 ± 2.39
17.01	<i>Jan 17</i>	5713	3513	46.81 ± 2.13
26.01	<i>Jan 26</i>	6602	2201	50.69 ± 1.88
07.02	<i>Feb 7</i>	6634	—	58.36 ± 2.21
07.03	<i>Mar 7</i>	4388	—	61.62 ± 2.55
26.03	<i>Mar 26</i>	6626	—	53.14 ± 1.88
24.04	<i>Apr 24</i>	6712	4512	45.69 ± 1.79
16.05	<i>May 16</i>	2314	—	46.95 ± 3.83
06.06	<i>Jun 6</i>	4400	—	19.78 ± 2.34
11.06	<i>Jun 11</i>	6602	2201	11.51 ± 1.82
30.06	<i>Jun 30</i>	8123	2200	4.62 ^б
11.07	<i>Jul 11</i>	6602	2200	5.17 ^б
23.07	<i>Jul 23</i>	4401	—	8.49 ^б
21.08	<i>Aug 21</i>	5470	—	7.95 ^б
28.08	<i>Aug 28</i>	2221	—	10.83 ^б
13.09	<i>Sep 13</i>	8064	2171	5.14 ^б

Примечание: Здесь экспозиция - суммарная длительность всех наведений, в течение которых удалось разрешить источник

^а- поток в диапазоне энергии 20-120 кэВ

^б- 3σ верхний предел на поток энергии излучения от источника

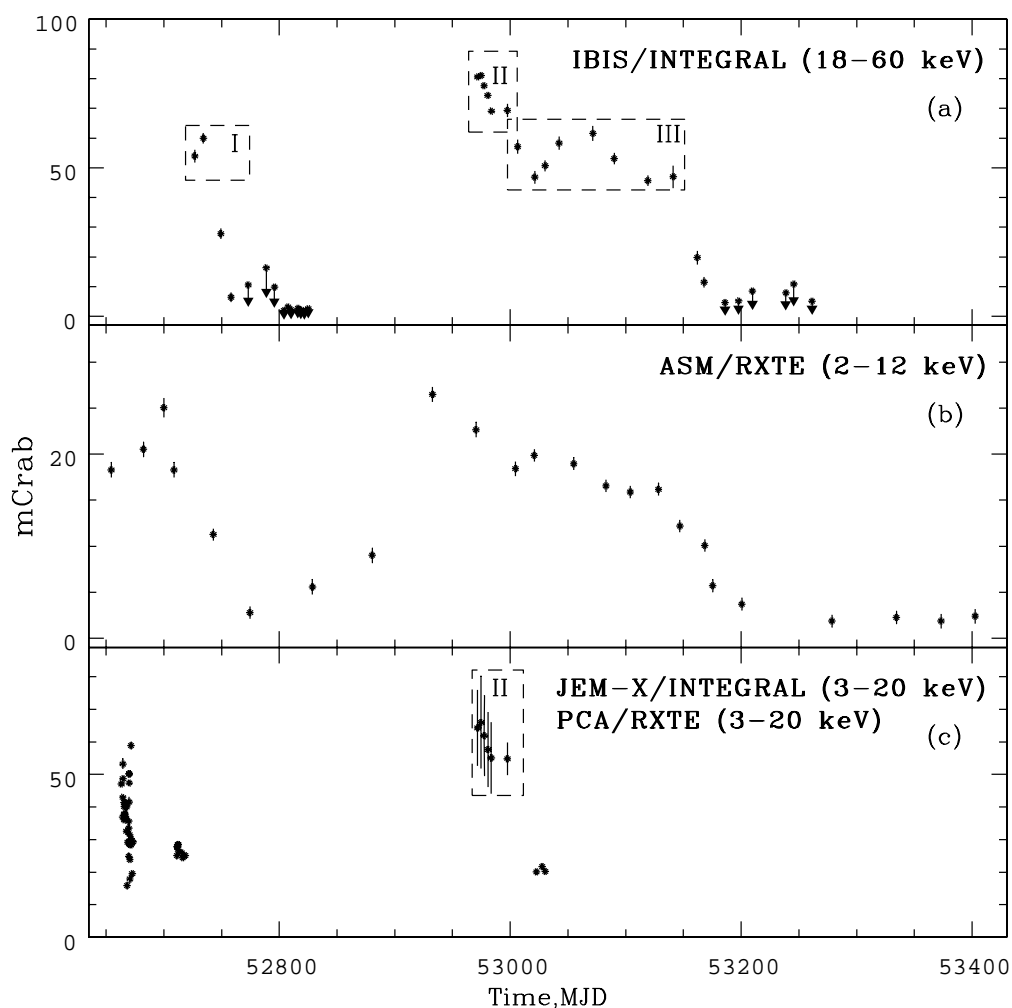


Рис. 3.1. Кривые блеска источника MX 0836-42: (а) по данным детектора IBIS/ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ; (б) по данным монитора всего неба ASM/RXTE; (в) по данным детектора PCA/RXTE и телескопа JEM-X/ИНТЕГРАЛ (область II). Верхние пределы на поток излучения приведены на уровне 3σ .

становление фотонного спектра источника происходило с использованием 50-ти канальной матрицы отклика прибора, построенной по данным наблюдений источника в Крабовидной туманности и позволяющей восстанавливать форму спектра источника с точностью до 4 %, а нормировку - с точностью до 7 %.

Данные наблюдений исследуемого источника обсерваторией RXTE были предоставлены архивом NASA (HEASARC). Для обработки данных детекторов PCA/RXTE и HEXTE/RXTE и анализа спектров источника мы использовали пакет программ LHEASOFT 5.3.1 и программу XSPEC 11.3.1.

Рентгеновский транзиент MX 0836-42 несколько раз попадал в поле зрения гамма-телескопа IBIS/ISGRI в период с марта 2003 г. по май 2004 г. (табл. 3.2), как в рамках Основной, так и в рамках Общей программы наблюдений ([19]). При этом суммарная экспозиция наблюдений этого источника составила более 2.5 Мс. Использовались данные, полученные при сканировании галактической плоскости, а также при глубоком наблюдении области вблизи источника Vela X-1.

Табл. 3.2. Наблюдения источника MX 0836-42 приборами PCA и HEXTE орбитальной обсерватории RXTE

Дата, UTC	Экспозиция ^a РСА	Экспозиция ^a HEXTE	$\dot{M}^b \times 10^{-9}$, $M_{\odot}/\text{год}$	τ_1^c , с	τ_2^d , с
2003					
23.01	11296	5539	2.08 ± 0.03	3230	9680
24.01	5088	2268	2.09 ± 0.04	3180	9810
25.01	10592	5689	1.82 ± 0.03	3640	10930
26.01	14144	7506	1.75 ± 0.02	3810	11420
27.01	9504	5189	1.65 ± 0.03	4020	12060
28 ₁ .01	1872	721	2.08 ± 0.12	3200	9580
28 ₂ .01	864	294	1.18 ± 0.08	5620	16870
29 ₁ .01	1744	602	0.88 ± 0.12	7560	22680
29 ₂ .01	944	393	1.31 ± 0.05	5070	15200
30 ₁ .01	896	367	1.74 ± 0.05	3820	11450
30 ₂ .01	736	327	1.23 ± 0.05	5410	16220
30 ₃ .01	720	318	1.74 ± 0.06	3820	11460
31 ₁ .01	5520	2253	1.28 ± 0.05	5170	15510
31 ₂ .01	4032	2128	1.05 ± 0.04	6340	19020
01.02	8992	5085	1.48 ± 0.07	4710	13460
02.02	2944	1413	1.04 ± 0.06	6400	19200
03.02	2464	1007	1.39 ± 0.06	4780	14340
13.03	4672	2211	1.18 ± 0.04	5620	16870
14.03	10496	5029	1.22 ± 0.02	5300	15900
17.03	3360	1627	1.23 ± 0.05	5400	16200
18.03	3392	1583	1.12 ± 0.05	5930	17190
20.03	3472	1652	1.19 ± 0.05	5590	16750
2004					
18.01	1120	464	0.90 ± 0.47	4990	14960
23.01	1216	520	0.99 ± 0.03	5040	15110
26.01	1552	723	0.78 ± 0.02	6390	19160

Примечание: Нижний индекс в дате указывает на порядковый номер наблюдения в течение соответствующего дня

^a - суммарная экспозиция в секундах

^b - темп аккреции

^c - период рекуррентности всплесков, рассчитанный в случае покрытия аккрецируемым веществом 1/3 поверхности нейтронной звезды

^d - период рекуррентности всплесков, рассчитанный в случае полного покрытия поверхности нейтронной звезды аккрецируемым веществом

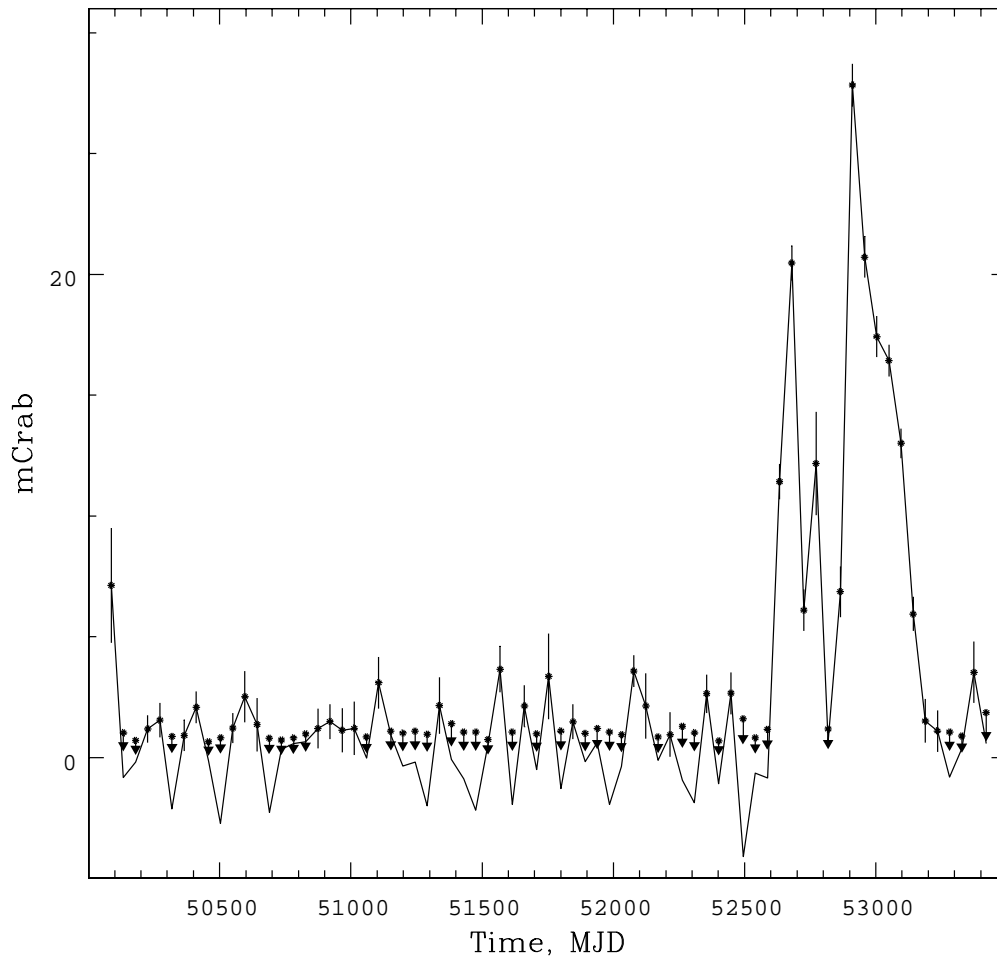


Рис. 3.2. Кривая блеска источника MX 0836-42 в диапазоне энергий 2-12 кэВ, построенная по данным монитора всего неба ASM обсерватории RXTE.

Последние наблюдения проводились в периоды с 12 июня по 6 июля и с 27 ноября по 11 декабря 2003 г. Суммарные экспозиции наблюдений источника MX 0836-42 монитором JEM-X и телескопом IBIS составили ~ 0.73 Мс и ~ 1.13 Мс для первого и ~ 0.45 Мс и ~ 1.0 Мс для второго периода, соответственно. В работе были использованы лишь те наведения, в ходе которых исследуемый источник находился в области полного кодирования прибора. Это было сделано для того, чтобы максимально избежать неточностей в процессе восстановления потока энергии излучения от исследуемого источника. Разница в экспозиции для двух приборов связана с тем, что область полного кодирования монитора JEM-X меньше, чем область полного кодирования телескопа IBIS (см. раздел 1.3).

На рис. 3.1 представлены кривые блеска источника за период 52650-53400 MJD, построенные по данным телескопов IBIS/ISGRI (20-60 кэВ), JEM-X (3-20 кэВ) обсерватории ИНТЕГРАЛ и приборов ASM (2-12 кэВ) и PCA (3-20 кэВ) обсерватории RXTE. На рис. 3.2 представлена кривая блеска источника, построенная по всем доступным данным монитора всего неба ASM/RXTE. Приведенные значения потоков представляют собой отношения потоков, зарегистрированных от источника MX 0836-42, к потоку, зарегистрированному от

Крабовидной туманности в соответствующем диапазоне энергий.

На рис. 3.1 а присутствуют 2 группы измерений, состоящие из 9 (52773-52825 MJD) и 6 (53186-53261 MJD) наблюдений соответственно, в течение которых поток излучения, зарегистрированный от исследуемого источника, находился ниже порога чувствительности детектора ISGRI. Верхние пределы на поток излучения от MX 0836-42 для каждого из этих наведений приведены на уровне 3σ .

На рис. 3.1 б и 3.2 приведена кривая блеска источника MX 0836-42 в диапазоне энергий 2-12 кэВ, построенная по данным монитора всего неба ASM на борту обсерватории RXTE. Каждая точка на рисунке соответствует усредненному за период длительностью 36 кс потоку излучения от источника.

В табл. 3.2 представлена информация об использованных нами наведениях орбитальной обсерватории RXTE в 2003-2004 гг., в ходе которых в поле зрения ее приборов PCA и HEXTE попадал источник MX 0836-42. На рис. 3.3б приведены значения потока излучения от этого источника в диапазоне 3-120 кэВ, полученные в результате обработки данных наблюдений, проведенных приборами обсерватории RXTE (PCA+HEXTE). В данной работе мы использовали лишь сеансы стабильного наведения приборов на источник.

3.3 Спектр постоянного излучения

По данным обсерватории ИНТЕГРАЛ нам удалось построить спектр излучения исследуемого источника в диапазоне 3-120 кэВ (рис. 3.4, штрихи). Для этого были использованы данные наблюдений, полученные монитором рентгеновских лучей JEM-X (3-20 кэВ; рис. 3.1в, область II) и телескопом IBIS/ISGRI (20-120 кэВ; рис. 3.1а, область II) в течение 137-141 орбитальных циклов (табл. 3.2, 27 ноября - 9 декабря 2003 г.), когда источник находился в высоком состоянии и поток излучения от него в этих диапазонах энергий составлял $\sim 50 - 70$ мкРаб. В процессе аппроксимации спектр, построенный по данным телескопа JEM-X был перенормирован для соответствия нормировке спектра, построенного по данным телескопа IBIS/ISGRI, причем значение нормировочного коэффициента составило 1.15. Особенности в спектре в областях 6-8 кэВ, 12-15 кэВ и 20-25 кэВ на данный момент мы относим к систематическим ошибкам измерений.

Спектральный анализ излучения MX 0836-42 по данным, усредненным по каждому из вышеупомянутых орбитальных циклов обсерватории ИНТЕГРАЛ, показал, что значительных изменений форма спектра излучения источника за это время не претерпела. Поэтому для построения и исследования широкополосного спектра были использованы усредненные данные этих шести орбитальных циклов (рис. 3.1а, область II). Аппроксимация полученного спектра источника степенной моделью с экспоненциальным завалом на высоких энергиях дает значение фотонного индекса $\alpha = 1.46 \pm 0.08$ и энергии степенного завала $E_{cut} = 51.1 \pm 1.4$ кэВ, поток излучения от источника в диапазоне энергий 3-120 кэВ составил $F = (2.29 \pm 0.10) \times 10^{-9}$ эрг см⁻² с.

По данным телескопа IBIS/ISGRI, усредненным по 55-58 (рис. 3.1а, область I) и 149-194 (рис. 3.1а, область III) орбитальным циклам, были построены спектры источника лишь в диапазоне энергий 20-60 кэВ, так как суммарная экспозиция наблюдений в этих областях составила лишь ~ 20 и ~ 50 кс, что значительно меньше экспозиции в области II (~ 1 Мс). Статистическая значимость регистрации источника в диапазоне энергий выше 60 кэВ в ходе этих наблюдений оказалась недостаточной для построения качественного спектра излучения. Аппроксимация этих спектров степенной моделью с экспоненциальным зава-

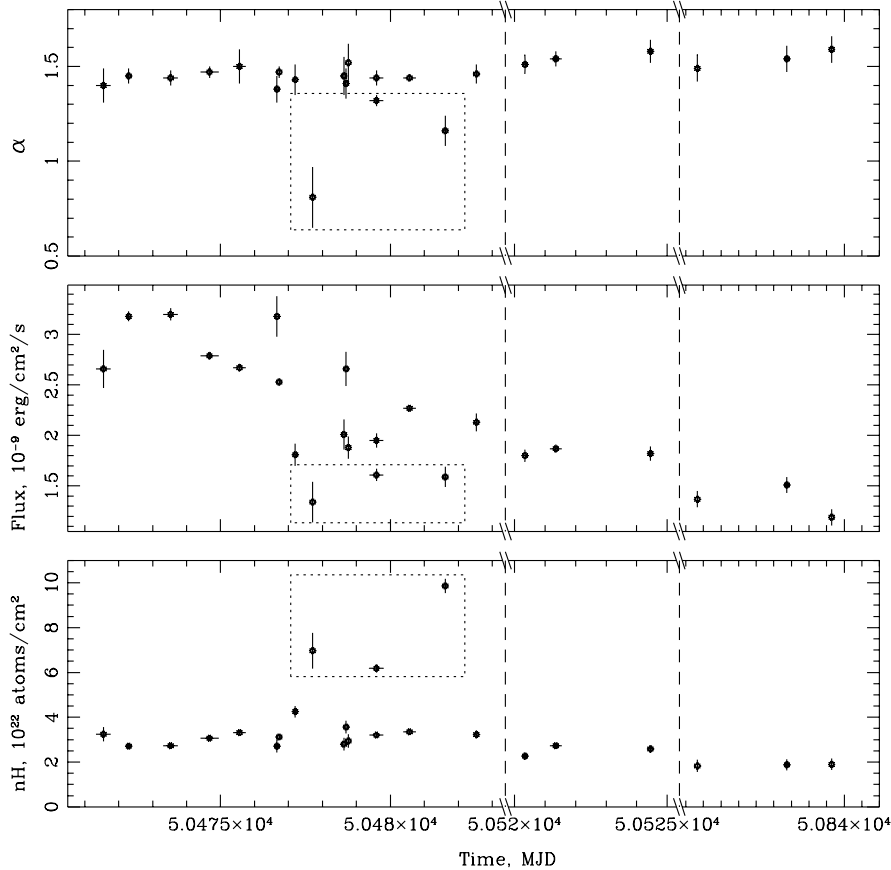


Рис. 3.3. Зависимости от времени фотонного индекса, потока излучения в диапазоне 3-120 кэВ и межзвездного поглощения, полученные по данным наблюдений источника MX0836-42 приборами обсерватории RXTE (РСА+HEXTE) в 2003-2004 гг.

лом на высоких энергиях дает значения фотонного индекса $\alpha = 1.29 \pm 0.17$ для первого и $\alpha = 1.31 \pm 0.14$ для второго из них (значение E_{cut} в процессе этих аппроксимаций было зафиксировано на величине 50 кэВ).

На рис. 3.4 (сплошные линии) представлены примеры спектров излучения MX 0836-42, полученных по данным детекторов РСА (3-20 кэВ) и HEXTE (20-60 кэВ), усредненным по нескольким последовательным наведениям (суммарная экспозиция $\sim 2.9 - 10.5$ кс). Все полученные спектры были аппроксимированы в диапазоне энергий 3-60 кэВ степенным законом с экспоненциальным завалом в области высоких энергий. К этой модели были также добавлены эффект отражения излучения от аккреционного диска ([70]), фотопоглощение, в предположении солнечного обилия тяжелых элементов в межзвездной среде, и флуоресцентная линия железа $E_{Fe} = 6.4$ кэВ, что позволило значительно улучшить качество аппроксимации (значение χ^2 , нормированное на степень свободы, уменьшилось от $\sim (8 - 10)$ до $\sim (1 - 2)$). В силу неопределенности в нормировке спектров, построенных по данным детектора HEXTE, все они были приведены к уровню спектров, построенных по данным детектора РСА, полученных в ходе того же наблюдения, путем домножения на константу.

В табл. 3.3 представлены результаты аппроксимации и значения модельного потока излучения, скорректированные с учетом “мертвого” времени детек-

Табл. 3.3. Результаты аппроксимации спектров излучения источника MX 0836-42, построенных по данным орбитальной обсерватории RXTE (приборы PCA+HEXTE), степенной моделью с экспоненциальным завалом в области высоких энергий, и с учетом межзвездного поглощения и эмиссионной линии железа $E_{Fe} = 6.4$ кэВ и отражения излучения от аккреционного диска

Дата, UTC	α^a	E_{cut}^b , кэВ	Поток ^c , эрг/см ² /с	N_H^d , 10 ²² ат./см ²	K^e	$\chi^2(N)^f$
2003						
23.01	1.45 ± 0.04	53.9 ± 4.9	3.18 ± 0.05	2.71 ± 0.08	0.75	1.27(60)
24.01	1.44 ± 0.04	45.9 ± 4.6	3.20 ± 0.06	2.73 ± 0.09	1.00	0.87(66)
25.01	1.47 ± 0.03	53.3 ± 3.8	2.79 ± 0.04	3.07 ± 0.06	0.74	1.16(63)
26.01	1.50 ± 0.09	67.4 ± 3.8	2.67 ± 0.04	3.31 ± 0.07	0.79	2.08(50)
27.01	1.47 ± 0.03	57.9 ± 3.1	2.53 ± 0.04	3.12 ± 0.08	0.76	1.09(59)
28 ₁ .01	1.38 ± 0.07	50.6 ± 10.1	3.18 ± 0.20	2.71 ± 0.28	1.03	0.87(51)
28 ₂ .01	1.43 ± 0.08	38.2 ± 7.7	1.81 ± 0.11	4.25 ± 0.26	0.57	0.97(52)
29 ₁ .01	0.81 ± 0.16	29.4 ± 4.6	1.34 ± 0.20	6.97 ± 0.79	0.77	1.99(52)
29 ₂ .01	1.45 ± 0.10	43.7 ± 14.7	2.01 ± 0.15	2.80 ± 0.29	0.93	0.88(44)
30 ₁ .01	1.41 ± 0.08	45.8 ± 8.2	2.66 ± 0.17	3.56 ± 0.28	0.97	0.91(52)
30 ₂ .01	1.52 ± 0.10	50.0(<i>fixed</i>)	1.88 ± 0.11	2.94 ± 0.30	1.12	1.05(53)
30 ₃ .01	1.40 ± 0.09	56.1 ± 14.4	2.66 ± 0.19	3.24 ± 0.32	0.98	0.93(49)
31 ₁ .01	1.44 ± 0.04	50.3 ± 5.3	1.95 ± 0.07	3.20 ± 0.11	0.75	1.25(52)
31 ₂ .01	1.32 ± 0.03	43.5 ± 4.1	1.61 ± 0.06	6.18 ± 0.19	0.70	1.88(52)
01.02	1.44 ± 0.02	61.0 ± 3.8	2.27 ± 0.03	3.35 ± 0.07	0.54	1.27(66)
02.02	1.16 ± 0.08	35.3 ± 3.4	1.59 ± 0.10	9.86 ± 0.32	0.87	1.29(50)
03.02	1.46 ± 0.05	53.4 ± 7.9	2.13 ± 0.09	3.23 ± 0.19	0.90	1.03(52)
13.03	1.51 ± 0.05	65.8 ± 8.3	1.80 ± 0.06	2.27 ± 0.16	0.71	1.27(55)
14.03	1.54 ± 0.04	64.9 ± 5.5	1.87 ± 0.04	2.73 ± 0.09	0.76	1.08(50)
17.03	1.54 ± 0.06	76.2 ± 12.6	1.88 ± 0.08	2.33 ± 0.20	0.86	0.88(55)
18.03	1.51 ± 0.06	67.5 ± 12.4	1.71 ± 0.08	2.46 ± 0.21	0.81	0.98(52)
20.03	1.58 ± 0.06	71.4 ± 14.1	1.82 ± 0.07	2.58 ± 0.17	0.92	0.87(48)
2004						
18.01	1.49 ± 0.07	50.0(<i>fixed</i>)	1.37 ± 0.08	1.83 ± 0.28	1.01	0.96(54)
23.01	1.54 ± 0.07	50.0(<i>fixed</i>)	1.51 ± 0.08	1.88 ± 0.25	0.98	0.93(54)
26.01	1.59 ± 0.07	53.5 ± 15.2	1.19 ± 0.08	1.90 ± 0.26	0.65	1.27(53)

^a - фотонный индекс

^b - значение энергии экспоненциального завала

^c - поток излучения (3-120 кэВ) источника в спокойном состоянии ($\times 10^{-9}$ эрг см⁻² с⁻¹)

^d - полученное при аппроксимации спектра значение поверхностной плотности водорода

^e - коэффициент масштабирования спектра, построенного по данным спектрометра HEXTE

^f - величина χ^2 наилучшей аппроксимации спектра, нормированная на число степеней свободы N

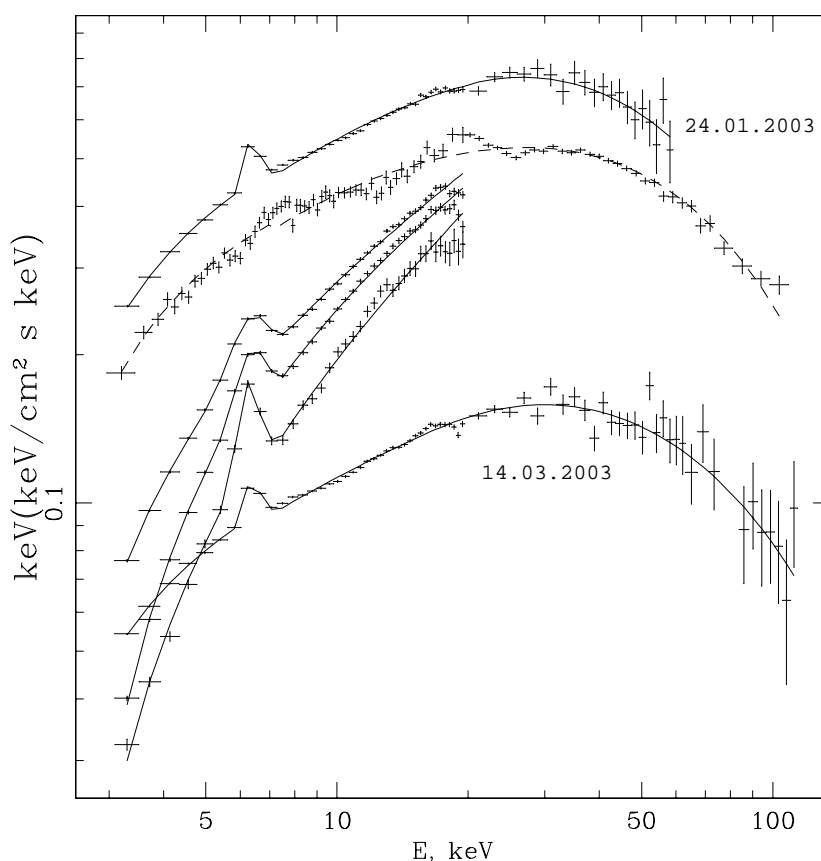


Рис. 3.4. Спектры постоянного излучения источника MX 0836-42, построенные по данным телескопов JEM-X и IBIS/ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ (штрихованная линия) и детекторов PCA (3-20 кэВ) и HEXTE (20-60 кэВ) обсерватории RXTE (сплошные линии). Для удобства восприятия рисунка значения данных и модели в спектре за 14.03.2003 домножены на коэффициент 1/3.

тора, а также значения вышеупомянутых нормировочных констант. На рис. 3.3 представлены полученные при аппроксимации зависимости фотонного индекса, модельного потока излучения источника в спокойном состоянии и величины поверхностной плотности водорода (N_H) от времени. Пунктирной линией на этом рисунке выделены значения параметров, полученные по данным 29₁ и 31₂ января (нижний индекс указывает на порядковый номер данного наведения среди наведений на источник в этот день), и 2 февраля 2003 г. Относительно высокие значения величины N_H и низкие значения фотонного индекса и потока излучения, полученные в процессе аппроксимации этих данных, позволяют выделить их в отдельную группу наблюдений с сильным поглощением. Полученные среднее значение фотонного индекса степенного спектра излучения источника $\sim (1.4 - 1.5)$ и величина межзвездного поглощения $\sim 3 \times 10^{22}$ атомов см⁻² (рис. 3.3, без учета наблюдений из вышеупомянутой группы с сильным поглощением) сравнимы с результатами, полученными ранее при исследовании этого источника ([2]; [10]).

Во всех спектрах, полученных по данным спектрометра PCA, была обнаружена эмиссионная линия железа $E_{Fe} = 6.4$ кэВ. Спектрального разрешения этого

прибора не достаточно для подробного изучения профиля линии, поэтому в процессе аппроксимации спектров параметры линии были зафиксированы на уровне $E_{Fe} = 6.4$ кэВ, $\delta E_{Fe} = 0.1$ кэВ. Эквивалентная ширина линии в рассмотренных спектрах составила 100-310 эВ.

3.4 Рентгеновские всплески

При анализе кривых блеска источника MX 0836-42, полученных монитором JEM-X в энергетическом диапазоне 3-20 кэВ, нам удалось обнаружить 24 рентгеновских всплеска (табл. 3.4). Кривые блеска этого источника были построены лишь для периода его уверенной регистрации над уровнем фона - по данным, полученным в ходе 137-141 и 146 орбитальных циклов наблюдений (рис. 3.1 область III; табл. 3.2, 27 ноября - 24 декабря 2003 г.).

Ни в одном из использованных наведений не было зарегистрировано более одного всплеска. Расстояние между ближайшими из соседних всплесков составило ~ 2 ч, что находится в хорошем соответствии со значением периода рекуррентности всплесков для этого источника, полученным ранее ([2]).

Табл. 3.4. Рентгеновские всплески, зарегистрированные от источника MX 0836-42 прибором JEM-X орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ

Дата ^a , MJD	F_m^b , Краб	Дата ^a , MJD	F_m^b , Краб	Дата ^a , MJD	F_m^b , Краб
52971.95485	0.83 ± 0.20	52975.55951	0.75 ± 0.20	52980.95400	0.72 ± 0.18
52972.05406	0.62 ± 0.15	52977.29326	0.85 ± 0.21	52981.04892	0.74 ± 0.19
52972.15876	0.93 ± 0.22	52977.46570	0.69 ± 0.17	52981.14650	0.63 ± 0.16
52973.40382	0.87 ± 0.21	52978.79890	0.85 ± 0.26	52981.24224	0.56 ± 0.17
52974.63970	0.76 ± 0.21	52979.84089	1.12 ± 0.24	52982.42890	0.51 ± 0.16
52974.73381	0.69 ± 0.19	52979.93089	0.77 ± 0.17	52983.50758	0.57 ± 0.18
52975.37225	0.72 ± 0.24	52980.03784	0.84 ± 0.21	52983.71036	0.70 ± 0.17
52975.38617	0.55 ± 0.23	52980.12455	0.73 ± 0.18	52984.44236	0.85 ± 0.25

^a - момент достижения максимального значения потока излучения

^b - значение потока излучения в максимуме всплеска, усредненное за 1 с.

Для проведения детального анализа всплесков от исследуемого источника в диапазоне энергий 3-20 кэВ были использованы данные 25 наблюдений MX 0836-42, выполненные детектором РСА орбитальной обсерватории RXTE в период с 24 января по 20 марта 2003 г. и с 18 по 26 января 2004 г. (табл. 3.2). На кривых блеска, построенных по этим данным, было обнаружено 15 рентгеновских всплесков. Температура излучения источника во время спада интенсивности в ходе этих всплесков уменьшалась (рис. 3.5б), что характерно для рентгеновских всплесков I-го рода ([66]). Анализ экспозиций, во время которых производилось перенаведение обсерватории, не выявил ни одного нового всплеска излучения.

Поток излучения от источника во время всплеска достигал своего максимального значения в среднем за 6 – 8 с (рис. 3.5б) и затем в течение 3 – 4 с

во время некоторых из всплесков оставался на одном уровне (рис. 3.5в). В табл. 3.5 приведены длительности всплесков и времена экспоненциального спада потока во время всплеска. Длительность всплеска была определена как отношение суммарной энергии, выделившейся во всплесковой компоненте излучения от момента начала всплеска до момента спада потока излучения до уровня 10 % от максимального, к среднему значению потока энергии излучения всплесковой компоненты за этот период времени. Для вычисления времени экспоненциального спада потока во время всплеска, профиль последнего был аппроксимирован экспоненциальной зависимостью потока излучения от времени.

Отличительной чертой 80% из рентгеновских всплесков, зарегистрированных спектрометром РСА в излучении источника МХ 0836-42, является наличие более или менее выраженной двухпиковой структуры. Пример такого всплеска приведен на рис. 3.5а. Считается, что мультипиковая форма всплеска может возникать в результате: а) расширения фотосферы под давлением околоэддингтоновского потока излучения и б) особенностей термоядерного горения. Значимого увеличения значения цветового радиуса излучающего объекта в момент провала между пиками (поток излучения в диапазоне 3-20 кэВ упал на ~ 15%) зарегистрировано не было и это позволяет предположить, что наличие двухпиковой структуры всплеска в данном случае не связано с расширением фотосферы, а может быть результатом особенностей термоядерного горения в источнике во время всплеска.

Интересно отметить, что уровень максимального потока излучения от источника в диапазоне энергий 3-20 кэВ во время рентгеновских всплесков, обнаруженных спектрометром РСА, принимал значения от $F \sim 1.5 \times 10^{-8}$ эрг см⁻² с⁻¹ (рис. 3.5в) до $F \sim 0.5 \times 10^{-8}$ эрг см⁻² с⁻¹ (рис. 3.5г). Это позволяет проследить зависимость этой величины от суммарной энергии, выделившейся во время всплеска (рис. 3.6а). Видно, что с ростом суммарной энергии, выделившейся во время всплеска, уровень максимального потока излучения во время всплеска растет. Аналогичная зависимость была зарегистрирована для других источников рентгеновских всплесков, таких как 1608-522 ([85]), 1728-337 ([4]), 1735-44 ([65]) и 1837+049 ([137]).

Ни в одном из исследованных всплесков не было достоверно зарегистрировано расширение фотосферы нейтронной звезды, поэтому для оценки расстояния до источника МХ 0836-42 мы использовали значение потока излучения в максимуме самого яркого из вышеупомянутых рентгеновских всплесков (1.12 ± 0.24 Краб), предполагая, что светимость источника в этот момент близка к эдингтоновской светимости для нейтронной звезды с массой $1.4 M_{\odot}$. Полученное значение верхнего предела на расстояние до источника составляет $D \sim 8$ кпк. Этот результат близок к нижней границе оценки расстояния до источника $D \sim 10 - 20$ кпк, полученной ранее Аоки и др. ([2]) в предположении о том, что во время рентгеновского всплеска цветовой радиус излучающего объекта должен соответствовать радиусу нейтронной звезды - 10 км.

На рис. 3.5 в,г представлены зависимости от времени значений модельного потока излучения и цветовых температуры и радиуса излучающего объекта, полученные в процессе аппроксимации спектров источника моделью излучения черного тела во время наиболее и наименее ярких всплесков, зарегистрированных спектрометром РСА/RXTE. Все исследуемые спектры были скорректированы на уровень фоновой скорости счета детектора и излучения исследуемого источника в спокойном состоянии. Значение цветовой температуры излучающей области в среднем поднималось в начале всплеска в течение 1-4 с до уровня 2-2.5 кэВ и постепенно спадало в течение всплеска до уровня 1.5-2.0 кэВ.

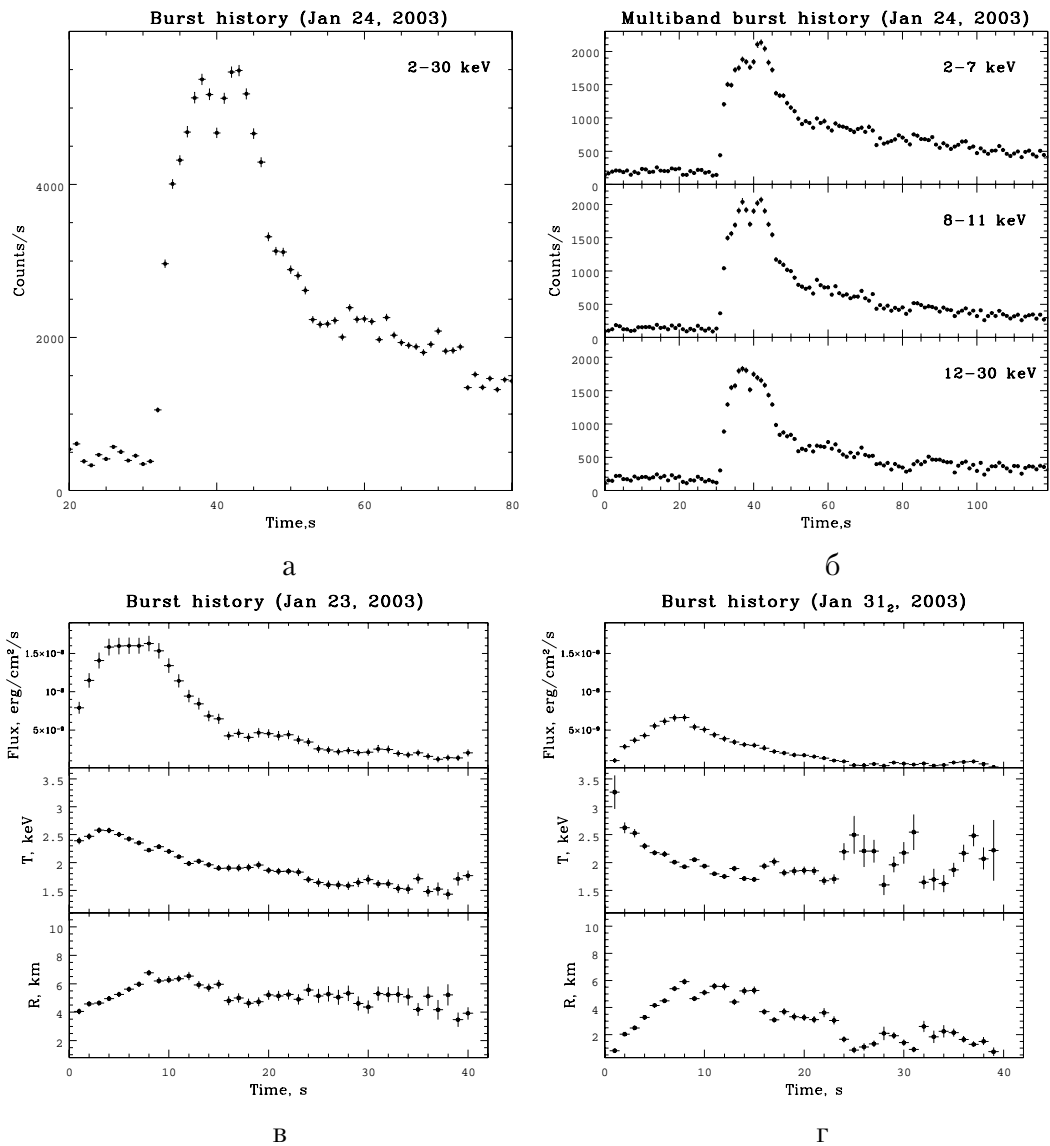


Рис. 3.5. На панелях а и б приведены временные истории всплеска, зарегистрированного 24 января 2003 г. в излучении источника MX 0835-42 спектрометром PCA/RXTE в различных энергетических диапазонах. Ясно видна характерная особенность всплеска: двухпиковая структура в области максимума. На панелях в и г изображены зависимости от времени потока излучения в диапазоне 3-20 кэВ и значений температуры и радиуса излучающего объекта, полученных в результате аппроксимации моделью излучения черного тела спектров излучения источника MX 0836-42 во время всплесков, зарегистрированных в 2003-2004 гг. детектором PCA/RXTE. Время на панелях в и г отсчитывается от момента начала всплеска, а на панелях а и б начало всплеска соответствует 30 с по оси времени.

Значение цветового радиуса R_c излучающей области в среднем поднималось в начале всплеска в течение 3-5 с от уровня 1-3 км до уровня 4-6 км и незначительно снижалось к концу всплеска (на $\sim 10 - 15\%$). Такое поведение R_c может свидетельствовать об изменении размера области, охваченной взрывом, а также о заметной роли комптонизации в формировании спектра. Средние значения максимальной температуры $kT_{bb} \sim 2.5$ кэВ и радиуса $R \sim (4 - 6) \times (D/8 \text{ кпк})$ км находятся в хорошем соответствии со значениями этих параметров, полученными Аоки и др. ([2]).

На рис. 3.6б представлена построенная на основе 15 рентгеновских всплесков, зарегистрированных детектором РСА/RXTE, зависимость потока излучения источника в спокойном состоянии от суммарной энергии, выделившейся во время всплеска. Из рисунка видно, что между этими величинами существует прямая зависимость. Этот факт может служить прямым аргументом в пользу современного представления о феномене барстеров. За время между всплесками аккрецирующее вещество падает на поверхность нейтронной звезды, выделяя часть своей гравитационной энергии в виде излучения, которое мы наблюдаем как излучение системы в спокойном состоянии. Впоследствии, это вещество становится топливом для стабильных и взрывных термоядерных реакций, последние из которых мы наблюдаем как рентгеновский всплеск. В этом случае, если предположить, что за время всплеска используется весь накопленный запас топлива, то с ростом потока излучения системы в спокойном состоянии, а значит с ростом темпа аккреции вещества, растет и суммарная энергия, выделяющаяся во время всплеска.

Детектор РСА не является телескопом, т.е. по его данным нельзя строить изображения области неба в поле зрения прибора, поэтому нельзя достоверно утверждать, что источником зарегистрированных всплесков является именно МХ 0836-42. Отметим, однако, что в момент регистрации каждого из всплесков в поле зрения РСА находился лишь один известный барстер - МХ 0836-42.

Обсерватория RXTE находится на низкой околоземной орбите, что позволяет ее приборам вести непрерывное наблюдение за источником лишь в течение 65% его 90 мин. орбиты. Ни в одном из использованных нами сеансов наблюдений приборами РСА не произошло более одного рентгеновского всплеска, поэтому по этим данным мы не можем достоверно определить значение периода рекуррентности всплесков τ_r для источника МХ 0836-42. Однако в двух последовательных сеансах 31 января 2003 г. спектрометром РСА было зарегистрировано два рентгеновских всплеска, промежуток между которыми составил ~ 7205 с, что соответствует периоду рекуррентности всплесков, определенному для данного источника Аоки и др. ([2]). Непрерывные наблюдения источника проводились в течение ~ 2850 с после первого из этих всплесков, затем наблюдения были прерваны на ~ 2610 с и затем продолжены вновь. Усредненное по второму из всплесков значение потока излучения в диапазоне энергий 3-20 кэВ составило $F = (3.50 \pm 0.81) \times 10^{-9}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$, а среднее значение болометрического потока излучения источника между этими всплесками $F = (1.61 \pm 0.06) \times 10^{-9}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$. Мы считаем, что большая часть энергии излучения во время всплеска выделяется в диапазоне 3-20 кэВ.

В соответствии с современным пониманием процессов, происходящих в барстерах, между всплесками рентгеновского излучения от такой системы выделяется гравитационная энергия E_g аккрецируемого нейтронной звездой вещества, а во время всплеска - энергия E_b его термоядерного горения. Если предположить, что за время между наведениями, содержащими первый и второй всплески, в течение которого наблюдение за системой не проводилось, других вспле-

Табл. 3.5. Рентгеновские всплески, зарегистрированные от источника MX 0836-42 детектором PCA орбитальной обсерватории RXTE.

Дата, UTC	$T^{a,b}$, MJD	T_{eff}^c , с	F_{max}^d	F_p^e	E_b^f , эрг	τ_R^g , с
2003						
23.01	52662.59371 ^{8.3}	16.3	1.63 ± 0.10	3.18 ± 0.05	2.04 ± 0.45	11490
24.01	52663.30598 ^{13.0}	25.2	1.23 ± 0.07	3.26 ± 0.06	2.37 ± 0.30	13540
25 ₁ .01	52664.44409 ^{17.3}	21.2	1.08 ± 0.06	2.56 ± 0.13	1.75 ± 0.24	12500
25 ₂ .01	52664.63042 ^{19.4}	19.1	1.01 ± 0.06	2.96 ± 0.07	1.48 ± 0.36	9140
26.01	52665.70233 ^{15.9}	15.4	1.14 ± 0.06	2.67 ± 0.04	1.34 ± 0.19	9180
27.01	52666.56018 ^{20.4}	26.5	0.98 ± 0.07	2.53 ± 0.04	1.99 ± 0.27	14380
28.01	52667.66849 ^{14.7}	21.3	0.95 ± 0.07	1.81 ± 0.11	1.55 ± 0.25	15660
29.01	52668.19157 ^{12.4}	16.7	0.82 ± 0.07	1.34 ± 0.20	1.05 ± 0.20	14320
31 ₁ .01	52670.55370 ^{12.6}	18.3	1.18 ± 0.07	1.95 ± 0.05	1.65 ± 0.24	15470
31 ₂ .01	52670.63709 ^{10.9}	12.3	0.66 ± 0.05	1.61 ± 0.05	0.62 ± 0.14	7205
02.02	52672.62445 ^{16.9}	28.6	0.89 ± 0.06	1.59 ± 0.10	1.95 ± 0.21	22430
14.03	52712.40822 ^{16.0}	17.6	1.36 ± 0.08	1.87 ± 0.04	1.83 ± 0.29	17890
17.03	52715.45322 ^{16.6}	16.0	1.12 ± 0.09	1.88 ± 0.08	1.37 ± 0.21	13320
20.03	52718.53647 ^{16.3}	25.6	1.03 ± 0.07	1.82 ± 0.07	2.02 ± 0.39	20290
2004						
18.01	53022.663252 ^{16.8}	18.7	0.92 ± 0.06	1.37 ± 0.08	1.32 ± 0.24	17620

Примечание: Нижний индекс в дате указывает на порядковый номер всплеска в течение соответствующего дня

a - момент начала всплеска

b - индексом указано экспоненциальное время затухания всплеска в секундах

c - эффективная длительность всплеска

d - поток излучения в максимуме всплеска в диапазоне энергий 3-20 кэВ ($\times 10^{-8}$ эрг см⁻² с⁻¹)

e - поток излучения в спокойном состоянии в диапазоне энергий 3-120 кэВ ($\times 10^{-9}$ эрг см⁻² с⁻¹)

f - энергия, выделившаяся во время всплеска ($\times (D/8 \text{ кПк})^2 \times 10^{39}$)

g - период рекуррентности всплесков (при $\alpha = 140$)

сков не произошло, мы можем определить параметр режима термоядерного горения (отношение $\alpha = \frac{E_g}{E_b}$) из следующего соотношения:

$$\alpha \approx \tau_R L_p / \tau_B L_B, \quad (3.1)$$

где $L_p = 1.24 \times 10^{37} (D/8 \text{ кпк})^2 \text{ эрг с}^{-1}$ и $L_B = 5.04 \times 10^{37} (D/8 \text{ кпк})^2 \text{ эрг с}^{-1}$ — средние значения светимости системы в спокойном состоянии и во время всплеска, а $\tau_B = 12.3 \text{ с}$ и $\tau_R = 7205 \text{ с}$ — длительности всплеска и периода между всплесками соответственно. Формула (3.1) в данном случае дает значение $\alpha \approx 144$, что характерно для всплеска, произошедшего в результате взрывного горения гелия ([11]).

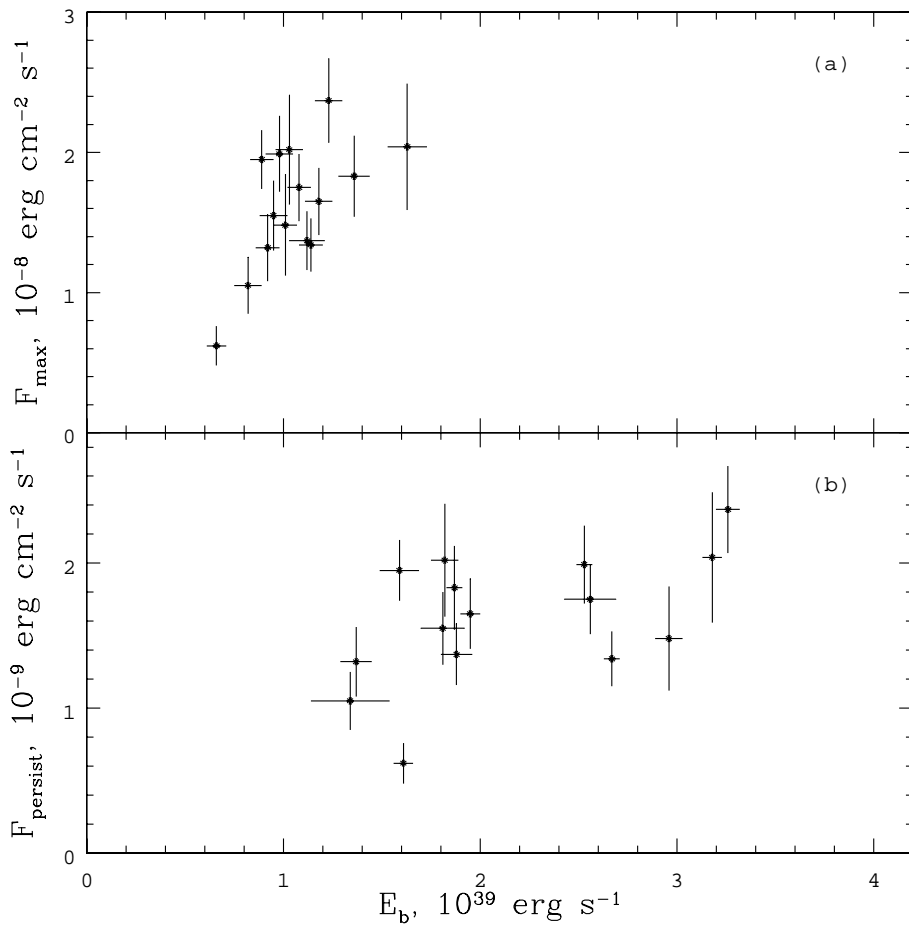


Рис. 3.6. Зависимости максимального значения потока излучения во время всплеска от суммарной энергии, выделившейся во время всплеска (а), и потока излучения источника в спокойном состоянии от суммарной энергии, выделившейся во время всплеска (б). Зависимости построены для 15-и рентгеновских всплесков, зарегистрированных от источника MX 0836-42 по данным спектрометра PCA/RXTE.

Если предположить, что режим термоядерного горения не изменялся от всплеска к всплеску, то, используя полученное выше значение α , можно оценить периоды рекуррентности всплесков в других сеансах. В табл. 3.5 приведены значения времени рекуррентности всплесков от исследуемого источника, полученные при помощи формулы (3.1) в предположении о том, что параметр $\alpha = 140$. Учитывая соотношение периодов рекуррентности и средней длитель-

ности периода непрерывного наблюдения источника обсерваторией, нетрудно объяснить факт наблюдения в каждом из сеансов только одного всплеска. Стоит отметить, что полученные таким методом оценки в 2-3 раза превышают значение периода рекуррентности всплесков от источника MX 0836-42, полученного Аоки и др. ([2]): $\tau_R \sim 2$ часа. Если предположить, что $\tau_R \sim 2$ часа, то с помощью формулы (3.1) можно определить среднее по всем наблюдавшимся всплескам значение параметра $\alpha \sim 80$, что характерно для смешанных водородно-гелиевых всплесков ([11]). Эта модель лучше описывает форму наблюдаемых всплесков, в частности, относительно длительный (6-8 с) период подъема интенсивности во время всплеска до максимального уровня.

В табл. 3.2 приведены значения темпа аккреции, соответствующего полному зарегистрированному потоку излучения от исследуемого источника в спокойном состоянии (предполагается, что большая часть излучаемой энергии приходится на рассматриваемый диапазон энергий), и соответствующих периодов рекуррентности водородно-гелиевых всплесков от него, вычисленных в предположении о том, что аккрецированное вещество занимает 1/3 поверхности (τ_1) и всю поверхность (τ_2) нейтронной звезды. Из этой таблицы видно, что если всплески в MX 0836-42 водородно-гелиевые, то аккрецируемое вещество, участвующее во взрыве во время всплеска, занимает лишь часть поверхности нейтронной звезды.

3.5 Обсуждение

На рис. 3.2 приведена кривая блеска источника MX 0836-42 по всем доступным данным монитора ASM/RXTE, на которой ясно видно повышение уровня потока излучения от источника на масштабе ~ 600 дней. Ясно, что даже если этот феномен и имеет циклический характер, то период таких вспышек составляет более 7 лет. Причиной подобных вспышек может являться, например, неравномерность в процессе аккреции.

Из рис. 3.3 следует, что среди наблюдений источника приборами обсерватории RXTE существует группа из трех наблюдений с аномально высоким уровнем поглощения (табл. 3.3). Можно предположить, что во время этих наблюдений в системе появляется дополнительное поглощение, возможно связанное с внешними областями аккреционного диска. В пользу этого объяснения свидетельствует тот факт, что чем более “жестким” (поглощенным) является спектр, тем более сильна эмиссионная линия железа в нем. Например, эквивалентная ширина линии в спектре, построенном по данным наблюдений 26 января, составила ~ 120 эВ, в то время как для наблюдений 29₁ января эта величина составила ~ 310 эВ. Отметим, что данное объяснение предполагает большое наклонение аккреционного диска в исследуемой системе. Такой процесс может быть периодическим и связанным с орбитальным движением в двойной системе, т.е. источник может быть диппером. Для проверки этого предположения был произведен анализ кривой блеска источника в диапазоне энергий 1.3-3.0 кэВ - наиболее подверженном поглощению, построенной по данным монитора всего неба ASM/RXTE за период с 5 января 1996 г. по 7 апреля 2005 г., на предмет наличия периодических вариаций в диапазоне частот $(5 - 300) \times 10^{-6}$ Гц, характерном для орбитального движения маломассивной двойной системы. В результате этого анализа не удалось обнаружить значимого периода вариаций сигнала.

В непосредственной близости от исследуемого источника (24 мин. дуги) находится транзиентный рентгеновский пульсар GRS 0834-43. Детекторы PCA и HEXTE не обладают способностью пространственно разделять источники реги-

стрируемого излучения, поэтому вышеупомянутый пульсар, попадая в поле зрения этих приборов, мог вносить искажения в наблюдаемый спектр источника MX 0836-42. Для проверки этой гипотезы мы провели поиск пульсаций с периодом ~ 12 с, характерным для пульсара GRS 0834-43, по всем использованным данным наблюдений MX 0836-42 спектрометром PCA. В результате этих исследований ни в одном из наблюдений нам не удалось обнаружить пульсирующую компоненту, статистическая значимость которой превышала бы 3σ . Стоит отметить, что по данным монитора всего неба ASM/RXTE вспышечной активности в излучении источника GRS 0834-43 в течение данного периода зарегистрировано не было, а по данным телескопа IBIS/ISGRI в период с января 2003 г. по март 2004 г. статистическая значимость регистрации этого источника в диапазоне 20-60 кэВ не превышала 3σ , причем верхний предел на поток излучения от источника за весь этот период равен 1 мКраб, а за время одного наблюдения (~ 2 кс) - ~ 10 мКраб. Таким образом, спектры постоянного излучения, построенные по имеющимся данным детекторов PCA и HEXTE, действительно относятся к излучению источника MX 0836-42.

В течение некоторых из 15 рентгеновских всплесков, зарегистрированных спектрометром PCA во время наведений на исследуемый источник, среднее значение “цветового” радиуса излучающего объекта составило 4-7 км (рис. 3.5 в,г), что меньше значения радиуса, получаемого в рамках стандартных моделей строения нейтронной звезды для ее радиуса. Причиной такого несоответствия может быть модификация спектра излучения источника за счет рассеяния, которое приводит к завышению значений “цветовой” температуры и занижению значений “цветового” радиуса ([61]; [107]; [3]).

Из табл. 3.5 видно, что значение суммарной энергии, выделившейся за время всплеска 31₂ января 2003 г. в 2-3 раза меньше, чем эта величина для остальных всплесков, а сам всплеск произошел в 2 раза раньше, чем могло произойти накопление достаточной для детонации поверхностной плотности вещества (в том случае, если детонация охватывает всю поверхность нейтронной звезды)(табл. 3.2). Аналогичная ситуация наблюдалась в излучении от этого источника 18 февраля 1991 г. ([2]), за тем исключением, что расстояние между всплесками в том случае составило лишь ~ 10 минут. Такие феномены можно объяснить следующим образом.

1) Источником всплеска является другой барстер. Хотя морфологически этот всплеск похож на другие всплески данного источника, учитывая тот факт, что детектор PCA не обладает возможностью построения изображения наблюдаемого участка неба, опровержение этого предположения при помощи имеющихся данных не представляется возможным. Такое предположение может также объяснить и различные уровни максимального потока энергии излучения от источника во время всплесков;

2) Термоядерное горение во время всплеска происходит в отличном от остальных случаев режиме. Это возможно, если, например, некоторое количество топлива не было использовано в ходе предыдущего всплеска. В случаях 1 и 2 мы ничего не можем сказать о величинах параметра α и периода рекуррентности всплесков в других сеансах;

3) Процесс аккреции охватил меньшую часть поверхности нейтронной звезды, что привело к более быстрому накоплению вещества до уровня поверхностной плотности, необходимого для детонации. Об этом могут свидетельствовать более заметные, по сравнению с другими всплесками, увеличение цветового радиуса в начале и его уменьшение в конце этого всплеска (рис. 3.5г).

Глава 4

KS 1731-260

В данной главе представлены результаты наблюдений телескопом АРТ-П обсерватории ГРАНАТ транзиентного рентгеновского барстера KS 1731-260. Наблюдения были выполнены в 1990–1991 гг. на начальном этапе 12-летнего периода активности источника, в то время, когда исследования другими рентгеновскими обсерваториями не проводились. Показано, что поток излучения KS 1731-260 систематически падал, формируя отдельную начальную “минивспышку” источника длительностью ~ 2.5 года. Падение потока сопровождалось увеличением жесткости спектра излучения KS 1731-260 и усилением его всплесковой активности — в последних сеансах наблюдений, когда поток упал на 40-60%, были зарегистрированы два рентгеновских всплеска. Их анализ показал, что они произошли в среде с заметным содержанием водорода, т.е. эффективность обогащения вещества в нижних слоях атмосферы нейтронной звезды в процессе квазистационарного горения водорода была невысокой.

Для исследования спектра непрерывного излучения источника была применена модель BDLE, предложенная нами ранее для описания спектров излучения аккрецирующих нейтронных звезд со слабым магнитным полем. Модель учитывает две спектральных компоненты, связанные с излучением “пограничного слоя”, образующегося в месте соприкосновения аккреционного диска и поверхности нейтронной звезды, и излучением собственно аккреционного диска. Модель достаточно хорошо аппроксимировала наблюдаемые спектры излучения источника и позволила оценить такие параметры системы, как наклонение аккреционного диска, болометрическую светимость (темп аккреции), температуру внешних слоев погранслоя. Было показано, что в случае KS 1731-260 излучение “погранслоя” формировалось в экспоненциальной атмосфере умеренной оптической толщи по томсоновскому рассеянию, в условиях, когда комптонизация не успевала сформировать виновский спектр, а лишь модифицировала тепловой спектр излучения плазмы.

4.1 Введение

Рентгеновский транзиент KS 1731-260 был открыт в 1989 г. в ходе обзора области галактического центра телескопом ТТМ обсерватории “Рентген” на модуле КВАНТ орбитальной станции “Мир” ([104]). После обнаружения от KS 1731-260 рентгеновских всплесков ([105]) стало ясно, что наблюдается двойная система, содержащая аккрецирующую нейтронную звезду со слабым магнитным полем. В 1996 г. при исследовании рентгеновских всплесков обсерваторией RXTE были обнаружены когерентные осцилляции потока излучения источника на частоте ~ 524 Гц, вероятно, связанные с вращением нейтронной звезд.

ды ([101]). В спокойном состоянии (между всплесками) в излучении источника были выявлены квазипериодические осцилляции потока на частотах ~ 900 Гц и ~ 1150 Гц ([17]). Обсерватории RXTE посчастливилось зарегистрировать несколько мощных рентгеновских всплесков, сопровождавшихся расширением фотосферы нейтронной звезды, что позволило оценить расстояние до системы $d \simeq 7$ кпк ([84]). Еще более интересный всплеск был зарегистрирован спутником ВерроSAX – он стал своеобразным рекордсменом по длительности (~ 12 ч) среди всех всплесков, когда-либо наблюдавшихся от барстеров ([58]).

Источник KS 1731-260 расположен в густонаселенной области неба и наблюдается сквозь галактический диск. Хотя попытки его оптического (точнее – ИК) отождествления предпринимались неоднократно (например, [97]), определенного прогресса в этом удалось добиться лишь недавно ([78]). ИК-спутником является звезда с видимой величиной $J \simeq 19^m$ и абсолютной величиной $J = 2.^m4 \pm 0.^m4$ – сильно проэволюционировавшая, либо звезда главной последовательности раннего спектрального класса F или G. Отметим, что Ревнивцев и Сюняев ([97]), используя данные обсерватории RXTE, показали, что поток от KS1731-260 меняется с периодом ~ 38 дней, орбитальным или прецессионным.

Источник относится к группе долгопериодических транзиентов с характерным временем рентгеновской активности от одного-двух до десятка лет и с очень большим периодом рекуррентности ([1]). KS 1731-260 находился в состоянии с высоким уровнем светимости на протяжении 12 лет (рис. 4.1). В течение первых 7-8 лет поток излучения в стандартном рентгеновском диапазоне в среднем увеличивался ($s \sim 40$ мКраб на момент обнаружения до $\sim 200 - 250$ мКраб в максимуме блеска), а затем начал падать (в последних успешных наблюдениях он был зафиксирован на уровне ~ 20 мКраб). На масштабе недель и месяцев изучение источника характеризовалось сильной переменностью – большей в периоды относительно низкого среднего потока. Хотя в основном источник имел типичный для маломассивных рентгеновских систем тепловой спектр излучения с температурой $kT \sim 5 - 7$ кэВ (при аппроксимации моделью тормозного излучения оптически тонкой тепловой плазмы), в отдельных наблюдениях был зафиксирован очень жесткий спектр с температурой $kT \gtrsim 40$ кэВ ([1]).

До момента обнаружения KS 1731-260 в 1989 г. рентгеновские обсерватории неоднократно наводились в этом направлении, но никаких признаков присутствия источника не обнаруживали. Через несколько месяцев после “выключения” источника в 2001 г. было проведено наблюдение этой области обсерваторией CHANDRA ([18]), выявившее на месте KS 1731-260 слабый объект с рентгеновской светимостью $\sim 10^{33}$ эрг s^{-1} в диапазоне 0.5-10 кэВ (при $d = 7$ кпк). Полученное значение хорошо согласуется со светимостями других подобных транзиентов (аккрецирующих нейтронных звезд в маломассивных системах), наблюдаемых во время их “выключенного” состояния. Оценки ([83]) показывают, что светимость на этом уровне может обеспечиваться остаточной аккрецией, связанной с естественной эволюцией двойной системы (потерей углового момента из-за гравитационного излучения и эволюционным расширением звезды-донора).

В 1990-1991 гг., на начальном этапе вспышки, источник KS 1731-260 несколько раз попадал в поле зрения телескопа АРТ-П обсерватории ГРАНАТ. Телескоп АРТ-П в это время был единственным инструментом на орбите, проводившим наблюдения в стандартном рентгеновском диапазоне. Некоторые предварительные результаты этих наблюдений были включены в обзор Лутовинова и др. ([63]). В настоящей работе результаты наблюдений KS 1731-260 представлены в полном объеме.

4.2 Наблюдения

Одной из наиболее приоритетных задач обсерватории ГРАНАТ был глубокий обзор области галактического центра в рентгеновском и мягком гамма-диапазоне. Наблюдения проводились каждый раз, когда позволяли технические условия. К сожалению, в большинстве случаев обсерватория наводилась непосредственно на центр Галактики (источник Sgr A*), при этом KS 1731-260 оказывался вне поля зрения телескопа АРТ-П. Случаи, когда источник все же удавалось наблюдать, приведены в табл. 4.2. Во всех этих случаях был включен лишь один из модулей телескопа. Отметим, что телескоп СИГМА на борту обсерватории ГРАНАТ, чувствительный к жестким $h\nu \gtrsim 35$ кэВ фотонам, имел более широкое поле зрения и мог наблюдать источник KS 1731-260 в течение практически всего времени обзора.

Табл. 4.1. Наблюдения источника KS 1731-260 телескопом АРТ-П

Номер сеанса	Модуль АРТ-П	Дата сеанса начало-конец, UT	T , ^a с	F , ^b мКраб	L , ^b 10^{37} эрг с ⁻¹
1	1	1990/04/04.550-04.796	14140	117.5 ± 1.7	1.67 ± 0.02
2	1	1990/08/23.699-23.996	16770	85.8 ± 2.3	1.22 ± 0.03
3	4	1990/09/15.408-15.416	530	86 ± 22	1.22 ± 0.31
4	4	1990/09/15.561-15.604	2790	109.1 ± 7.7	1.55 ± 0.11
5	4	1990/10/07.485-07.975	32750	64.1 ± 1.6	0.91 ± 0.02
6	3	1991/09/08.572-08.854	16470	$\leq 31^\Gamma$	$\leq 0.45^\Gamma$
7	3	1991/10/06.526-06.836	17870	36.8 ± 4.6	0.53 ± 0.07

^a Экспозиция после коррекции на “мертвое” время

^b Поток фотонов в диапазоне 3-20 кэВ

^b Светимость в диапазоне 3-20 кэВ на расстоянии $d = 7$ кпк

^Г 3σ верхний предел

Мишенью для наблюдений, приведенных в табл. 4.2, как правило, был рентгеновский пульсар GX 1+4. На рис. 4.2 показано изображение в диапазоне 3-20 кэВ, полученное телескопом АРТ-П 15 сентября 1990 г., во время 4 сеанса. На изображении хорошо видны оба источника. Отмечено также положение транзитного источника IGR J17331-2406, открытого недавно в этом поле в $\sim 40'$ от GX 1+4 обсерваторией ИНТЕГРАЛ ([64]). Телескопом АРТ-П излучение источника IGR J17331-2406 зарегистрировано не было (3σ верхний предел на поток фотонов в диапазоне 3–20 кэВ был равен 16 мКраб в этом и до 4 мКраб в других сеансах). Поток фотонов и светимость, измеренные в разных сеансах наблюдений от источника KS 1731-260 приведены в табл. 4.2. Видно, что в 3 и 6 сеансах поток был определен с большими статистическими ошибками, что связано в первом случае с малой длительностью сеанса, во втором — с неудачным наведением (KS 1731-260 оказался на самом краю поля зрения). Ситуацию в последнем случае ухудшило и то, что наблюдения проводились 3 модулем телескопа АРТ-П с пониженной чувствительностью на мягких энергиях.

На кривой блеска источника KS 1731-260, представленной на рис. 4.1, результаты измерения рентгеновского потока телескопом АРТ-П показаны заштрихованными кружками, результаты измерения обсерваториями RXTE и “Рентген” — незаштрихованными кружками и квадратами соответственно. По-

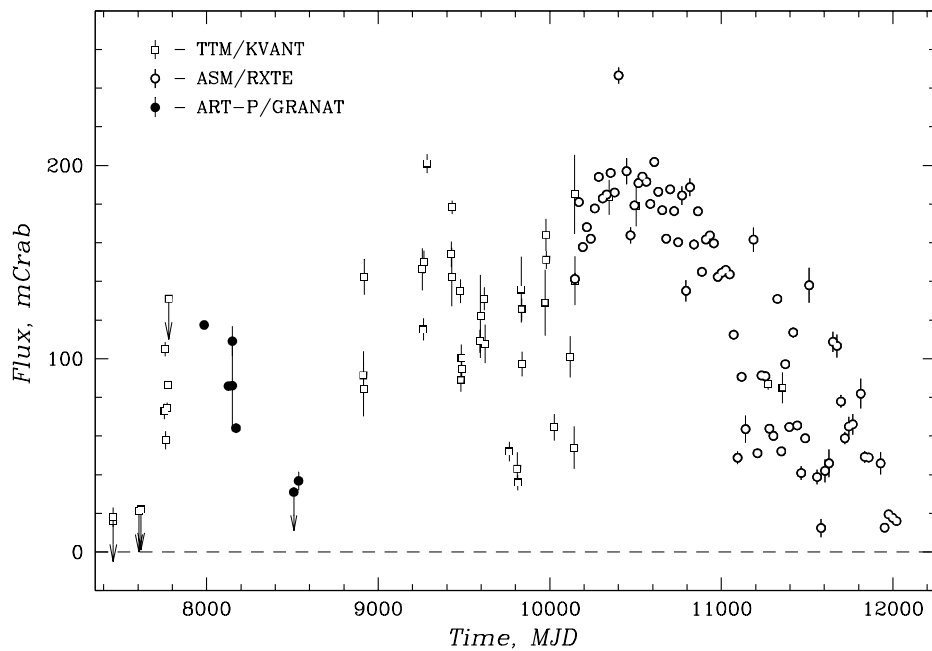


Рис. 4.1. Кривая блеска источника KS 1731-260 по данным приборов TTM/КВАНТ (2-27 кэВ), ASM/RXTE (2-12 кэВ) и АРТ-П/ГРАНАТ (3-20 кэВ). Результаты наблюдений приборами TTM/КВАНТ и ASM/RXTE усреднены на масштабе 2 суток (предоставлены Александровичем и др. [1]).

следние данные были взяты из работы Александровича и др. ([1]) и для удобства восприятия усреднены на масштабе 2 суток. Видно, что во время наблюдений источника телескопом АРТ-П поток излучения от него в среднем падал. Периоду падения предшествовал наблюдавшийся с момента открытия KS 1731-260 период роста потока, так что можно говорить о существовании отдельной начальной вспышки источника длительностью 2.5–3 года. С определенной степенью уверенности можно даже утверждать, что после первой вспышки и до достижения основного максимума блеска источник испытал еще одну вспышку приблизительно той же длительности, но большей амплитуды.

4.3 Спектр постоянного излучения

Для исследования спектра рентгеновского излучения источника KS1731-260 и его эволюции в условиях наблюдаемого падения потока были использованы данные 1, 2, 4 и 5 сеансов наблюдений. Соответствующие спектры приведены на рис. 4.3. На первом этапе их анализа проверялись три простые модели: степенной закон с экспоненциальным завалом на высоких энергиях (*cutoff* в стандартном пакете XSPEC), спектр тормозного излучения оптически тонкой тепловой плазмы (*bremss*) и спектр, формирующийся при комптонизации низкочастотного излучения в облаке высокотемпературной электронной плазмы (*compst*, Сюняев, Титарчук, 1980). Параметры наилучшей аппроксимации данных этими моделями в диапазоне 3–20 кэВ приведены в табл. 4.3, а соответствующие спектры, полученные в рамках модели *bremss*, показаны на рис. 4.3 сплошными кривыми. При аппроксимации спектров была введена поправка на фотопоглощение в межзвездном газе на уровне, соответствующем поверхност-

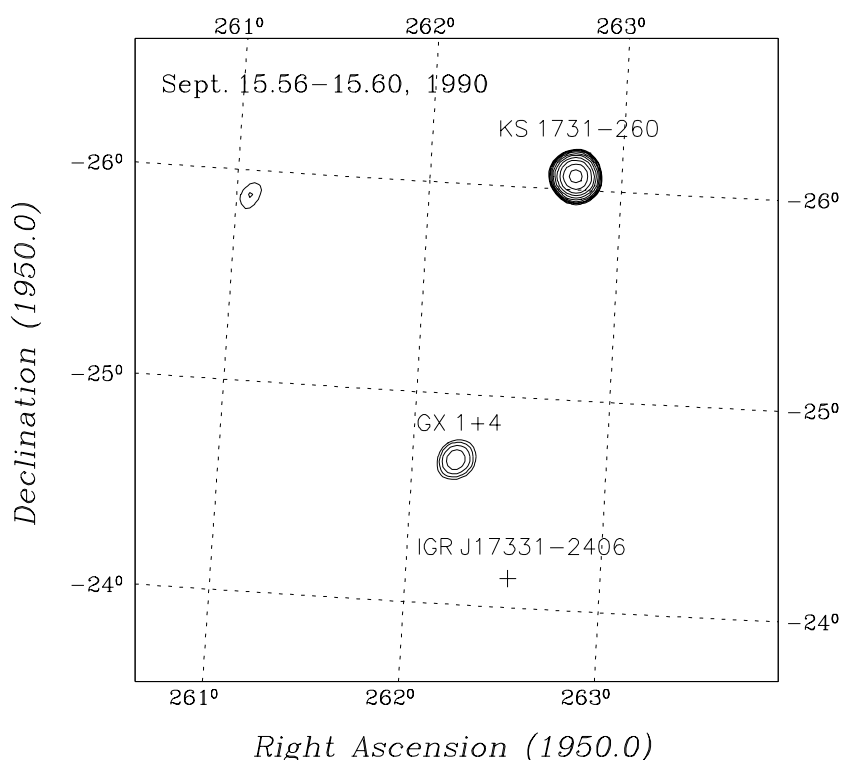


Рис. 4.2. Рентгеновское изображение области неба вблизи источника KS 1731-260, полученное телескопом АРТ-П 15 сентября 1990 г. (сеанс 4, экспозиция 2790 с). Контурсы показывают область достоверной регистрации источников в диапазоне энергий 3-20 кэВ и даны на уровне отношения сигнала к шуму 3, 3.9, 5.1, 6.6, ..., 32 (используется логарифмическая шкала).

ной плотности водорода $N_{\text{H}} \simeq 1.1 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ([7]).

Значения χ^2 , приведенные в табл. 4.3, свидетельствуют о том, что наблюдаемые спектры излучения источника достаточно хорошо аппроксимируются указанными однокомпонентными моделями. К сожалению, все они имеют слабое отношение к описанию реальных физических условий в области, где формируется рентгеновское излучение. Реалистичная модель должна содержать две компоненты: мягкую, описывающую спектр излучения внутренних областей аккреционного диска, и жесткую, описывающую излучение горячего “пограничного слоя”, формирующегося в месте соприкосновения диска и поверхности нейтронной звезды. Первая компонента может в начальном приближении быть аппроксимирована спектром излучения “многоцветного” чернотельного диска ([133]; [79]). Вторая, которая в общем случае с трудом поддается простому моделированию, при больших светимостях $L_X \gtrsim 5 \times 10^{37} \text{ эрг с}^{-1}$ может быть аппроксимирована виновским законом излучения ([27]). При таких светимостях плазма в “погранслое” становится оптически толстой и разреженной в силу давления излучения. Наблюдаемый спектр формируется при комптонизации низкочастотных тормозных фотонов, испущенных в глубине “погранслоя”. При понижении светимости до $L_X \lesssim 1 \times 10^{37} \text{ эрг с}^{-1}$ плазма в “погранслое” становится более прозрачной. Параметр комптонизации $y = (kT_b/m_e c^2)\tau_T^2$ падает до единицы и спектр перестает быть виновским. Рассеяние фотонов на электронах (без изменения

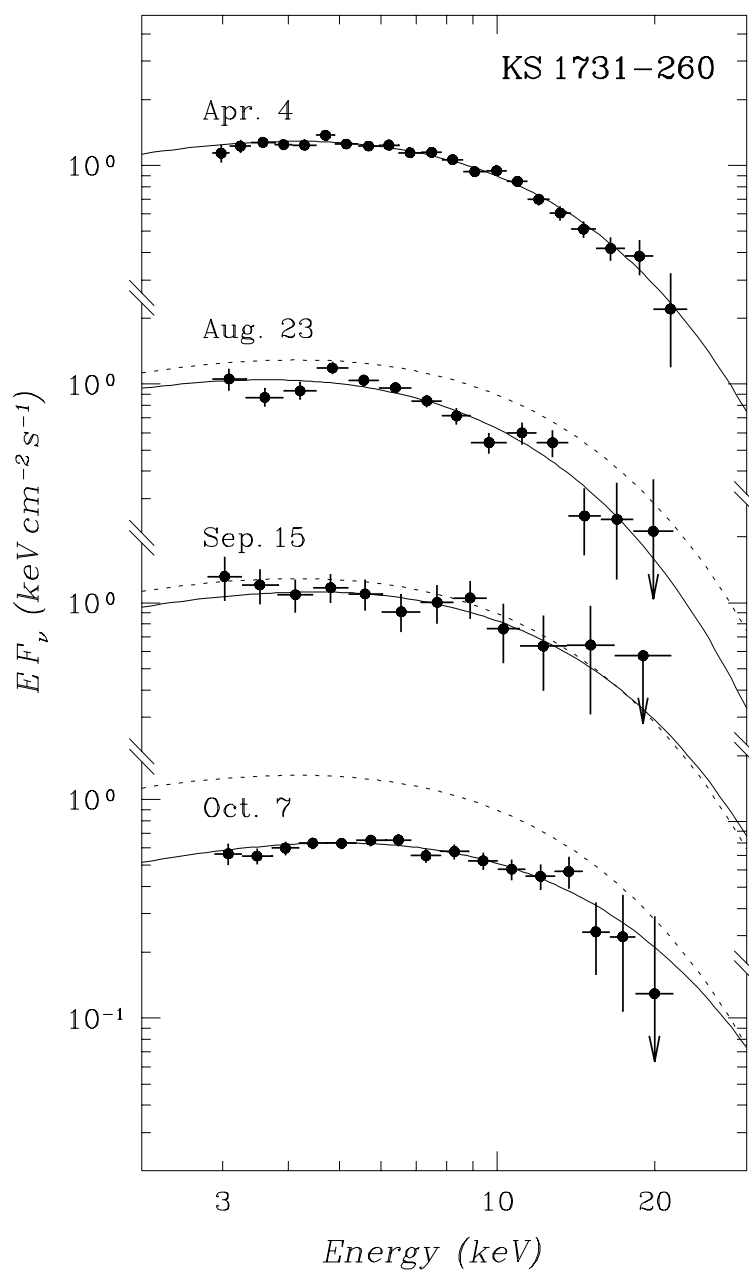


Рис. 4.3. Спектры постоянного излучения источника KS1731-260, полученные телескопом АРТ-II в 1990 г. — во время 1, 2, 4 и 5 сеансов наблюдений. Сплошными линиями показан результат аппроксимации спектров моделью тормозного излучения оптически тонкой тепловой плазмы. Для спектров 2–5 пунктирной линией показан также результат аппроксимации спектра 1 (для сравнения).

Табл. 4.2. Параметры наилучшей аппроксимации спектров излучения источника KS 1731-260, полученных в ходе его наблюдений телескопом АРТ-П в 1990 г.

Сеанс	Модель ^а	kT , кэВ	$\alpha^б$	$\tau^в$	$\chi^2_N(N)^г$
1	<i>bremss</i>	6.14 ± 0.15	1.36 ± 0.16	10.50 ± 0.67	1.06(17)
	<i>compst</i>	2.98 ± 0.17			1.21(16)
	<i>cutoff</i>	6.05 ± 0.75			1.12(16)
2	<i>bremss</i>	5.40 ± 0.28	0.99 ± 0.39	11.78 ± 1.64	1.23(17)
	<i>compst</i>	2.52 ± 0.29			1.35(16)
	<i>cutoff</i>	4.22 ± 0.96			1.27(16)
4	<i>bremss</i>	6.14 ± 1.07	$1.36^д$	$10.50^д$	0.42(17)
	<i>compst</i>	2.99 ± 0.28			0.41(17)
	<i>cutoff</i>	6.09 ± 1.07			0.42(17)
5	<i>bremss</i>	7.57 ± 0.50	1.23 ± 0.36	11.18 ± 1.60	0.59(17)
	<i>compst</i>	3.13 ± 0.43			0.65(16)
	<i>cutoff</i>	6.67 ± 2.42			0.62(16)

^а Используемая спектральная модель: *bremss* — тормозного излучения оптически тонкой тепловой плазмы; *compst* — комптонизации Сюняева, Титарчука (1980); *cutoff* — степенной закон с экспоненциальным завалом $E^{-\alpha} \exp(-E/kT)$.

^б Фотонный индекс.

^в Радиальная томсоновская толща облака электронной плазмы.

^г Значение χ^2 , нормированное на N (N — число степеней свободы).

^д Параметр зафиксирован на значении, полученном в сеансе 1.

частоты) все еще играет определяющую роль в его формировании, приводя к так называемому “модифицированному спектру излучения экспоненциальной атмосферы” ([43]).

Прямое использование двухкомпонентной модели, состоящей из виновского спектра (или спектра экспоненциальной атмосферы) и спектра “многоцветного” диска, приводит к неразумно большому числу независимых параметров для описания относительно простых наблюдаемых спектров аккрецирующих нейтронных звезд. Поэтому для описания спектров источника мы использовали предложенную нами в главе II спектральную модель BDLE. Результат аппроксимации моделью BDLE спектра излучения источника, наблюдавшегося 7 октября 1990 г. (сеанс 5), показан на рис. 4.4. Сплошная и штриховая линия на рис. 4.4а соответствуют предположениям о виновском спектре излучения “погранслоя” и спектре излучения экспоненциальной атмосферы, пунктирной линией для сравнения показан спектр тормозного излучения оптически тонкой тепловой плазмы. Сплошная, штриховая и пунктирные линии на рис. 4.4б соответствуют полному спектру излучения в модели BDLE (вариант с экспоненциальной атмосферой) и спектрам излучения “погранслоя” и аккреционного диска по отдельности. Видно, что на низких энергиях в спектре источника доминирует излучение аккреционного диска, на высоких — излучение “погранслоя”. Сумма этих двух компонент неплохо описывает спектр рентгеновского излучения системы в спокойном состоянии.

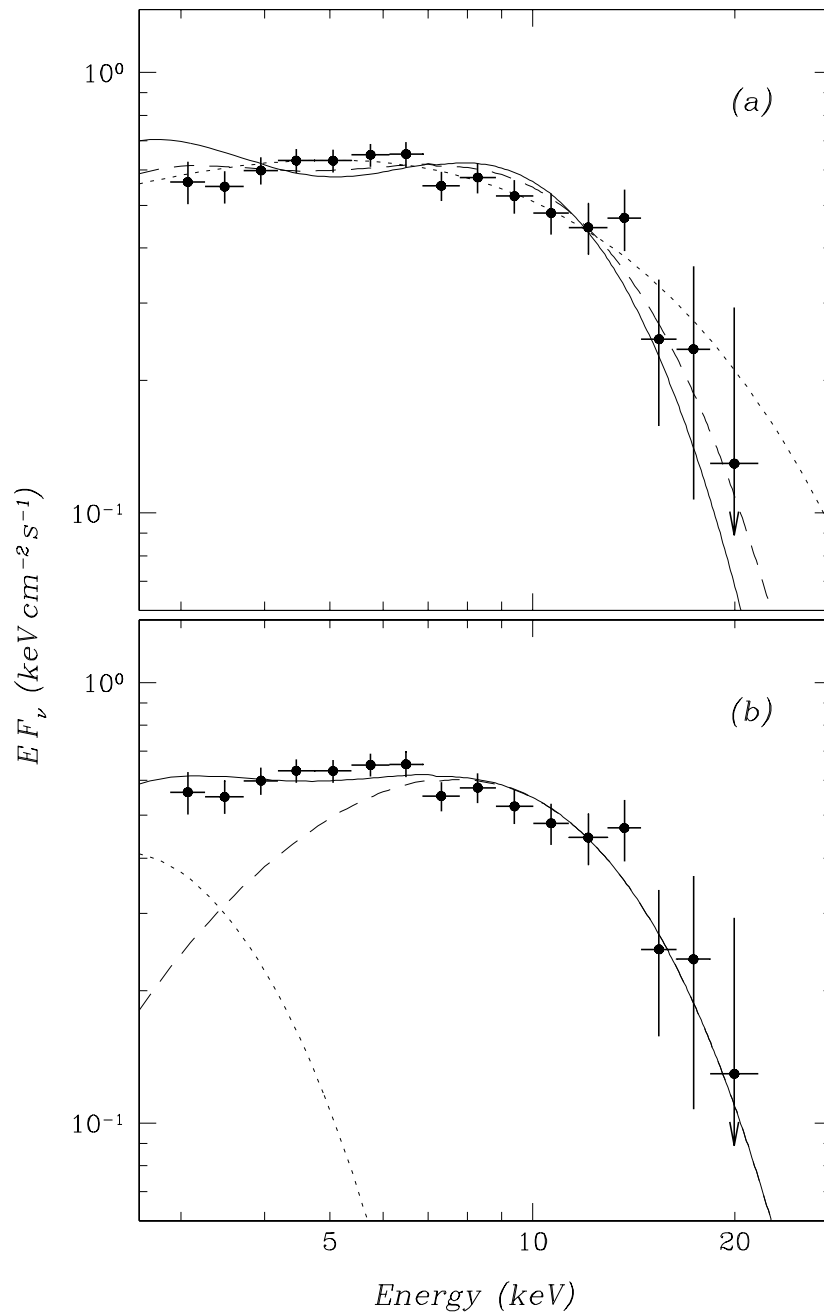


Рис. 4.4. Аппроксимация моделью BDLE спектра постоянного излучения источника KS 1731-260, измеренного 7 октября 1990 г. (сеанс 5). Сплошная и штриховая линия на рисунке (a) получены в предположении о двух видах спектра излучения “погранслоя”: виновском и экспоненциальной атмосферы, пунктирной линией показан спектр тормозного излучения оптически тонкой тепловой плазмы. Сплошная, штриховая и пунктирные линии на рисунке (b) соответствуют полному спектру излучения в варианте модели BDLE с экспоненциальной атмосферой и спектрам излучения “погранслоя” и аккреционного диска по отдельности.

Табл. 4.3. Параметры наилучшей аппроксимации спектров излучения источника KS 1731-260 моделью BDLE^a

Номер сеанса	$kT_b, \text{б}$ кэВ	$kT_d, \text{б}$ кэВ	$\mu^{\text{в}}$	$\dot{M}^{\text{г}}$	$L_t, \text{д}$	$L_X/L_t, \text{е}$ %	$\chi_N^2, \text{ж}$
1	2.07 ± 0.03	1.46 ± 0.01	0.87 ± 0.01	6.33	5.99	28.9	1.7
2	1.82 ± 0.07	1.35 ± 0.03	0.84 ± 0.04	4.69	4.43	28.2	1.7
4	2.15 ± 0.28	1.44 ± 0.05	0.89 ± 0.05	6.07	5.74	27.5	0.4
5	2.04 ± 0.07	1.26 ± 0.02	0.84 ± 0.03	3.47	3.28	27.2	1.2
1	2.73 ± 0.06	1.41 ± 0.01	0.71 ± 0.03	5.54	5.24	32.8	1.0
2	2.33 ± 0.11	1.30 ± 0.02	0.58 ± 0.13	4.00	3.78	32.7	1.4
4	2.93 ± 0.52	1.41 ± 0.06	0.79 ± 0.13	5.46	5.17	30.6	0.4
5	2.79 ± 0.13	1.21 ± 0.02	0.66 ± 0.08	2.99	2.83	31.7	0.8

^a при заданных расстоянии $d = 7$ кпк, массе $M_* = 1.4M_\odot$ и радиусе $R_* = R_0$ нейтронной звезды и в предположении двух разных законов излучения пограничья: виновского (верхняя часть таблицы) или излучения экспоненциальной атмосферы (нижняя часть)

^б температура плазмы во внешних областях “пограничья” kT_b и внутренних областях диска kT_d

^в косинус наклона диска к лучу зрения

^г темп аккреции ($10^{-9} M_\odot \text{ год}^{-1}$)

^д болометрическая $L_t = L_b + L_d$ светимость (10^{37} эрг с^{-1})

^е соотношение рентгеновской L_X (3-20 кэВ) и болометрической L_t светимостей

^ж значение χ^2 , нормированное на число степеней свободы $N = 16$

4.4 Рентгеновские всплески

В ходе обсуждаемых наблюдений в поле зрения телескопа АРТ-II были зарегистрированы два всплеска рентгеновского излучения. Первый всплеск наблюдался 7 октября 1990 г. во время сеанса 5 (максимум потока пришелся на $14^{\text{h}}48^{\text{m}}29^{\text{s}}$ UT), второй — 6 октября 1991 г. во время сеанса 7 (максимум потока пришелся на $12^{\text{h}}59^{\text{m}}10^{\text{s}}$ UT). Источник KS 1731-260 был единственным известным барстером в поле зрения телескопа и в силу этого — вероятным источником всплесков. Всплеск, наблюдавшийся 7 октября 1990 г., удалось отождествить с KS 1731-260 с более высокой степенью достоверности.

Для отождествления использовались рентгеновские изображения неба в поле зрения, полученные в течение ~ 13 с непосредственно перед началом всплеска (рис. 4.5a) и ~ 13 с во время всплеска (рис. 4.5b). На первом изображении достоверных источников (уровень отношения сигнала к шуму для которых превысил бы $S/N = 4.5$) не оказалось. На втором изображении был зарегистрирован один достоверный (с $S/N \simeq 9.5$) источник — KS 1731-260. При аналогичном анализе для всплеска, наблюдавшегося 6 октября 1991 г., KS 1731-260 также был единственным источником на втором изображении, но достоверность его регистрации была невысокой ($S/N \simeq 4.0$).

Временные истории всплесков (скорости счета всего детектора, записанные с разрешением 1 с в трех разных диапазонах энергии) представлены на рис. 4.6. Обрыв кривой блеска первого всплеска произошел из-за заполнения буфера памяти телескопа и включения режима передачи данных в бортовую память об-

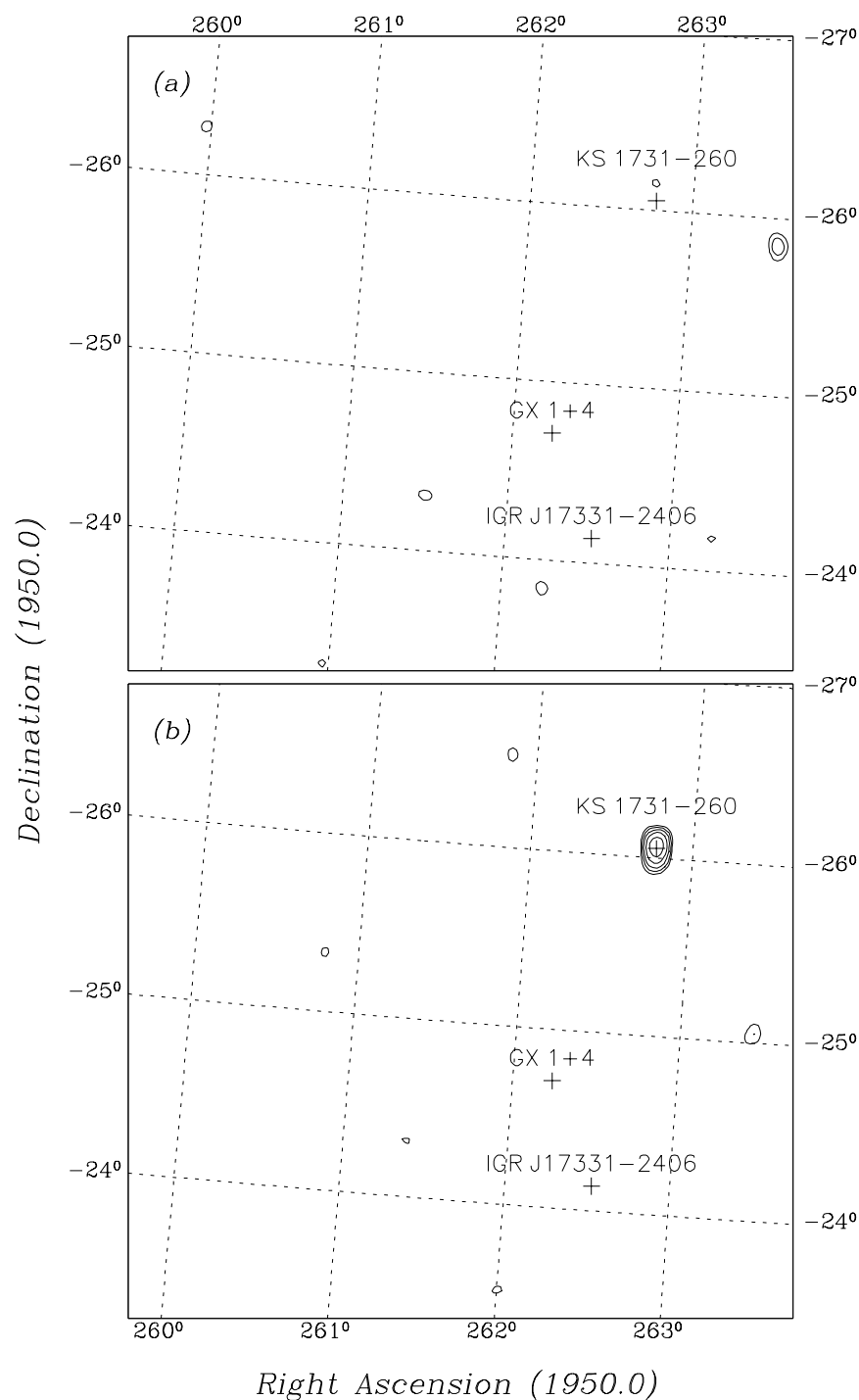


Рис. 4.5. Изображения участков неба в поле зрения телескопа АРТ-П, полученные во время сеанса 5 (7 октября 1990 г.) непосредственно перед рентгеновским всплеском (а) и во время всплеска (б). Контурные линии показывают область достоверной регистрации источника в диапазоне энергий 3-20 кэВ и даны на уровне отношения сигнала к шуму 3, 3.9, 5.1, 6.6, 8.6 (используется логарифмическая шкала). В обоих случаях экспозиция равна 13 с.

серватории. Как следует из этого рисунка, интервал между началом всплесков и достижением максимума блеска занял 3–4 с, последующий период постепенного падения потока — 5–10 с (в зависимости от диапазона); экспоненциальное время спада было равно ~ 4.5 с для первого и ~ 4.6 с для второго всплеска. Таким образом полная длительность всплесков составила ~ 15 с в диапазоне энергий 3–20 кэВ.

Во время всплесков жесткое излучение затухало быстрее мягкого, т.е. спектр излучения постепенно смягчался. Согласно Хоффману и др. ([125]), этот факт указывает на принадлежность данных событий к рентгеновским всплескам первого рода, инициированным термоядерным взрывом вещества, выпавшего на поверхность нейтронной звезды при аккреции. Отметим достаточно сложную форму второго всплеска с указанием на двухпиковую структуру. Низкая относительная амплитуда этого всплеска в диапазоне 3–10 кэВ связана с уже упоминавшейся пониженной чувствительностью к мягким фотонам использовавшегося 3 модуля телескопа.

Спектр излучения, измеренный во время всплеска 7 октября 1990 г., показан на рис. 4.7 (после вычитания постоянного излучения источника). Аппроксимация спектра моделью излучения черного тела (сплошная линия на рисунке) привела к следующим значениям чернотельной температуры $kT_{bb} \simeq 2.16 \pm 0.11$ кэВ и болометрической светимости $L_{bb} = (1.05 \pm 0.06) \times 10^{38}$ эрг с^{-1} (в предположении расстояния $d = 7$ кпк). Соответствующее значение радиуса черного тела $R_{bb} \simeq 6.1 \pm 0.7$ км. Как и ранее мы полагали, что исходный спектр излучения искажен из-за фотопоглощения в среде с поверхностной плотностью водорода $N_H \simeq 1.1 \times 10^{22}$ см^{-2} . Модель черного тела удовлетворительно описывает данные наблюдений — величина χ^2 , нормированная на число степеней свободы $N = 7$, равна 0.65. Полученное значение радиуса черного тела, в 2 раза меньше радиуса предельной устойчивой орбиты $R_0 = 12.6$ км для нейтронной звезды с массой $M = 1.4M_\odot$, показывает, однако, что в формировании спектра излучения заметную роль играла комптонизация. Комптонизация, как известно (см., например, [52]), приводит скорее к виновской форме спектра, чем к чернотельной. Аппроксимация спектра виновским законом по формуле

$$F_W \simeq \left(\frac{L_W}{\sigma_B T_W^4 d^2} \right) \frac{h\nu^3}{2c^2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_W}\right),$$

([27]) дала следующие параметры: $kT_W \simeq 2.09 \pm 0.10$ кэВ, болометрическая светимость $L_W = (1.09 \pm 0.06) \times 10^{38}$ эрг с^{-1} ($\chi_N^2 \simeq 0.58$). Результат аппроксимации показан на рис. 4.7 штриховой линией.

Максимальная светимость в диапазоне 3–20 кэВ, определенная по интервалу длительностью 3 с вблизи пика всплеска, достигала $L_p = (2.06 \pm 0.49) \times 10^{38}$ эрг с^{-1} (поток фотонов достигал 1.45 ± 0.34 Краб). Это значение точно соответствует критической эддингтоновской светимости для нейтронной звезды с массой $1.4 M_\odot$, при условии нормального обилия элементов в ее атмосфере (т.е. если она содержит в основном водород). То, что во время всплеска внешняя атмосфера звезды была радиационно-доминированной и разреженной (прямые следствия эддингтоновской светимости), вытекает и из сделанного выше вывода о заметной роли комптонизации в формировании наблюдаемого спектра излучения.

В основании атмосферы, где происходит термоядерный взрыв, состав вещества может отличаться от нормального за счет обогащения гелием в процессе медленного горения водорода. Косвенное ограничение на содержания здесь гелия можно получить из отсутствия во время этого достаточно долгого ($T \sim$

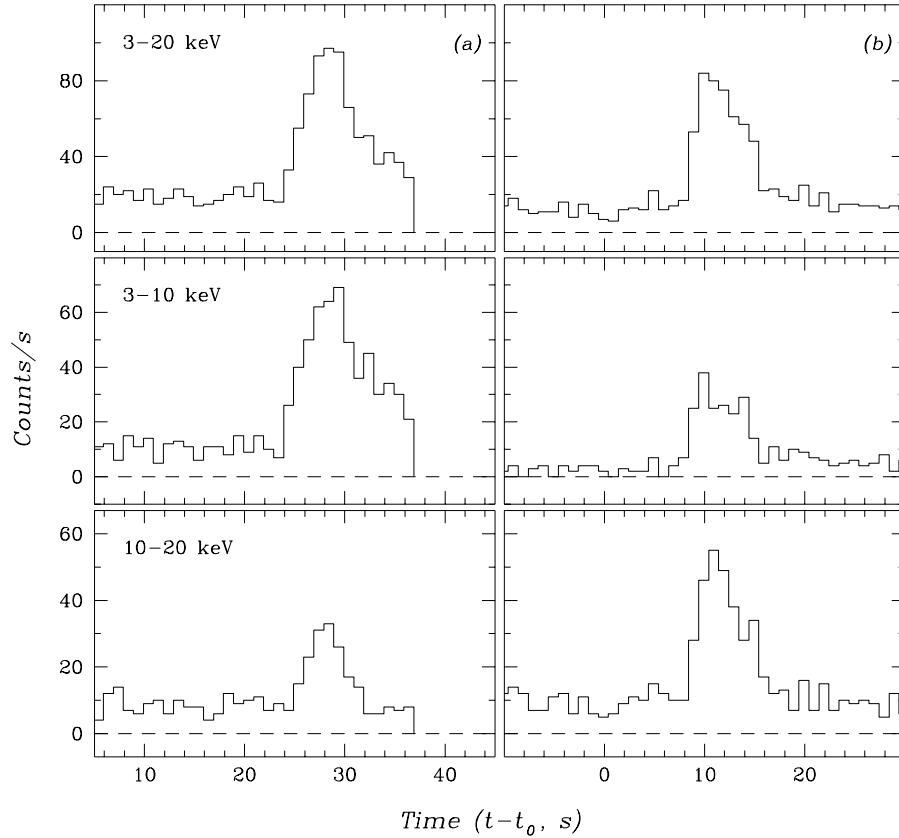


Рис. 4.6. Скорости счета фотонов в трех диапазонах энергий, записанные телескопом АРТ-II 7 октября 1990 г. (колонка *a*) и 6 октября 1991 г. (колонка *b*) в периоды регистрации рентгеновских всплесков от источника KS 1731-260. Время по оси *Y* отсчитывается от момента $t_0 = 14^h 48^m$ UT для первого всплеска и $t_0 = 12^h 59^m$ UT для второго всплеска, разрешение равно 1 с.

42300 с) сеанса наблюдения других рентгеновских всплесков. В самом деле, энергия, выделившаяся во время всплеска, равна $E_b = \tau L_W \simeq 1.4 \times 10^{39}$ эрг, где $\tau \simeq 13$ с — длительность всплеска. Гравитационная энергия, выделившаяся в период между всплеском и концом сеанса¹, $E_a = \Delta T L_X \simeq 2.8 \times 10^{41}$ эрг. Величина $\alpha = E_a/E_b \simeq 200$ дает оценку снизу на отношение гравитационной энергии, выделяющийся при падении 1 г вещества на поверхность нейтронной звезды, к энергии, выделяющейся при его термоядерном сгорании. Известно (например, [68]), что для всплесков в атмосфере из чистого гелия $\alpha \sim 100$, а в атмосфере с нормальным содержанием элементов $\alpha \sim 1000$. Даже принимая во внимание неопределенность, связанную с тем, что эффективность гравитационного энерговыделения зависит от радиуса нейтронной звезды, очевидно, что в случае KS 1731-260 содержание водорода в области взрыва было заметным.

¹Нас интересует максимальное время спокойного излучения источника. Используемый послевсплесковый период $\Delta T = 30930$ с по длительности больше периода, предшествовавшего всплеску.

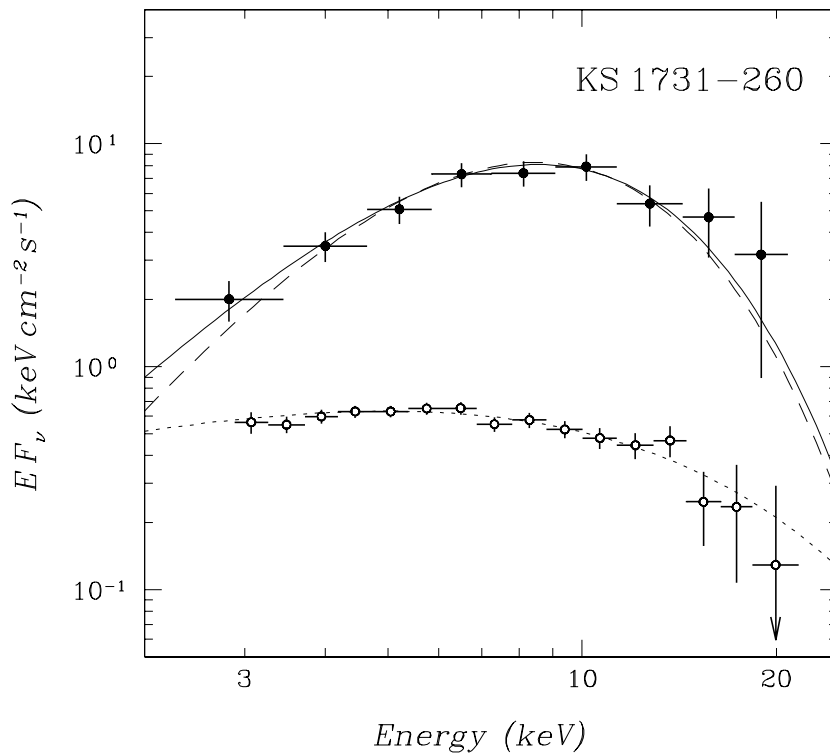


Рис. 4.7. Спектр рентгеновского всплеска, зарегистрированного телескопом АРТ-П от источника KS 1731-260 7 октября 1990 г. (заштрихованные кружки). Экспозиция равна 13 с. Постоянное излучение источника вычтено (его спектр, усредненный по данному сеансу наблюдений, приведен незаштрихованными кружками для сравнения). Сплошная и штриховая кривые показывают результат наилучшей аппроксимации спектра чернотельным и виновским законами излучения. Параметры аппроксимации приведены в тексте.

4.5 Обсуждение

Наблюдения источника KS 1731-260 были выполнены телескопом АРТ-П на начальном этапе 12-летнего периода его активности, в то время, когда исследования другими рентгеновскими обсерваториями не проводились. Результаты, представленные в данной работе, свидетельствуют о том, что в это время поток излучения KS 1731-260 систематически падал, формируя отдельную начальную "минивспышку" источника, длительностью ~ 2.5 года. Реанализ более поздних наблюдений KS 1731-260 телескопом ТТМ обсерватории "Рентген", проведенный в свете этого результата, позволяет предположить, что до достижения максимума рентгеновского блеска в 1996-1997 гг. источник испытал еще одну "минивспышку" излучения примерно той же длительности. Такое поведение необходимо учитывать при объяснении активности долгоживущих рентгеновских транзиентов, в настоящее время по сути отсутствующем. Отметим, что вспышки некоторых рентгеновских новых (транзиентов, содержащих черную дыру) также продолжаются 0.5–2 года, а в отдельных случаях (GX 339-4, 4U 1630-47) имеют и близкий период рекуррентности — 1.5–4 года.

Падение потока излучения источника, зарегистрированное телескопом АРТ-П, сопровождалось увеличением жесткости его спектра (табл. 4.3). Любо-

пытно, что оба рентгеновских всплеска были зарегистрированы от KS 1731-260 именно в последних сеансах наблюдений, когда поток постоянного излучения был на 40 – 60% ниже потока в остальных сеансах. Подобная антикорреляция всплесковой активности и потока излучения наблюдалась ранее у некоторых других барстеров ([68]). С другой стороны, время рекуррентности всплесков оказалось неожиданно большим $\Delta T \gtrsim 8.6$ часов (30930 с). При наблюдении источника спутником RXTE вспышки происходили заметно чаще, с характерным временем рекуррентности ~ 4 часа ([84]), а при наблюдениях его обсерваторией "Рентген" два всплеска были зарегистрированы с интервалом ~ 1.5 часа ([105]). Вероятно, средний темп аккреции в системе во время этих наблюдений был все же выше, а поэтому критическая масса аккрецируемого вещества, необходимая для взрыва, успевала накопиться быстрее, чем во время наблюдений телескопом АРТ-П. При бóльшем темпе аккреции могла более высокой быть и эффективность обогащения аккрецируемого вещества гелием в процессе квазистационарного горения водорода в нижних слоях атмосферы нейтронной звезды. Как показано в данной работе, всплеск, зарегистрированный телескопом АРТ-П 7 октября 1990 г. произошел в среде с заметным содержанием водорода.

Форма спектра непрерывного излучения KS 1731-260 была типичной для маломассивных систем с высоким ($L_X \gtrsim 0.1L_{ed}$) уровнем светимости и нейтронной звездой со слабым магнитным полем в качестве компактного объекта. Для аппроксимации спектра мы впервые применили спектральную модель BDLE, предложенную для подобных систем Гребеневым и др. ([30]). Модель достаточно хорошо описывала наблюдаемые спектры источника в предположении, что излучение "погранслоя" формировалось в экспоненциальной атмосфере умеренной оптической толщи по томсоновскому рассеянию, в условиях, когда комптонизация не успевала сформировать виновский спектр излучения, а лишь модифицировала тепловой спектр плазмы за счет удлинения траекторий фотонов при рассеяниях. Модель позволила оценить наклонение аккреционного диска и болометрическую светимость (темп аккреции) в системе.

Глава 5

GX 354-0 (4U 1728-34)

В данной главе представлены результаты анализа постоянного излучения и излучения во время всплеска рентгеновской маломассивной двойной системы GX 354-0 (4U 1728-334) по данным наблюдений рентгеновского телескопа АРТ-П орбитальной обсерватории ГРАНАТ в 1990-1991 гг. и рентгеновских телескопов JEM-X и IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ в 2003-2004 гг.

По данным телескопа JEM-X обсерватории ИНТЕГРАЛ показано существование в излучении GX 354-0 двух фракций всплесков различной жесткости. В результате исследования широкополосного спектра постоянного излучения источника по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ обнаружена спектральная переменность его излучения. Обнаружена корреляция жесткости всплесков и спектрального состояния источника.

По данным телескопа АРТ-П/ГРАНАТ в излучении GX 354-0 обнаружено два рентгеновских всплеска I-го рода. Вычисления показывают, что период рекуррентности всплесков рентгеновского излучения от источника равен $\tau_R \simeq 4$ часов.

5.1 Введение

GX 354-0 это хорошо известный постоянный рентгеновский источник, открытый орбитальной обсерваторией Ухуру в процессе наблюдений области центра Галактики ([117]). В четвертом каталоге Ухуру он фигурирует под номером 1728-334. Всплески в потоке рентгеновского излучения от него были впервые зарегистрированы орбитальной обсерваторией САС-3 в 1976 г. ([123]). Пологая, что светимость в максимуме всплеска близка к эддингтоновскому пределу для звезды с богатой водородом оболочкой, Ван Парадис оценил расстояние до этой системы $D \sim 4$ кПк ([15]). В данной работе мы используем значение $D=4.5$ кПк ([136]). Позже исследования этого источника были продолжены на основе данных, полученных орбитальными обсерваториями НЕАО-I ([126]), СИГМА ([50]), *RXTE* ([113]). В соответствии с этим анализом GX 354-0 можно назвать одним из самых стабильных среди известных рентгеновских “барстеров”. Его период рекуррентности практически всегда лежит в пределах от 3 до 8 часов. Однако, временами этот источник переходит в режим низкой всплесковой активности и может “спать” несколько десятков часов. Хоффман в 1980 г. сообщил о подобном периоде длительностью в 56 часов (Хоффман и др. 1980).

В работе Человекова и др. ([129]) в процессе исследования жестких рентгеновских всплесков, зарегистрированных в 2003-2004 гг. детектором ISGRI телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ, была обнаружена интересная особенность всплесков от GX 354-0: их количество составило 65% от всех отожде-

Табл. 5.1. Наблюдения рентгеновского барстера GX 354-0 телескопом АРТ-П обсерватории ГРАНАТ.

Номер сеанса	Дата начала сеанса (UT)	Длительность сеанса (с)	Экспозиция (с)	3σ предел ^a (мКраб)
183	1990г. сентябрь 7.51	17146	15452	1.73
427	1991г. октябрь 1.47	14844	13462	15.21

^a значения верхнего предела на поток от Быстрого Барстера на уровне значимости 3σ

ствленных всплесков в диапазоне энергии (15-25 кэВ). В данной работе приведен подробный анализ этого феномена, показано существование двух фракций всплесков, отличающихся жесткостью, проведена корреляция этих фракций со спектром и потоком постоянного излучения источника. Также в данной главе представлен временной и спектральный анализ данных наблюдений барстера GX 354-0 телескопом АРТ-П/ГРАНАТ в 1990-1991 гг.

5.2 Наблюдения

Барстер GX 354-0 многократно попадал в поле зрения телескопов JEM-X (~ 400 наблюдений; суммарная экспозиция ~ 0.5 Мсек) и ISGRI (более 2390 наблюдений; суммарная экспозиция ~ 6.3 Мсек) обсерватории ИНТЕГРАЛ в 2003-2004 гг. Различие экспозиций для этих телескопов обусловлено различием полей зрения (см. выше). Для поиска рентгеновских всплесков в излучении GX 354-0 по данным монитора JEM-X были построены детекторные кривые блеска для каждого из наблюдений, в ходе которых источник попадал в поле зрения телескопа. Для идентификации источника всплеска, мы строили изображения в поле зрения телескопа за равные промежутки времени: в момент всплеска и за несколько секунд до него (рис. 5.5). Сравнение статистической значимости детектирования различных источников на этих парах изображений позволяет утверждать, что все вышеупомянутые всплески действительно произошли в системе GX 354-0. Эта методика полностью аналогична использованной в работе Человекова и др. ([129]) для поиска и идентификации всплесков по данным телескопа IBSI/ISGRI.

В ходе обзора области Галактического центра орбитальной обсерваторией ГРАНАТ рентгеновская маломассивная двойная система GX 354-0 два раза оказывалась в поле зрения телескопа АРТ-П: 7-го сентября 1990 г. (более 4.3 часа полезного времени наблюдения) и 1-го октября 1991 г. (более 3.7 часа полезного времени наблюдений). На рис.5.2 приведены временные истории источника в интервале энергий 3 – 20 кэВ и 6 – 20 кэВ во время первого (сверху) и второго (снизу) сеансов наблюдений соответственно. Каждая точка на графике соответствует усредненной за интервал длительностью в двадцать секунд скорости счета фотонов от источника телескопом АРТ-П. Зависимость построена с учетом эффективности наблюдения GX 354-0 прибором (из-за коллиматора и качания спутника эффективность меняется в зависимости от положения источника вну-

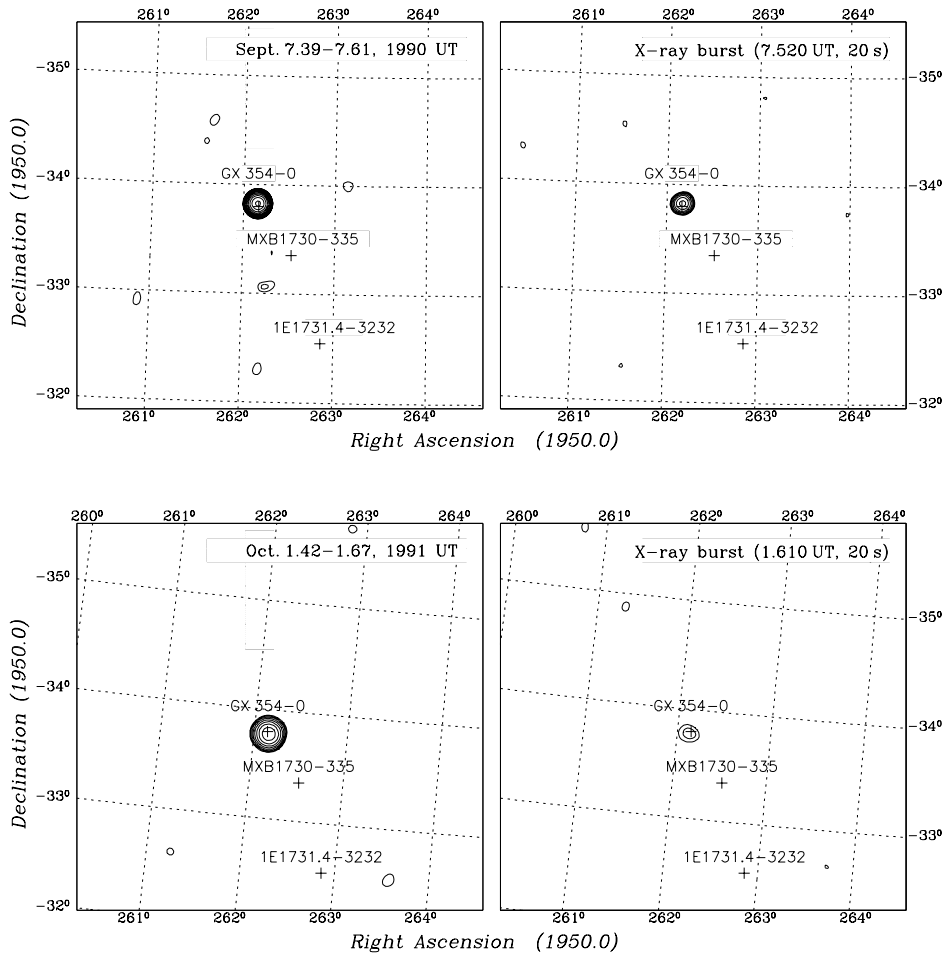


Рис. 5.1. Изображение области неба в поле зрения телескопа АРТ-П, построенное с экспозицией в 20 сек. до рентгеновского всплеска (слева) и во время последнего (справа) для всплесков 7 сентября 1990 г. (сверху) и 1 октября 1991 г. (снизу).

три поля зрения и момента наблюдения) и с вычетом фона. Время отсчитывается с момента начала сеанса наблюдений. Из рис. 5.2 видно, что во время каждого из сеансов наблюдался мощный всплеск рентгеновского излучения.

Длительность первого из них составила ~ 20 сек, второго ~ 15 сек. В поле зрения телескопа АРТ-П в этот день также находились так называемый “Быстрый барстер” (4U 1730-335) и другой рентгеновский источник - 1E 1731.4-3232. Любой из этих трех источников мог быть ответственным за всплеск в регистрируемом потоке рентгеновского излучения. Тем не менее, нам удалось достоверно установить, что вспышка произошла именно в источнике GX 354-0. Для этого по данным телескопа АРТ-П было построено изображение наблюдавшегося участка неба для трех последовательных интервалов времени длительностью 20 сек. каждый: один интервал был взят непосредственно перед всплеском, один - содержал всплеск и один - сразу после всплеска. Оказалось, что статистическая значимость детектирования GX 354-0 во время всплеска приблизительно в 1.5 раза для первого и в 1.3 раза для второго сеанса превышает его статистическую значимость в двух других случаях (соответственно, 17.1σ во время всплеска, 12.4σ и 9.9σ - до и после всплеска для первого сеанса и 4.3σ , 3.5σ и 2.9σ для второго).

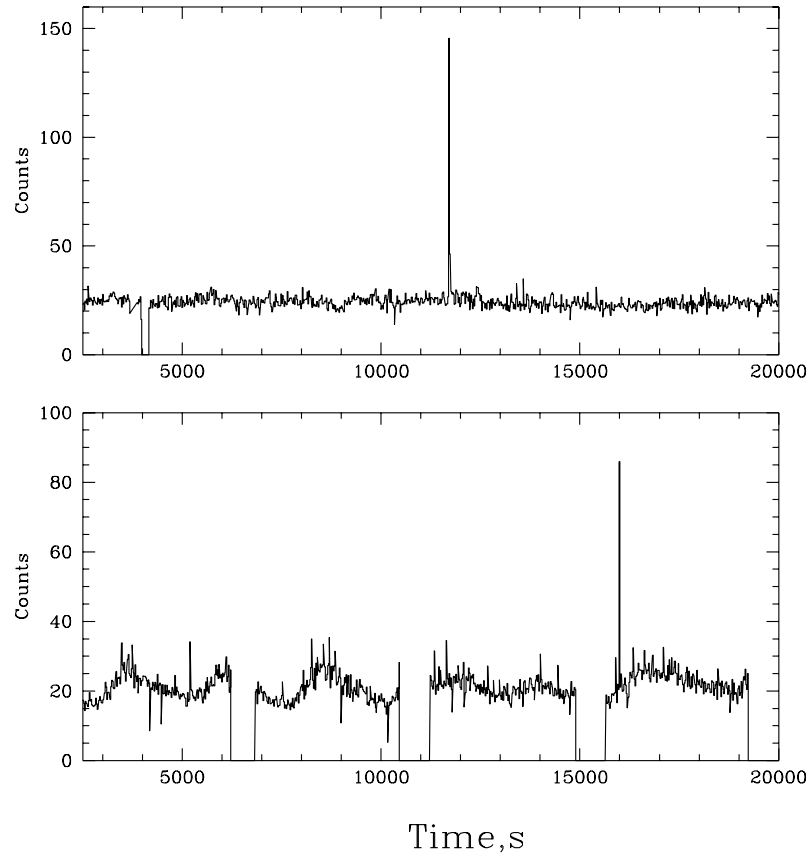


Рис. 5.2. Временные истории наблюдений рентгеновского барстера GX 354-0 по данным телескопа АРТ-П/ГРАНАТ во время сеансов 7 сентября 1990 г. (сверху) и 1 октября 1991 г. (снизу).

Поток энергии излучения от источников 4U 1730-335 и 1E 1731.4-3232 оказался за пределами чувствительности прибора (по данным как всего первого так и всего второго сеансов). Значения верхнего предела на поток от Быстрого Барстера на уровне значимости 3σ приведены в табл. 5.1

На рис. 5.1 слева приведены изображения, накопленные за весь сеанс, а справа - изображения, наблюдавшиеся во время всплесков 7 сентября 1990 г. и 1 октября 1991 г. соответственно. Более подробно данные, относящиеся к первому из этих всплесков, рассмотрены ниже.

5.3 Рентгеновские всплески

Из рис. 5.2 видно, что 7 сентября 1990 г. и 1 октября 1991 г. телескопом АРТ-П были зарегистрированы мощные всплески рентгеновского излучения. Выше мы показали, что эти события связаны именно с источником GX 354-0. Детальные временные истории всплесков в четырех различных энергетических диапазонах представлены на рис. 5.4. Интегрирование проводилось с шагом 1 с. Всплески произошли через $T_1 = 3.25$ часа после начала наблюдения в первом и $T_2 = 4.43$ часа во втором сеансах и длились в обоих случаях на протяжении $\sim 15 - 20$ сек. От момента первого увеличения скорости счета до максимума блеска во время всплеска проходило ~ 2 с, затем в течение $5 - 15$ с. (в зависимости от энергетического диапазона) происходил спад интенсивности излучения до нормального уровня. Хотя максимум интенсивности в жестком диапазоне был достигнут поз-

Табл. 5.2. Список рентгеновских всплесков, зарегистрированных в 2003-2004 гг. телескопом JEM-X обсерватории ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 3-20 кэВ.

#	Максимум всплеска, (UTC)	Длит. всплеска, (с)	Макс. ^a поток, (Краб)	Значимость ^b детект., (σ)	Жесткость ^c всплеска
2003					
1	28 FebT07:55:06	16	3.9 ²	10.7	1.1
2	01 MarT00:04:48	24	3.0 ¹	12.1	1.0
3	02 MarT07:42:22	24	3.8 ¹	13.5	0.9
4	21 MarT06:09:49	10	2.0 ¹	10.2	0.7
5	21 MarT15:46:39	9	2.7 ¹	11.9	0.8
6	21 MarT19:03:40	11	2.1 ²	10.8	0.7
7	06 AprT19:45:28	18	2.8 ¹	13.1	0.7
8	12 AprT07:12:22	9	1.3 ³	12.6	0.8
9	14 AprT09:05:17	11	1.7 ²	13.9	0.6
10	14 AprT20:13:49	14	1.5 ²	13.0	0.7
11	15 AprT00:30:23	8	1.5 ⁵	15.7	0.7
12	21 AprT09:31:44	10	1.0 ⁵	14.5	0.6
13	19 AugT22:57:36	16	1.4 ²	13.1	0.7
14	23 AugT16:14:02	16	2.2 ¹	11.4	0.7
15	25 AugT10:49:43	12	1.0 ³	13.4	0.5
16	25 AugT18:24:08	9	2.4 ¹	11.9	0.7
17	28 AugT01:24:03	13	3.5 ²	15.0	0.9
18	28 AugT06:01:30	9	2.4 ²	12.5	0.8
19	31 AugT15:54:17	11	3.2 ¹	10.5	0.6
20	31 AugT20:00:11	9	1.8 ²	10.8	0.6
21	31 AugT23:48:22	18	1.6 ³	12.4	0.6
22	03 SepT03:26:36	13	2.2 ²	12.3	1.0
23	03 SepT08:39:31	12	2.7 ²	13.1	0.7
24	08 SepT19:41:20	13	3.4 ¹	10.8	1.1
25	09 SepT22:22:24	11	3.2 ²	14.8	0.8
26	11 SepT21:59:51	12	2.4 ²	12.8	1.1
27	12 SepT03:12:27	13	3.3 ¹	10.2	1.0
28	12 SepT09:22:43	13	2.2 ¹	11.6	0.9
29	14 SepT03:47:56	9	1.9 ²	11.8	1.0
30	14 SepT15:02:24	11	3.2 ¹	10.4	0.8
31	18 SepT03:42:58	11	2.2 ²	12.6	0.9
32	19 SepT16:12:11	11	2.3 ²	13.0	0.9
33	24 SepT11:01:27	9	2.1 ⁵	11.8	1.3

^a - поток энергии в максимуме всплеска (индексом указана длительность интервала интегрирования при определении этой величины)

^b - значимость детектирования источника на изображении во время всплеска

^c - жесткость всплеска

Табл. 5.2 (продолжение)

#	Максимум всплеска, (UTC)	Длит. всплеска, (с)	Макс. ^a поток, (Краб)	Значимость ^b детект., (σ)	Жесткость ^c всплеска
2004					
34	17 FebT 18:09:20	20	2.7 ¹	13.9	1.1
35	19 FebT 21:06:44	13	3.9 ¹	11.0	1.1
36	27 FebT 10:55:14	6	3.4 ³	11.5	0.9
37	27 FebT 13:32:35	10	2.4 ⁵	14.0	1.3
38	27 FebT 15:32:03	10	3.3 ¹	8.8	1.0
39	28 FebT 13:46:43	15	3.0 ¹	10.7	0.9
40	01 MarT 08:01:46	11	2.5 ²	10.8	1.3
41	02 MarT 11:10:41	14	1.7 ¹	9.9	0.7
42	02 MarT 22:01:29	11	1.2 ²	11.3	0.9
43	03 MarT 08:58:15	7	3.1 ¹	10.8	0.9
44	03 MarT 15:13:20	8	1.4 ²	11.8	0.9
45	04 MarT 02:00:39	13	2.6 ¹	12.3	0.9
46	08 MarT 04:14:46	14	2.5 ¹	11.2	1.0
47	09 MarT 01:00:21	9	1.9 ²	11.8	0.9
48	12 MarT 22:15:45	10	1.9 ²	12.4	1.0
49	13 MarT 01:09:53	9	2.2 ³	14.2	1.1
50	15 MarT 22:50:49	11	2.5 ¹	12.7	0.9
51	01 AprT 03:42:06	8	2.1 ⁵	14.0	1.3
52	19 AprT 19:18:57	8	2.7 ⁵	12.4	1.2
53	01 SepT 15:25:01	6	1.9 ⁵	12.6	0.8

^a - поток энергии в максимуме всплеска (индексом указана длительность интервала интегрирования при определении этой величины)

^b - значимость детектирования источника на изображении во время всплеска

^c - жесткость всплеска

же, чем в мягком, в целом жесткое излучение затухало быстрее, т.е. спектр излучения постепенно смягчался. Согласно Хоффману и др. ([125]), этот факт указывает на принадлежность обоих всплесков к классу рентгеновских всплесков I рода. Это означает, что вспышки, почти наверняка, произошли в результате взрывного сгорания аккрецированного вещества (например гелия) на поверхности нейтронной звезды. Нам удалось построить усредненный спектр первого всплеска. Из-за его малой длительности и низкой яркости источника спектр содержит только пять рабочих точек в диапазоне 4 – 20 кэВ. Для описания спектра была использована модель излучения чернотельной сферы, причем значение межзвездного поглощения было зафиксировано на уровне $N_H = 5.0 \times 10^{-22}$ атомов см⁻². В предположении, что расстояние до источника равно 4.5 кпк, и что излучает он сферически симметрично, мы получили для радиуса черного тела (компактного объекта) значение 1.9 км., а для температуры поверхности — значение 3.0 кэВ.

Низкое значение радиуса само по себе не заставляет отказаться от использования модели излучения чернотельной сферы, однако, если учесть, что значение χ^2 весьма велико, можно предположить, что при прохождении, скажем, через корону аккреционного диска, с излучением происходит процесс, ответственный за сдвиг спектра в область высоких энергий, что может являться причиной, недо-

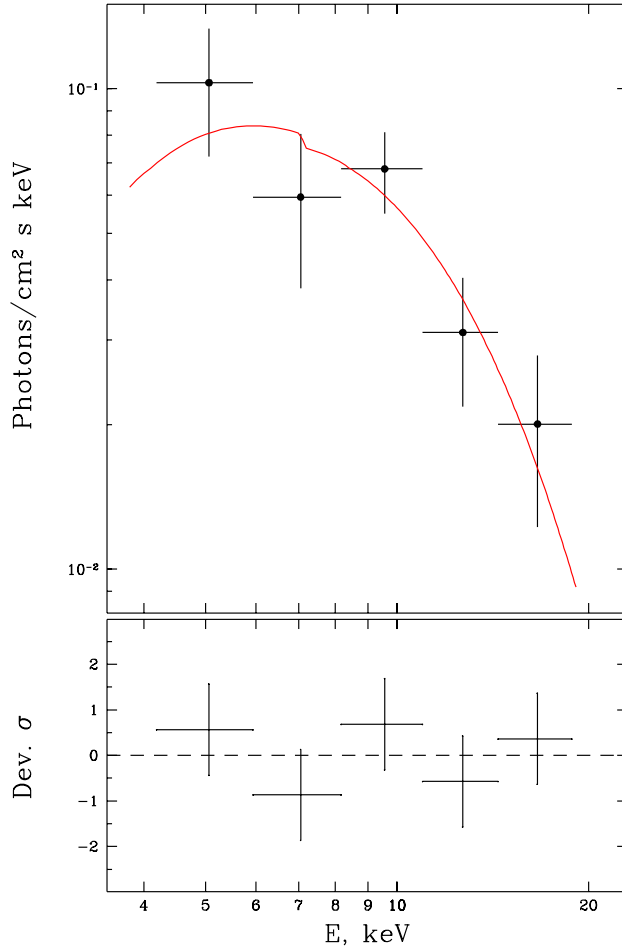


Рис. 5.3. Спектр излучения рентгеновского барстера GX 354-0, построенный по данным телескопа АРТ-П/ГРАНАТ, во время всплеска 7 сентября 1990 г.

оценки радиуса излучающей области. Поэтому для лучшей аппроксимации к модели излучения чернотельной сферы можно добавить, скажем, модель комптонизации холодных фотонов на горячих электронах. По данным телескопа АРТ-П не удастся построить спектры излучения с шагом по энергии в ~ 1 кэВ, что необходимо для аппроксимации спектра суперпозицией нескольких моделей.

Исходя из приведенных выше данных, попытаемся оценить частоту появления всплесков в потоке излучения от источника GX 354-0. Предположим, что между всплесками излучается гравитационная энергия аккрецируемого нейтронной звездой вещества, а во время всплеска - ядерная энергия сгорания гелия ([136]). Тогда, учитывая, что отношение гравитационной энергии вещества на поверхности нейтронной звезды к энергии, выделяемой при термоядерном горении гелия $\nu \sim 100$, из соотношения светимостей в спокойном состоянии L_p и во время всплеска L_B получим, что вспышки должны происходить приблизительно раз в $\tau_R \approx \nu \tau_B L_B / L_p$ с, где $\tau_B \sim 15$ с - длительность всплеска. Подставляя соответствующие значения для первого и второго всплесков получаем $\tau_{R_1} \simeq 14830$ с $\tau_{R_2} \simeq 14940$ с. Учитывая, что длительность наблюдений - $T \sim \tau_R$ для обоих сеансов, нетрудно объяснить факт наблюдения в каждом из них только одного всплеска. Отметим, что по данным наблюдений, полученных обсерваторией САС-3, Хоффман и др. ([123]) оценили интервал рекуррентности всплесков от этого источника в 3 – 8 часов.

В ходе наблюдений области неба, содержащей барстер GX 354-0, телеско-

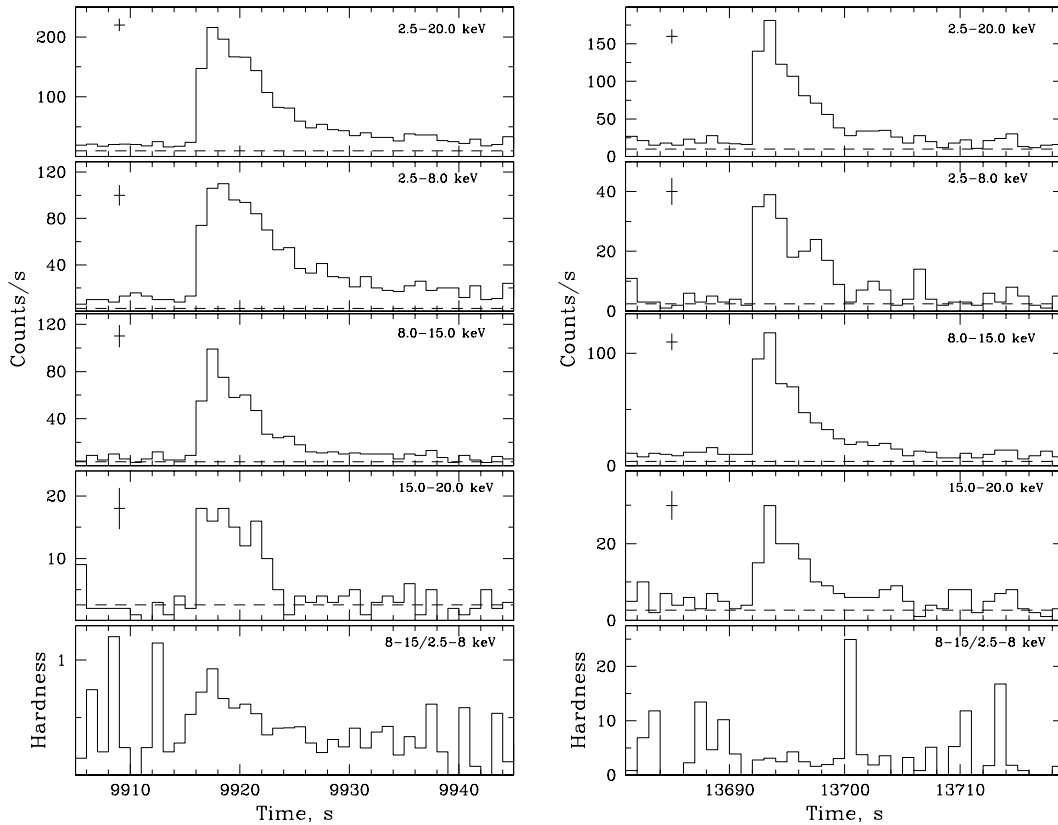


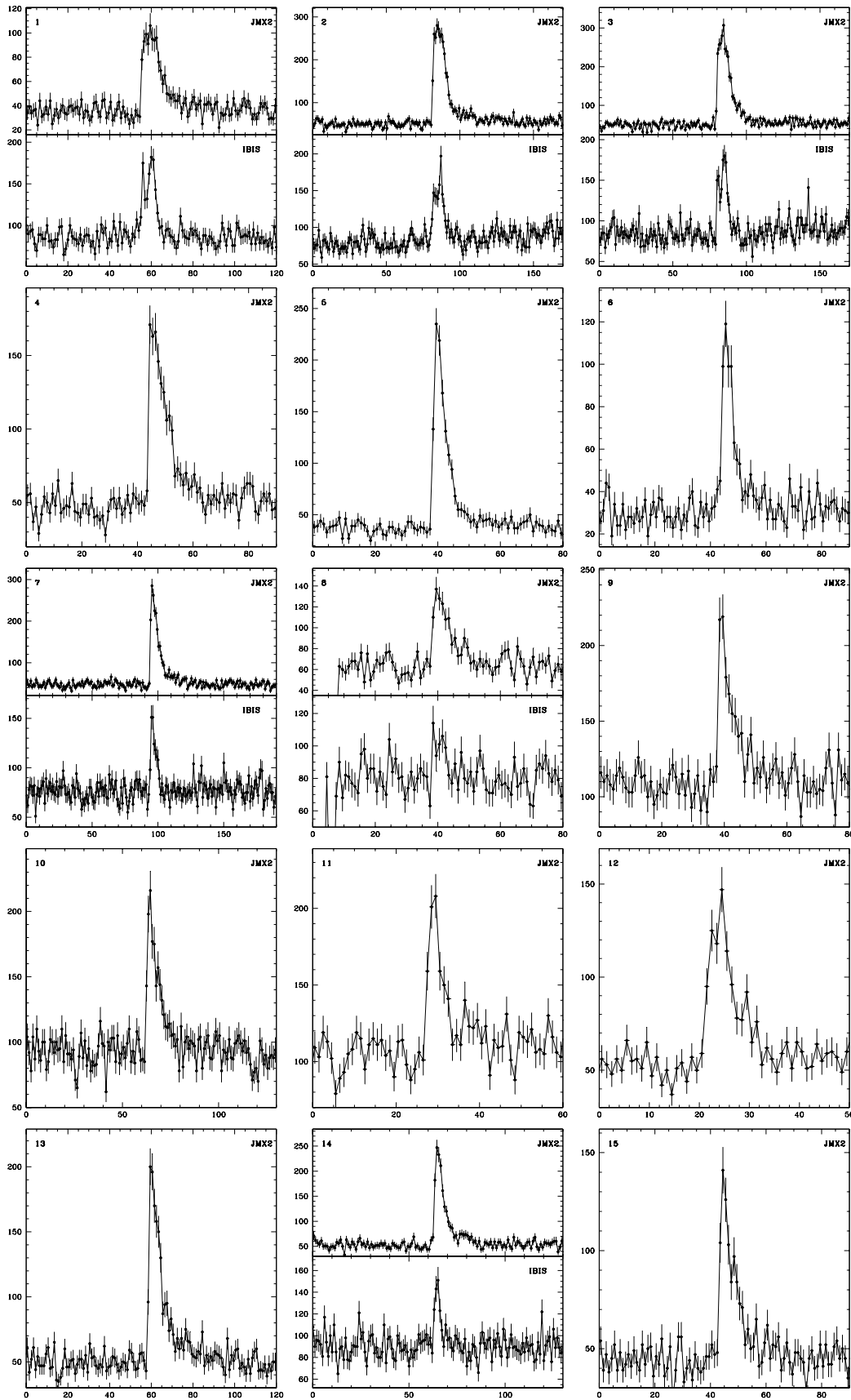
Рис. 5.4. Временные истории наблюдений рентгеновского барстера GX 354-0 по данным телескопа АРТ-П/ГРАНАТ, во время всплесков 7 сентября 1990 г. (слева) и 1 октября 1991 г. (справа).

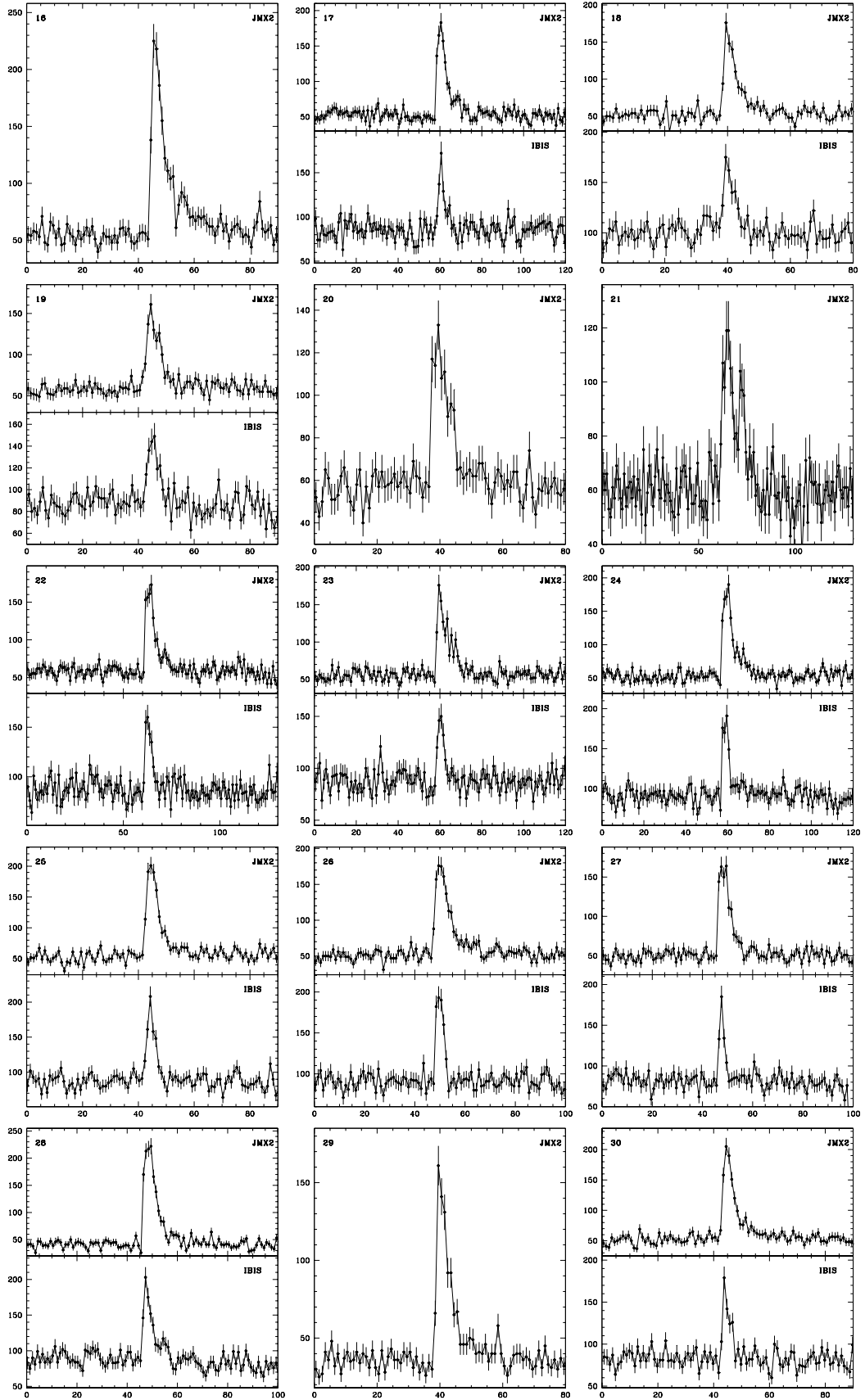
пом JEM-X в 2003-2004 гг. было зарегистрировано 53 рентгеновских всплеска, которые удалось связать с активностью этого источника. Список этих событий приведен в табл. 5.2. В этой таблице для каждого всплеска приведена его длительность, поток в максимуме всплеска (индексом указана продолжительность интервала интегрирования, использованного при вычислении потока), значимости детектирования всплеска по кривой блеска и по изображению, и жесткость, определенная как отношение энергии, выделившейся во всплеске в диапазонах 8-20 и 3-8 кэВ. Распределение всплесков по жесткости, приведенное на рис. 5.6, бимодально. Красной штрихованой линией показаны всплески, зарегистрированные только телескопом JEM-X, а синей - также и телескопом IBIS/ISGRI.

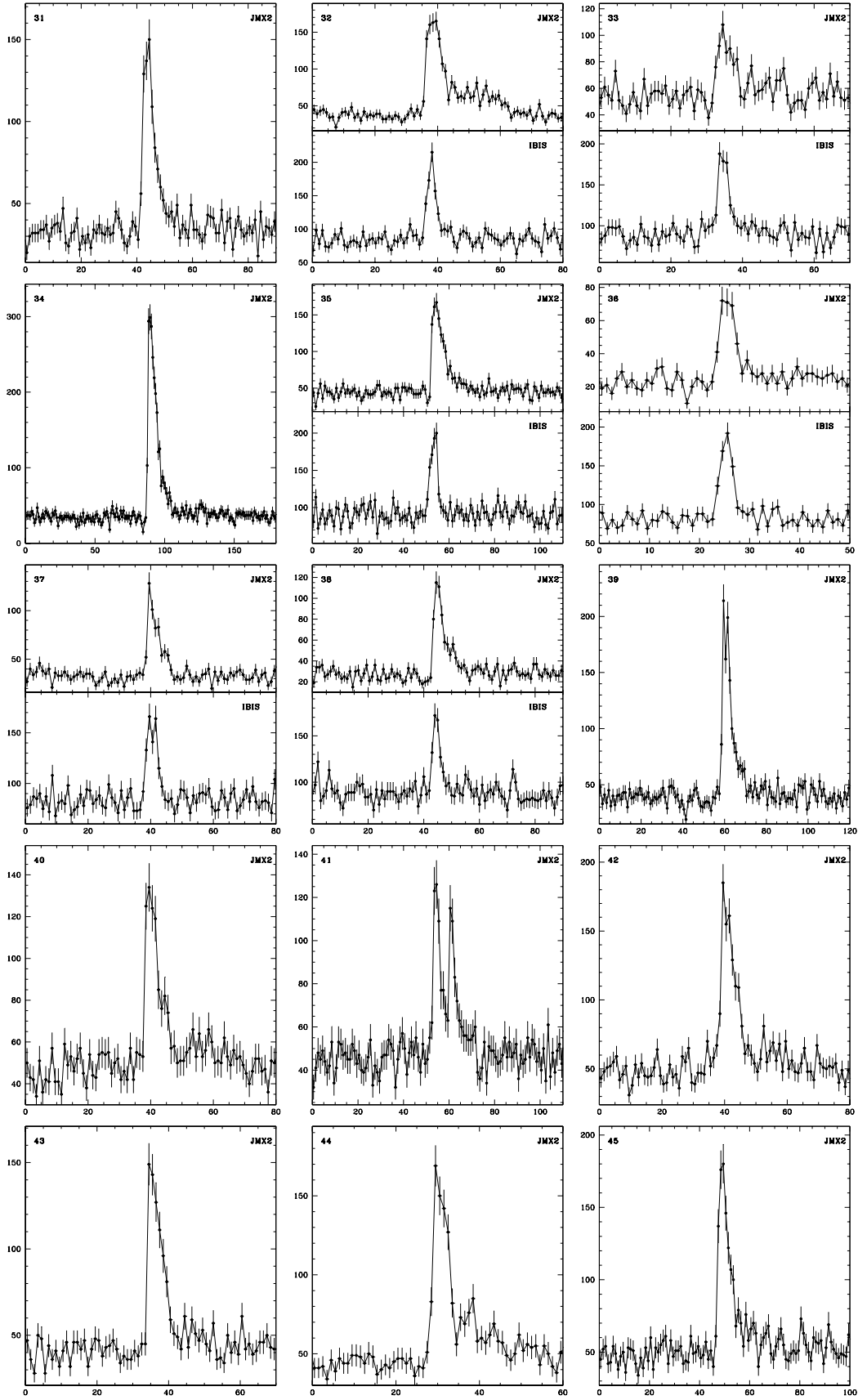
5.4 Спектр постоянного излучения

Нам не удалось построить достоверный спектр излучения по данным второго сеанса в связи с особенностью третьего модуля телескопа АРТ-П, с помощью которого проводились измерения в этом сеансе (см. [26]), поэтому спектральные исследования источника проводились на основе данных первого сеанса.

Для приближения спектра излучения GX 354-0 в спокойном состоянии были использованы три стандартные спектральные модели: модель комптонизации холодных фотонов на горячих электронах, модель тормозного излучения оптически тонкой плазмы и закон Больцмана. Каждая из этих моделей неплохо (по критерию χ^2) описывают данные (табл. 5.3). В одном из сеансов наблюдений,







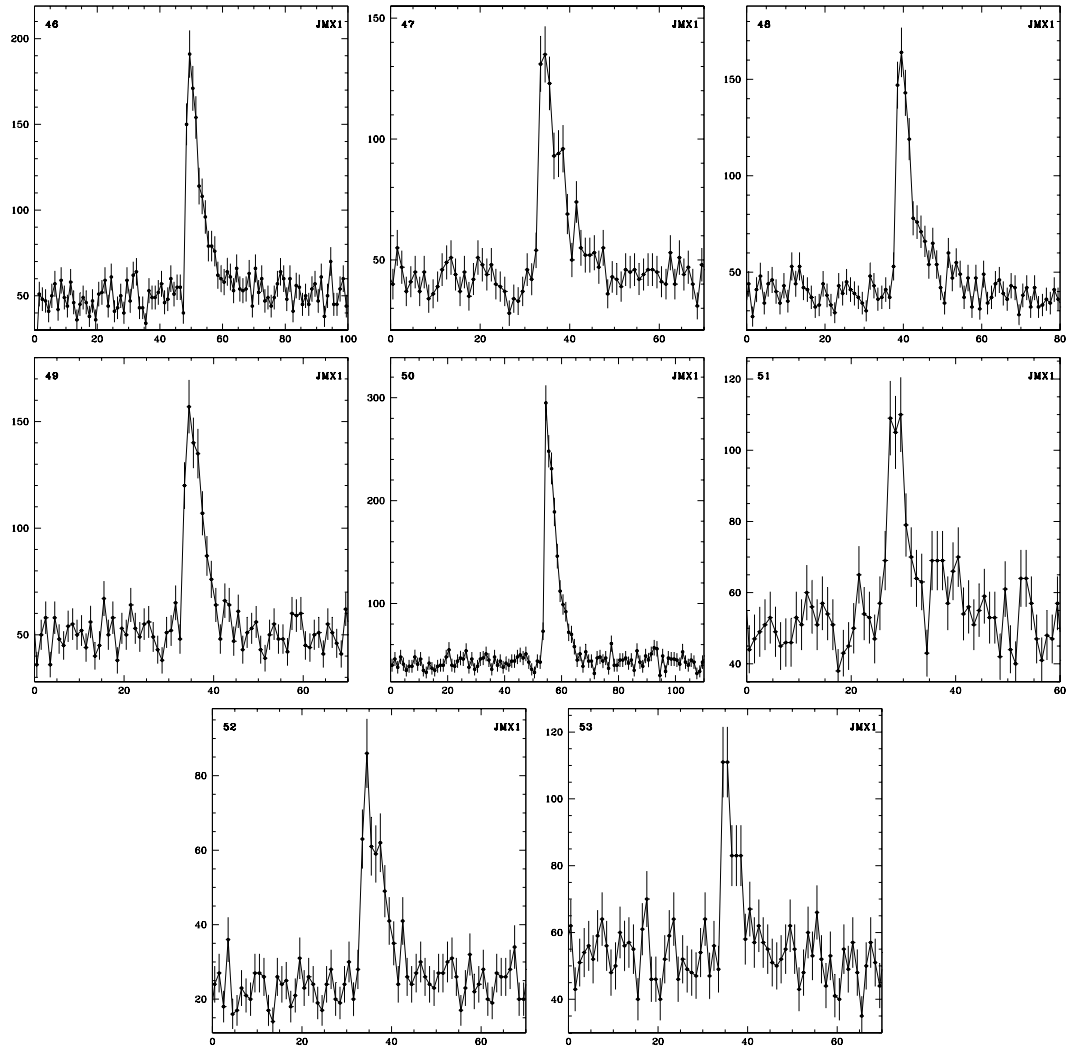


Рис. 5.5. Временные профили 53 рентгеновских всплесков, зарегистрированных детекторами телескопа JEM-X/ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 3–20 кэВ от барстера GX354-0.

проведенных с помощью модуля 4 телескопа АРТ-П, не было зарегистрировано на значимом уровне ни одного источника. Используя данные этого сеанса мы оценили интенсивность фонового сигнала, обусловленного как приходящим излучением, так и приборным фоном. Наилучшее приближение спектра постоянного излучения, полученное с помощью модели Сюняева-Титарчука комптонизации холодных фотонов на горячих электронах, представлено на рис. 5.7.

Отметим, что облако, в котором происходит процесс комптонизации излучения, характеризуется большой толщиной по Томпсоновскому рассеянию $\tau_T \sim 11$ (в предположении сферической геометрии) и достаточно низкой температурой электронов $kT \sim 3$ кэВ (табл. 5.3). В этих условиях важнейшую роль в формировании спектра излучения должны играть процессы тормозного излучения и поглощения, которые не учитываются в модели Сюняева-Титарчука. Более того, при рассмотрении процесса рассеяния фотонов на электронах важными оказываются не эффекты, связанные с изменением энергии фотона при рассеянии (эффект Доплера и эффект отдачи - именно их учитывает формула Сюняева-Титарчука), а чисто геометрические эффекты, связанные с запутыванием траектории фотонов и заметным ($\sim \tau_T^2$) удлинением пути, который фотон в среднем

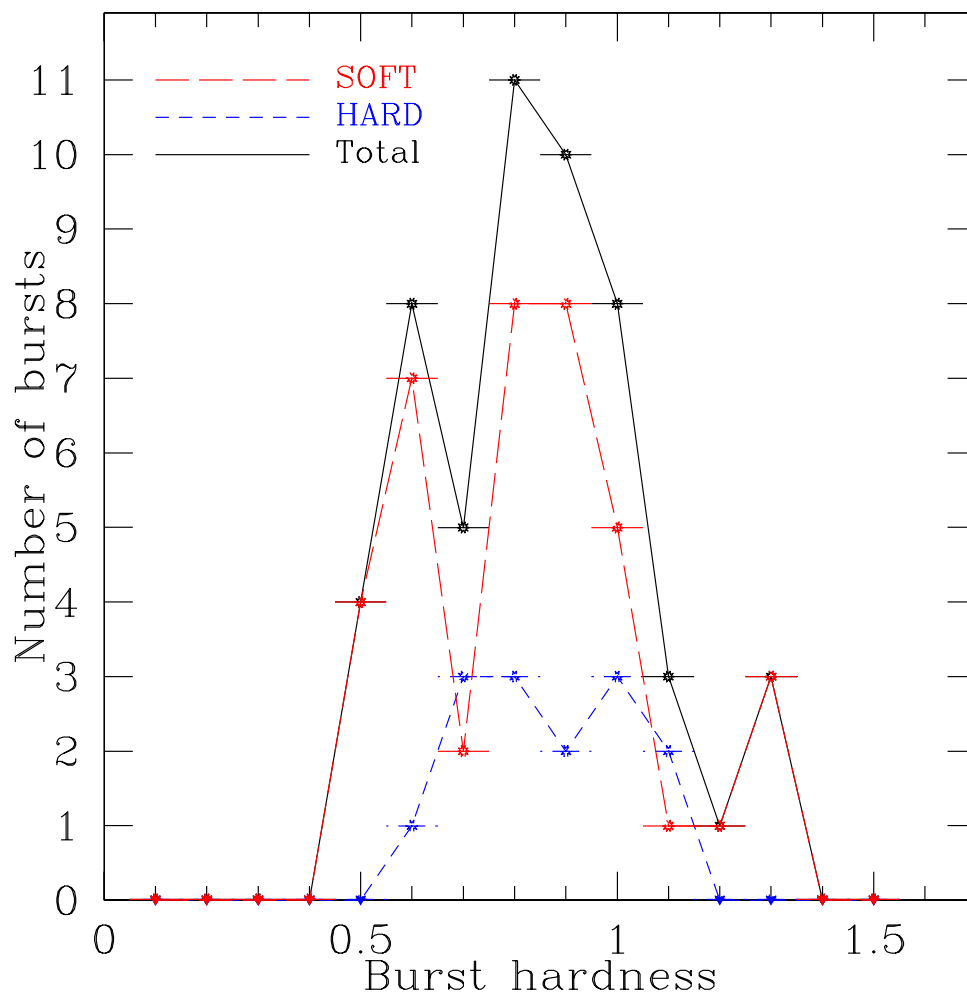


Рис. 5.6. Распределение всплесков, зарегистрированных телескопом JEM-X в 2003-2004 гг. от барстера GX 354-0 по их жесткости.

проходит в облаке. Как следствие, вероятность того, что фотон будет поглощен в облаке тормозным образом заметно повышается. Спектр, формирующийся при этом в облаке плазмы, сильнейшим образом зависит от геометрии облака, а также распределения в нем плотности и температуры.

Эквивалентное число атомов водорода на луче зрения $N_H = (4.2 \pm 2.1) \times 10^{-22}$ атомов см^{-2} , полученное в процессе аппроксимации находится в хорошем соответствии со значением приведенным для этого источника Базинска ([4]) ($5.0 - 10.0 \times 10^{22}$ атомов см^{-2} , Июль 1977).

Поток энергии постоянного рентгеновского излучения от источника в диапазоне 3-20 кэВ равен $F = (2.02 \pm 0.02) \times 10^{-9}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Это чуть ниже значения потока полученного Базинска ([4]) по данным рентгеновского телескопа SAS-3 (2.8×10^{-9} эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$).

На рис. 5.7 приведены также 2 спектра излучения GX 354-0 по данным рентгеновского телескопа СИГМА орбитальной обсерватории ГРАНАТ: в сентябре/октябре 1990 г. и феврале 1992 г. К сожалению, в сентябре и октябре 1990 г., т.е. вскоре после используемых в данной работе наблюдений АРТ-П, было лишь два коротких сеанса наблюдений источника прибором СИГМА. Поэтому нам удалось построить спектр, состоящий лишь из одной значимой точки в энергетическом диапазоне 30-110 кэВ. Как видно из рис. 5.7, данная точка сви-

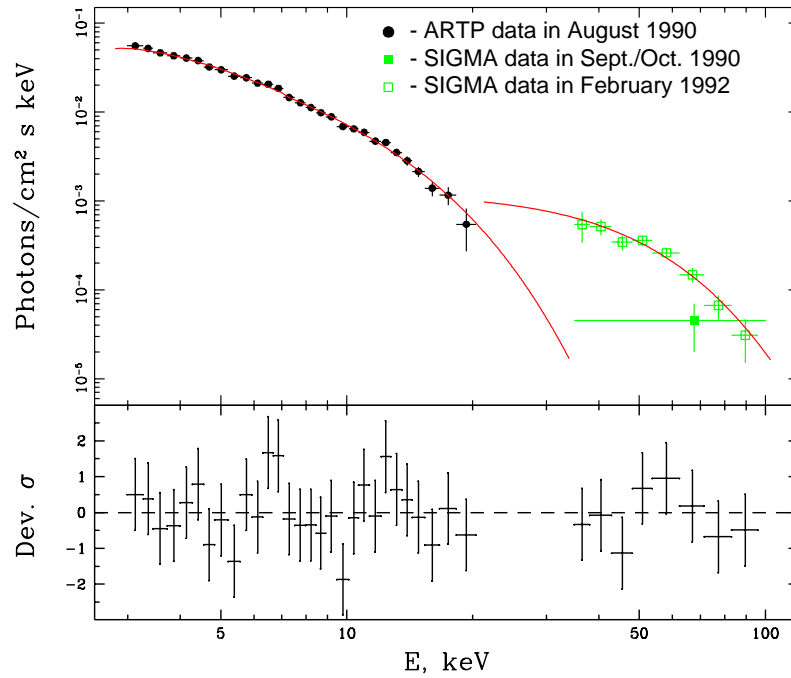


Рис. 5.7. Спектр постоянного рентгеновского излучения GX 354-0, построенный по данным приборов обсерватории ГРАНАТ.

детельствует о возможности наличия жесткой компоненты в спектре GX 354-0 в этом состоянии. Интересно отметить, что наилучшим приближением спектра построенного по данным наблюдений СИГМА в феврале 1992 г. является модель тормозного излучения оптически тонкой плазмы с температурой ~ 38 кэВ. Он несомненно более жесткий. Это свидетельствует о том, что GX 354-0 находился в другом, более жестком, спектральном состоянии.

Спектрометр IBIS обсерватория ИНТЕГРАЛ, обладающий широким полем зрения и высокой чувствительностью в жестком рентгеновском и мягком гамма диапазоне, позволяет изучить жесткую область спектра источника более подробно. Для этого были построены спектры источника в диапазоне 20-120 кэВ по данным каждого (одного или нескольких соседних) из орбитальных циклов наблюдений, в течение которых GX 354-0 попадал в поле зрения телескопа IBIS и статистическая значимость его детектирования на изображении превышала $\sigma = 6$. Все эти спектры были рассортированы по степени жесткости на четыре группы. Затем, на основе данных, относящихся к каждой из групп, было построено четыре спектра по данным телескопов ISGRI (20-120 кэВ) и JEM-X (3-20 кэВ; спектры, полученные по данным детекторов JEM-X1 и JEM-X2 в рамках одной группы наблюдений — складывались). Полученные спектры представлены на рис. 5.8. Сведения об экспозициях использованных наблюдений и результатах аппроксимации спектров степенной моделью с экспоненциальным завалом в области высоких энергий с учетом межзвездного поглощения приведены в табл. 5.4. Значения уровня межзвездного поглощения полученные при аппроксимации первого, третьего и четвертого спектров, находятся в хорошем согласии со значением $N_H = 5.0 \times 10^{-22}$ атомов см^{-2} , поэтому они были зафиксированы на этом уровне. Однако во втором спектре уровень межзвездного поглощения достиг значения $N_H = 11.1 \times 10^{-22}$ атомов см^{-2} . Здесь необходимо обратить внимание на особенности, наблюдаемые на спектрах в области 6-8 кэВ. На данный

Табл. 5.3. Результаты аппроксимации спектра GX354-0 по данным телескопа АРТ-П/ГРАНАТ в сентябре 1990 г.

<i>Чернотельное излучение</i>		
$kT, кэВ$	.....	1.84 ± 0.02
$R^1, км$	~ 1.9
N_H^2	.....	5.0 фикс.
$\chi_N^2(N)^3$	.....	7.36(30)
<i>Тормозное излучение оптически тонкой плазмы</i>		
$kT, кэВ$	.....	7.83 ± 0.41
N_H^2	.....	5.5 ± 1.2
$\chi_N^2(N)^3$	.....	1.15(29)
<i>Комptonизация холодных фотонов на горячих электронах⁴</i>		
$kT, кэВ$	.....	3.07 ± 0.24
τ^5	.....	11.9 ± 1.5
N_H^2	.....	4.4 ± 2.1
$\chi_N^2(N)^3$	.....	1.03(28)
<i>Закон Больцмана⁶</i>		
Фотонный индекс, α	.....	0.76 ± 0.36
$kT, кэВ$	.....	5.34 ± 1.01
N_H^2	.....	2.3 ± 2.3
$\chi_N^2(N)^3$	.....	1.06(28)

¹ в предположении, что расстояние до источника равно 4.5 кПк² эквивалентное число атомов водорода на луче зрения в единицах 10^{22} атомов $см^{-2}$ ³ χ^2 на степень свободы, где N - это число степеней свободы⁴ модель Сюняева и Титарчука (1980)⁵ оптическая толщина при Томпсановском рассеянии $\tau = \sigma_T N_e R$, где R - это радиус облака.⁶ степенной закон с экспоненциальным завалом $E^{-\alpha} exp(-E/kT)$

момент мы относим их к особенностям восстановления спектра по данным телескопа JEM-X. Однако, причина этого (как и причина “завышенного” уровня межзвездного поглощения во втором спектре) может быть в том, что на рисунке 5.8 представлены суммарные спектры за весьма длительный период, в течение которого спектральное состояние источника в стандартном рентгеновском диапазоне могло изменяться.

Также в этой табл. 5.4 приведены доли “жестких” и “мягких” всплесков (жесткость меньше и больше 0.7 соответственно, см. рис. 5.6), зарегистрированные в том или ином спектральном состоянии. Видно, что все “мягкие” всплески произошли в четвертом спектральном состоянии, в то время как “жесткие” всплески распределены между различными спектральными состояниями приблизительно поровну (с учетом экспозиции наблюдения). Интересно отметить тот факт, что именно четвертое спектральное состояние характеризуется более “мягким” спектром и высокой светимостью, а значит, более высоким темпом ак-

Табл. 5.4. Результаты аппроксимации спектров излучения барстера GX 354-0, построенных по данным телескопов JEM-X и IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ за 2003-2004 гг., степенной моделью с экспоненциальным завалом на высоких энергиях и учетом межзвездного поглощения.

Номер ^a спектра	Сумм. эсп. (Мс)	α^b	E_{cut}^c (кэВ)	Поток ^d энергии	χ_N^2	hard ^e (%)	soft ^f (%)
1	0.322	1.88 ± 0.03	54.51 ± 0.03	2.21	1.198	8	0
2	1.765	2.35 ± 0.03	50.94 ± 0.02	3.01	1.914	38	0
3	0.368	1.78 ± 0.03	13.69 ± 0.58	2.13	1.247	5	0
4	3.089	1.06 ± 0.02	5.73 ± 0.06	3.23	1.159	49	100

^a в соответствие с рис. 5.8: сверху вниз.

^b наклон спектра.

^c энергия экспоненциального завала.

^d модельный поток энергии излучения от источника в диапазоне энергии 3-120 кэВ (10^{-9} эрг см⁻² с⁻¹).

^e доля “жестких” всплесков, произошедших в данном спектральном состоянии, от всех “жестких” всплесков.

^f доля “мягких” всплесков, произошедших в данном спектральном состоянии, от всех “мягких” всплесков.

креции вещества на нейтронную звезду.

5.5 Обсуждение

Значение модельной температуры ~ 3 кэВ, полученное при аппроксимации моделью излучения черного тела спектра всплеска, зарегистрированного от источника GX 354-0 7 сентября 1990г., примерно в 1.5 раза превышает ожидаемое в соответствие с существующими теоретическими моделями. Одно из возможных объяснений этого факта заключается в перераспределении фотонов между разными энергетическими диапазонами за счет комптонизации “холодных” фотонов на “горячих” электронах, которая ведет к сдвигу максимума спектра излучения в более жесткую область. Оставив неизменной светимость такой сдвиг, несомненно, вызовет увеличение цветовой температуры, и уменьшение “цветового” радиуса источника излучения. Из условия сохранения общего потока при рассеянии нетрудно получить зависимость между наблюдаемым радиусом и температурой: $R \sim T^{-2}$. Причем отношение цветовой и эффективной температур может достигать 1.4-2.0 в зависимости от потока излучения, напряженности гравитационного поля у поверхности звезды и состава ее атмосферы ([60]; [119]). Поэтому реальный размер излучающей области может в 2-4 раза превышать полученное нами значение.

Значение потока энергии излучения от GX 354-0 в максимуме всплеска, зарегистрированного 1 октября 1991 г. близко к 7×10^{-8} эрг см⁻² с⁻¹, а это значение, по предположению Ди Сальво и др. ([38]), соответствует эддингтоновскому пределу светимости для этого источника. Р.А.Лондон и др. ([60]) показали, что спектр излучения нейтронных звезд, светимость которых близка к эддингтоновской, плохо аппроксимируется моделью излучения черного тела. Поэтому, даже

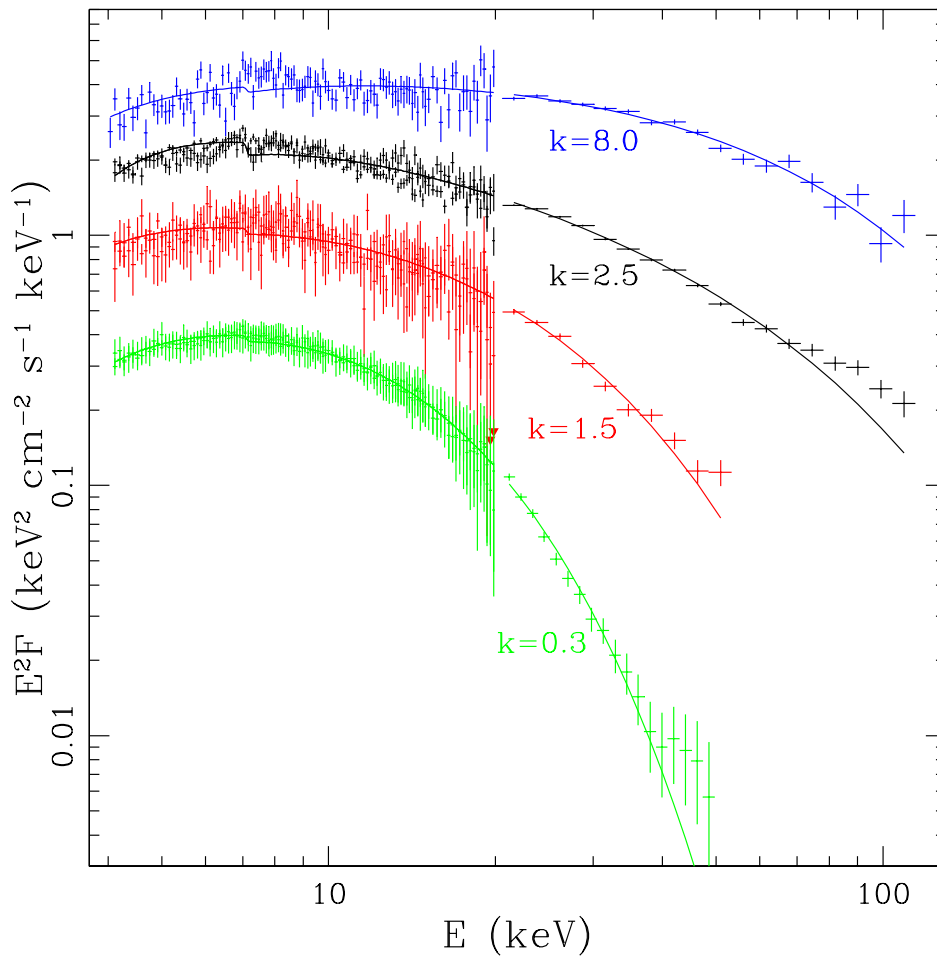


Рис. 5.8. Спектр постоянного рентгеновского излучения GX 354-0, построенный по данным приборов обсерватории ИНТЕГРАЛ за 2003-2004 гг. Каждый из спектров для удобства скалирован на соответствующий коэффициент k .

если бы мы смогли построить спектр всплеска, зарегистрированного в этом сеансе, то врядли смогли бы оценить параметры нейтронной звезды, аппроксимируя его такой простой и удобной моделью как модель излучения черного тела.

На кривой блеска источника GX 354-0 в диапазоне энергий от 7.5 до 13.0 кэВ наблюдается небольшой вторичный пик в период уменьшения интенсивности в ходе рентгеновского всплеска. Такая структура всплеска весьма характерна для данного источника. В 1980 г. Хоффман и др. ([127]) провели подробное исследование этого феномена по данным рентгеновской обсерватории САС-3. На приведенных в их работе кривых блеска источника GX 354-0 также наблюдаются провалы в области высоких энергий и соответствующие им пики в области низких энергий. Объяснение этого явления, по предположению Хоффмана, основывается на возможности перераспределения части фотонов между более мягкой и более жесткой областями спектра за счет, например, комптоновского рассеяния.

Существуют, однако, и другие предположения, касающиеся причины возникновения двухпиковой структуры всплеска. Наличие нескольких пиков на кривой блеска может быть объяснено тем, что при ядерной детонации накопленного в результате аккреции вещества, часть его отбрасывается от звезды, и затем, за счет гравитационного притяжения вновь возвращается к поверхности,

где вновь детонирует, давая рождение еще одному всплеску рентгеновского излучения от источника. Возможно, именно такие вторичные всплески представлены на кривой блеска в виде вторичных пиков.

Всплески в излучении GX 354-0 с явно выраженной мультипиковой структурой регистрировались уже не один раз, что явилось для нас аргументом в пользу исследования возможности применения к объяснению этого феномена последней гипотезы. Однако уже решение математической задачи приближения “точной” кривой блеска двумя экспоненциальными пиками показало, что значимость вторичного пика лишь немного больше 1σ . Поэтому при решении физической задачи (с учетом ошибок) значимость вторичного всплеска и вовсе ничтожно мала. Однако существует еще один аргумент в пользу того, что это не просто случайная флуктуация потока, а вторичный всплеск, недостаточно значимо прописанный. Дело в том, что минимальное доступное временное разрешение в данных наблюдениях составляет ~ 1 с. Каминкер и др. ([48]) наблюдали двухпиковую структуру всплеска излучения от GX 354-0 при временном разрешении 0.3 с., но эта структура пропадала при временном разрешении 0.9 с.

Вполне вероятно, что объяснение мультипиковой структуры всплеска может быть дано при помощи моделей, учитывающих особенности протекания термоядерных реакций, которые являются источником энергии для рентгеновских всплесков I рода. Однако, эти модели должны учитывать распределения таких параметров как плотность, температура и др. в излучающей области, что выходит за пределы возможностей простых 2,3-параметрических моделей аппроксимации спектров. Возможно поэтому такие простые модели не всегда дают хорошие результаты при аппроксимации данных, особенно в первые моменты всплеска (период роста интенсивности до максимума).

Часть IV

**КАТАЛОГ РЕНТГЕНОВСКИХ
ВСПЛЕСКОВ ПО ДАННЫМ
ТЕЛЕСКОПА IBIS/ISGRI
ОБСЕРВАТОРИИ ИНТЕГРАЛ
ЗА 2003-2005 гг**

Глава 6

КАТАЛОГ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЛЕСКОВ

6.1 Введение

В соответствии с современным мировоззрением, большинство ярких компактных источников рентгеновского излучения в нашей Галактике - это двойные системы, состоящие из нормальной звезды и компактного объекта - нейтронной звезды или черной дыры. Во многих из этих систем происходит процесс аккреции, т.е. перетекания вещества с нормальной звезды на компактный объект через область внутренней точки Лагранжа, что, обычно, сопровождается образованием аккреционного диска. В системах с черной дырой в качестве компактного объекта именно аккреционный диск является основным источником излучения в рентгеновском диапазоне энергий, причем поток энергии излучения от такой системы весьма стабилен и может изменяться лишь в результате изменений в процессе аккреции. Однако если компактным объектом в системе является нейтронная звезда со слабым магнитным полем ($\sim 10^9$ Гс), то аккрецируемое вещество скапливается на ее поверхности и формирует пласт, температура и плотность в основании которого достаточны для термоядерной детонации вещества. Существуют условия, при которых термоядерное горение становится неустойчивым, что приводит к взрывному выделению энергии, который мы наблюдаем в виде рентгеновского всплеска. Светимость системы, в спокойном состоянии лежащая в диапазоне $10^{36} - 10^{37}$ эрг/с, в момент такого всплеска может возрасти на 2-3 порядка величины, достигая критического эддингтоновского уровня $L_{c\infty} \sim 2.5 \times 10^{38} (M/M_{\odot})(1 - R_g/R)^{1/2} (1 + X)^{-1}$ эрг s^{-1} , где M и R - масса и радиус нейтронной звезды, $R_g = 2GM/c^2$ - ее гравитационный радиус и X - обилие водорода.

В рентгеновском диапазоне наблюдаются также солнечные вспышки и космические гамма-всплески, события от источников повторных всплесков (магнитаров), а также отдельные события, связанные с нестационарной аккрецией в двойных системах (всплески II рода от маломассивных рентгеновских двойных и всплески от массивных систем с аккрецией из неоднородного звездного ветра звезды-спутника). По сравнению со всеми этими событиями рентгеновские всплески I рода и их источники представляют особый самостоятельный интерес для исследователей - в силу их очень специфичных наблюдательных свойств и в связи с непосредственностью информации, которую они несут о процессах, происходящих у самой поверхности нейтронных звезд в условиях действия сверхсильных гравитационного поля и давления, сверхвысоких температур и релятивистских скоростей. Регистрация всплесков I рода служит, наряду с

регистрацией когерентных пульсаций, одним из важнейших и самых надежных критериев идентификации природы компактного объекта (нейтронной звезды) в рентгеновских двойных системах.

Тот факт, что всплески часто наблюдаются от слабых рентгеновских источников (или транзиентных источников во время их низкого состояния), открывает возможность для использования этих событий при поиске ранее неизвестных барстеров, поток постоянного рентгеновского излучения которых находится ниже уровня уверенной регистрации современными широкоугольными рентгеновскими приборами. Такие источники могут быть обнаружены лишь во время всплесков, когда их рентгеновская светимость на короткое время возрастает в десятки и сотни раз¹. Обсерватория ИНТЕГРАЛ, оснащенная уникальными широкоугольными телескопами, позволяющими одновременно исследовать области неба площадью ~ 1000 кв. град. с чувствительностью по потоку лучше 1 мКраб (за несколько часов наблюдений) и угловым разрешением, достигающим нескольких минут дуги, посвящаящая, к тому же, до 85% физического времени непрерывным наблюдениям области галактического центра и галактической плоскости, где сосредоточена основная звездная масса Галактики, как нельзя лучше подходит для решения подобной поисковой задачи.

В четвертой части диссертации с целью поиска рентгеновских всплесков проведен анализ данных всех наблюдений, выполненных телескопом IBIS орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ в течение первых двух с половиной лет работы на орбите (подробно рассмотрены всплески, произошедшие в период с 10 февраля 2003 г. по 2 июля 2004 г., [129]; информация о всплесках, произошедших с 3 июля 2004 г. по 26 сентября 2005 г. представлена в табл. 6.3, 6.4 и на рис. 6.10). Основной целью работы был поиск новых рентгеновских барстеров. Во временной записи полной скорости счета детектора IBIS/ISGRI в диапазоне энергий 15–25 кэВ выявлено 1900 всплесков длительностью от ~ 5 до ~ 500 с, удовлетворяющих высокому критерию статистической достоверности (за все время наблюдений лишь одно событие могло быть случайным, да и то с вероятностью 20%). Помимо событий, связанных с космическими гамма-всплесками (зарегистрированными в поле зрения или прошедшими сквозь защиту телескопа), солнечными вспышками и активностью источника повторных мягких гамма-всплесков SGR 1806-20, 391 всплеск удалось локализовать и за одним исключением — отождествить с ранее известными постоянными или транзиентными источниками рентгеновского излучения (207 — с известными рентгеновскими барстерами). В одном случае источником всплеска был новый барстер в состоянии с низким уровнем светимости, получивший название IGR J17364-2711. Основные параметры локализованных всплесков и результаты их отождествления представлены в каталоге всплесков. Любопытно, что 135 всплесков было зарегистрировано от одного рентгеновского барстера — GX354-0. Для этого источника исследованы статистические распределения всплесков по их длительности, уровню максимального потока и периоду рекуррентности. Некоторые из всплесков, наблюдавшихся телескопом IBIS/ISGRI, были также зарегистрированы телескопом JEM-X обсерватории ИНТЕГРАЛ в стандартном рентгеновском диапазоне (3–20 кэВ).

В первом разделе описаны используемые наблюдения и представлены методы обработки данных. Второй раздел посвящен результатам анализа детекторных кривых блеска. Третий раздел посвящен подведению итогов исследования.

¹Сами источники могут быть обнаружены и случайно — во время глубоких наблюдений или обзоров, проводимых сверхчувствительными зеркальными рентгеновскими телескопами, однако, распознать их природу в этом случае намного сложнее.

6.2 Наблюдения и методы обработки данных

В этой главе использовались данные, полученные верхним детекторным слоем (ISGRI) телескопа IBIS и монитором JEM-X. Анализ данных обоих телескопов основывался на стандартном пакете программ научной обработки данных обсерватории ИНТЕГРАЛ (OSA) версии 4.2. Поиск всплесков осуществлялся по записям скорости счета всех событий, зарегистрированных детектором ISGRI в диапазоне 15-25 кэВ, вне зависимости от направления прихода фотонов. Записи скоростей счета для каждого отдельного наблюдения обсерватории (соответствующего отдельному наведению) были воспроизведены с временным разрешением 1, 5 и 10 с на основе списка событий, полученного на стадии GTI стандартной процедуры OSA 4.2 обработки данных детектора ISGRI. Всего было проанализировано 13777 отдельных наблюдений, выполненных обсерваторией ИНТЕГРАЛ в период с 10 февраля 2003 г. по 2 июля 2004 г. Все эти данные сейчас находятся в открытом доступе в архиве обсерватории. Длительность отдельных наблюдений доходила до ~ 21 кс, суммарная экспозиция всех использованных наблюдений составила 33.7 Мс. На рис 6.1 представлена карта распределения экспозиции для наблюдений телескопа IBIS, использованных в данной работе.

Полученные записи скорости счета были проанализированы на предмет наличия всплесков. Критерием всплеска служило превышение в каком-то временном бине величиной отношения сигнала к шуму $(S - \bar{S})/N$ заранее установленного порога s_0 . Основное внимание было уделено скорости счета с временным шагом 5 с, наиболее чувствительной (т.е. обеспечивающей максимальное отношение S/N в отдельном бине) к ординарным рентгеновским всплескам от барстеров. Поскольку число событий, зарегистрированных детектором в каждом временном бине, подчиняется распределению Пуассона, существует маленькая, но конечная вероятность $p(s_0)$ регистрации случайного выброса, даже в отсутствии реального всплеска. Чтобы отфильтровать подобные случайные выбросы, был задан достаточно высокий порог $s_0 = 5.1$, гарантирующий, что вероятность регистрации одного случайного всплеска с $(S - \bar{S})/N \gtrsim s_0$ во всем проверяемом временном ряду (с числом временных бинов $M \sim 6.7 \times 10^6$ при длине бина 5 с) не превышала $p(s_0) \times M \simeq 20\%$. Полная скорость счета детектора зависела от излучения всех источников в поле зрения телескопа, поэтому средняя скорость счета \bar{S} и величина шума N в приведенных формулах определялись независимо по каждому отдельному наведению. Результаты описанного анализа контролировались также визуальным просмотром временных записей скорости счета. Такой же анализ был проведен для записей с разрешением 10 с.

Для всех зарегистрированных всплесков восстанавливались изображения участка неба в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI (стадия IMA процедуры OSA 4.2), накопленные с одинаковой экспозицией в момент всплеска и непосредственно перед всплеском (см. рис. 6.2). Сравнение статистической значимости детектирования источников на этих изображениях использовалось для выявления источника всплеска и его отождествления.

Весь комплекс процедур имеет много общего с системой IBAS обсерватории ИНТЕГРАЛ, заключающейся в автоматическом поиске гамма-всплесков, попавших в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI, и широком распространении оповещений о них ([77]). Отличия состоят в том, что в системе IBAS: 1) используется более жесткий и широкий диапазон энергий, 2) в 2003–2004 гг. игнорировались события, не относящиеся к гамма-всплескам, 3) алгоритмы и программы разрабатывались для оперативной автоматической работы с телеметрическими дан-

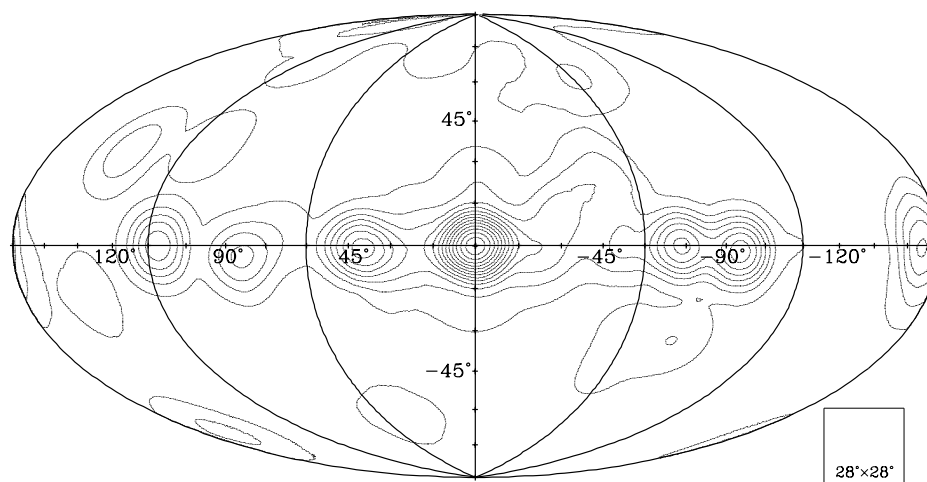


Рис. 6.1. Карта полной экспозиций наведений телескопа IBIS, использованных при создании каталога всплесков, зарегистрированных детектором ISGRI в 2003-2004 гг. Контуры даны с шагом 255 кс, начиная с уровня экспозиции 73.4 кс. Видно, что в направлении галактического центра экспозиция достигала 3.39 Мс. В правом нижнем углу схематически показано поле зрения телескопа IBIS.

ными.

6.3 Результаты

Проведенный анализ временных записей скоростей счета детектора IBIS/ISGRI привел к обнаружению 1077 всплесков, источники 115 из которых были также выявлены на изображениях области неба в поле зрения телескопа. Шесть таких событий были вызваны космическими гамма-всплесками, произошедшими в поле зрения телескопа. Другие события, за одним исключением, удалось связать с известными постоянными источниками рентгеновского излучения. Для выяснения природы 962 нелокализованных всплесков была проведена их кросс-корреляция со списками гамма-всплесков и солнечных вспышек, зарегистрированных антисовпадательной защитой (ACS) гамма-спектрометра SPI обсерватории ИНТЕГРАЛ и системой мониторов космической среды на спутниках GOES. Результаты данного анализа представлены в табл. 6.1.

Табл. 6.1. Кросс-корреляция всплесков, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI, и событий в экспериментах SPI/ACS и GOES с 10 февраля 2003 г. по 2 июля 2004 г.

Инструмент	ISGRI	ISGRI ^a	ISGRI ^b + GOES	ISGRI ^b + ACS	ISGRI ^b + GOES+ACS
Всплески	1077	115	145	86	17

^a- локализованные и отождествленные всплески ISGRI

^b- нелокализованные всплески ISGRI

В табл. 6.2 представлен список всплесков рентгеновского излучения, зарегистрированных детектором IBIS/ISGRI и отождествленных с рентгеновскими

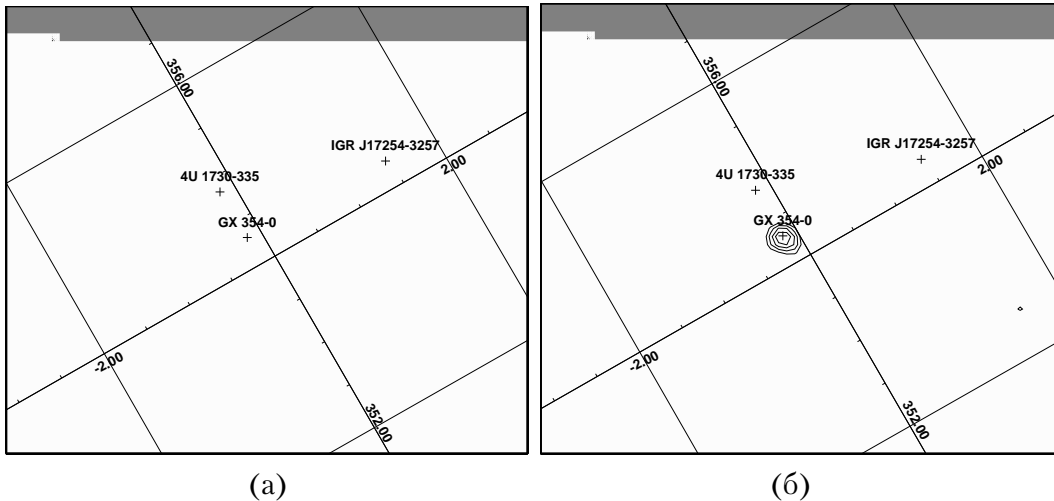


Рис. 6.2. Изображение области неба в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI за 10 с до начала всплеска, зарегистрированного 20 сентября 2003 г., (а) и в его максимуме (б). В обоих случаях экспозиция равна 5 с, диапазон энергий равен 15–25 кэВ. Контуры показывают область достоверной регистрации источника на уровне отношения сигнала к шуму $S/N = 4, 6.5, 9.1, 11.7, 14.3$ стандартных отклонений (даны с логарифмическим шагом 1.22).

барстерами. Приведены название источника всплеска, момент достижения максимального потока излучения, длительность всплеска T , величина максимального потока излучения, определенная по интервалу времени δt длительностью 1, 2, 3 или 5 с, и статистическая значимость регистрации источника всплеска: а) на изображении, полученном в течение временного бина $\delta T = 5$ с (или 10 с в нескольких случаях, указанных в табл.6.2) вблизи максимума всплеска, и б) по временной истории полной скорости счета детектора ISGRI (по величине отношения S/N в том же бине δT). Исползованные значения δt и δT указаны в 6 и 10 колонках таблицы соответственно. Отметим, что ни в одном случае за период длительностью δT , предшествующий началу всплеска на 1.5-2 длительности последнего, соответствующий источник постоянного излучения на изображении зарегистрирован не был. Все измерения выполнены в диапазоне энергий 15–25 кэВ. В таблице дана также информация об успешности регистрации данного всплеска рентгеновским монитором JEM-X. Профили включенных в таблицу всплесков приведены на рис. 6.4.

Среди приведенных в табл. 6.2 событий присутствуют несколько многопиковых всплесков. Для таких всплесков в четвертой колонке указан момент достижения максимума потока за весь всплеск, а не в первом пике. Для определения длительности всплеска T был проведен анализ временной истории скорости счета детектора ISGRI в соответствующем сеансе, построенной с разрешением 1 с. Начало и конец всплеска определялись как моменты превышения среднего за сеанс уровня скорости счета на 10%. Поток излучения в максимуме всплеска определялся при анализе изображения участка неба в поле зрения телескопа, восстановленного с помощью пакета программ OSA 4.2 в течение интервала δt . Значения потока, приведенные в табл. 6.2, выражены в единицах потока, зарегистрированного телескопом IBIS/ISGRI от туманности в Крабе, что позволяет использовать их для физических оценок, например, для оценки энергии, выделившейся во всплеске.

6.3.1 Новый рентгеновский барстер

Рентгеновский всплеск под номером 82 в табл. 6.2 зарегистрирован телескопом IBIS/ISGRI 17 февраля 2004 г. от ранее неизвестного барстера, расположенного в области галактического центра (в $\sim 27'$ от источника SLX 1735-269). На рис. 6.3а показано изображение участка неба в поле зрения (карта распределения отношения сигнала к шуму S/N), полученное в диапазоне энергий 15–25 кэВ в течение 10 с во время всплеска. Новый источник, названный нами IGR J17364-2711, единственный значимый на этом изображении, зарегистрирован на уровне $S/N = 8.7$. Его положение, R.A. = $17^h 36^m 28^s$, Decl. = $-27^\circ 11' 56''$ (эпоха 2000.0), определено с точностью до 2 мин. дуги². Поток фотонов в максимуме блеска достигал 1.6 ± 0.3 Краб, что на расстоянии галактического центра $d = 8.5$ кпк соответствовало светимости $L \simeq 8 \times 10^{37}$ эрг s^{-1} в диапазоне 15–25 кэВ. Спектр всплеска был очень мягким и на энергиях ~ 30 кэВ поток фотонов падал ниже уровня детектирования. Предполагая, что спектр имел виновскую форму с температурой $kT \simeq 2.5 - 2.8$ кэВ, характерной для всплесков с фотосферным расширением, находим болометрическую светимость данного всплеска, $L_B \simeq (4 - 5) \times 10^{38}$ эрг s^{-1} , которая в полном соответствии со сделанным предположением о расширении фотосферы действительно оказывается очень близкой к эддингтоновской. К сожалению, всплеск не был зарегистрирован в стандартном рентгеновском диапазоне, т.к. при одновременных наблюдениях монитором JEM-X он находился на самом краю поля зрения монитора, более узкого, чем у телескопа IBIS. Таким образом уточнить значение kT не представлялось возможным.

На рис. 6.3б показано изображение того же участка неба, что и на рис. 6.3а, но полученное за весь сеанс наблюдений 16–17 февраля 2004 г. за исключением наведения, во время которого произошел всплеск. На изображении хорошо видны 4 зарегистрированных в этой области источника. Источника IGR J17364-2711 среди них нет. Соответствующий 3σ -предел на поток его постоянного излучения равен 4 мКраб в диапазоне 15–25 кэВ. Полагая спектр источника степенным с показателем степени $\gamma \simeq 2.1$, получаем достаточно жесткий предел на его светимость в диапазоне 2–30 кэВ $L_X \lesssim 1.2 \times 10^{36}$ эрг s^{-1} . Данный источник дополняет список рентгеновских барстеров (например, [53]), никогда не наблюдавшихся в состоянии непрерывного рентгеновского излучения, а обнаруженных лишь во время довольно редких всплесков.

Отметим, что ближайший источник, зарегистрированный в мягком (0.1–2.4 кэВ) рентгеновском диапазоне при высокочувствительном обзоре всего неба спутником ROSAT, 1RXS J173602.0-272541 расположен на расстоянии $\sim 15'$ от источника IGR J17364-2711.

6.3.2 Ранее известные барстеры

Всплески, зарегистрированные телескопом IBIS/ISGRI, в целом характеризуются большей жесткостью и мощностью, чем обычные события этого типа, поэтому вполне уместно привести здесь некоторую информацию об их источниках.

Источник 2S 0918-549 входит в сверхтесную рентгеновскую двойную систему с гелиевым белым карликом в качестве донора. Был идентифицирован как

²Из-за особенности кодирующей маски телескопа IBIS в ряде случаев существует двойственность в определении положения источника. Другое возможное положение источника данного всплеска, R.A. = $17^h 38^m 05^s$, Decl. = $-37^\circ 49' 05''$, менее вероятно, чем указанное выше, хотя полностью отвергнуто быть не может.

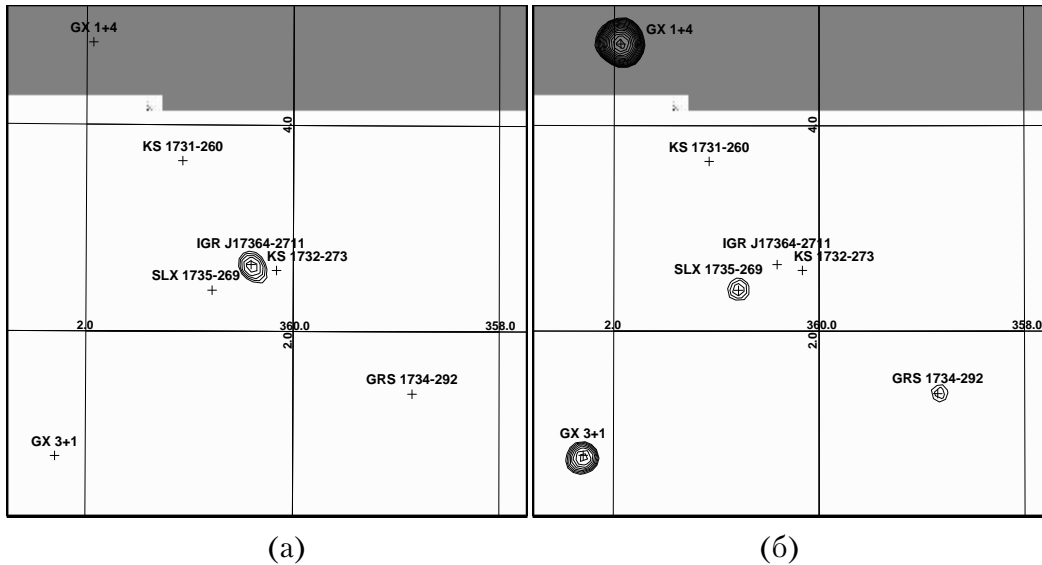


Рис. 6.3. Изображения участка неба в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI, полученные 17 февраля 2004 г. (а) во время всплеска номер 82, зарегистрированного от ранее неизвестного барстера IGR J17364-2711, и (б) в течение всего сеанса наблюдений (за исключением момента всплеска). В первом случае экспозиций равна 10 с, во втором — более 93000 с. Оба изображения получены в диапазоне энергий 15–25 кэВ. Контуры показывают область достоверной регистрации источников на уровне отношения сигнала к шуму $S/N = 4, 4.7, 5.5, 6.5, 7.6, 8.9, \dots$ стандартных отклонений (даны с логарифмическим шагом 1.17).

барстер Джонкером и др. ([35]). За всю историю наблюдений от этого источника было обнаружено 7 рентгеновских всплесков I-го рода ([42]), в том числе сверхдолгий всплеск, наблюдавшийся спутником ВерроSAX 1 октября 1996 г. в течение ~ 40 мин (экспоненциальное время спада составило 117 с). Длительность остальных всплесков не превышала 29 с. Поток излучения в максимуме блеска большинства всплесков доходил до 2-3 (в сверхдолгом всплеске до 3.7) Краб в стандартном рентгеновском диапазоне. Еще два слабых всплеска по имеющимся данным с уверенностью отнести к всплескам I-го рода не удалось. Анализ данных телескопа IBIS/ISGRI позволил выявить десятый из когда-либо зарегистрированных рентгеновских всплесков от этого барстера (табл. 6.2, всплеск 23). Поток излучения в максимуме блеска составил 3.6 Краб в диапазоне энергий 15-25 кэВ.

Источник 4U 1608-522 известен как мягкий рентгеновский транзиент с временем жизни 2–3 месяца и периодом рекуррентности ~ 1 года. Первые рентгеновские всплески из созвездия Норма, предположительно связанные с ним, были зарегистрированы обсерваториями Vela 5 и Uhuru ([9]; [32]). Позднее от 4U 1608-522 было зарегистрировано 22 всплеска обсерваторией Накучо, анализ которых показал сильную корреляцию свойств всплесков с уровнем постоянного потока излучения источника: длительность всплесков в его ярком состоянии составляла ~ 8 с, в то время как в выключенном состоянии она варьировалась от 10 до 30 с, а поток в максимуме всплеска в последнем случае был заметно слабее ([85]). Интересно, что хотя частота всплесков, вообще говоря, не зависела от потока излучения, два всплеска, зарегистрированных в выключенном состоянии, произошли с интервалом лишь ~ 10 мин ([86]). Исследование 17 всплесков, наблюдавшихся от 4U 1608-522 обсерваторией Темпа, выявило появление

Табл. 6.2. Рентгеновские всплески, зарегистрированные телескопом IBIS/ISGRI в диапазоне энергии 15-25 кэВ в 2003 г.

# ^а	Источник	Максимум всплеска				ΔT^B , с	S/N	
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб	δt^b , с		IM ^Г , σ	LC ^Д , σ
2003								
+1	<i>GX 354-0</i>	28.02	07:55:06	2.52	1	13	12.2	12.9
2	<i>GX 354-0</i>	01.03	00:04:50	2.48	1	13	12.6	9.4
3	<i>GX 354-0</i>	01.03	16:05:33	3.04	1	11	10.9	7.8
4	<i>GX 354-0</i>	02.03	07:42:22	3.04	1	9	12.9	7.6
5	<i>4U 1636-536</i>	04.03	19:18:02	1.13	2	10	7.9	6.6
6	<i>4U 1702-429</i>	09.03	21:51:13	2.93	1	9	12.1	14.5
7	<i>4U 1608-522</i>	09.03	22:35:05	2.57	1	8	10.8	9.0
8	<i>GX 354-0</i>	12.03	10:22:26	2.70	1	5	11.2	6.7
9	<i>4U 1702-429</i>	12.03	11:11:03	3.09	1	5	9.8	5.2
10	<i>4U 1608-522</i>	13.03	13:49:37	2.61	1	9	12.5	10.1
+11	<i>4U 1702-429</i>	15.03	02:38:07	2.44	1	7	14.7	12.3
12	<i>4U 1702-429</i>	15.03	18:22:49	1.74	2	5	7.8	5.8
13	<i>GX 354-0</i>	15.03	20:36:46	1.22	3	9	8.4	5.6
14	<i>GX 354-0</i>	03.04	08:40:18	3.10	1	6	11.6	8.2
+15	<i>Aql X-1</i>	06.04	07:42:15	1.42	2	11	8.4	8.8
16	<i>4U 1724-307</i>	06.04	18:32:31	1.26	2	18	8.2	5.9
+17	<i>GX 354-0</i>	06.04	19:45:29	1.54	2	8	7.2	6.5
18	<i>GX 354-0</i>	07.04	03:26:31	1.78	1	6	8.1	7.5
19	<i>4U 1636-536</i>	11.04	18:13:18	0.52	6	11	5.8	5.9
20	<i>4U 1702-429</i>	15.04	06:47:16	2.54	1	7	11.9	11.1
^е 21	<i>4U 1812-12</i>	21.04	03:36:36	2.55	5	14	11.8	5.6
22	<i>4U 1812-12</i>	25.04	10:54:25	3.60	1	6	11.9	6.3
23	<i>2S 0918-549</i>	16.06	20:09:13	3.61	1	25	12.8	5.5
24	<i>4U 1702-429</i>	18.08	10:05:10	2.46	1	7	11.9	9.5
25	<i>GX 354-0</i>	23.08	16:14:02	0.89	5	5	7.2	3.8
26	<i>GX 354-0</i>	24.08	22:20:44	1.69	2	5	8.9	6.7
27	<i>SAX J1712.6-3739</i>	25.08	18:45:43	1.78	2	9	10.1	5.1
28	<i>GX 354-0</i>	27.08	19:59:14	1.82	2	5	8.5	5.9
+29	<i>GX 354-0</i>	28.08	01:24:04	0.91	5	7	7.1	8.8
+30	<i>GX 354-0</i>	28.08	06:01:30	1.86	2	7	7.8	5.7
31	<i>GX 354-0</i>	29.08	14:31:29	2.01	2	5	10.0	6.4

^а - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

^б - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

^в - длительность всплеска

^г - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

^д - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

^е - $\delta T = 10$ с; для остальных всплесков $\delta T = 5$ с (см. текст)

Табл. 6.2 (продолжение)

# ^а	Источник	Максимум всплеска			$\delta t^б$, с	$\Delta T^в$, с	S/N	
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб			IM ^г , σ	LC ^д , σ
2003								
32	<i>GX 354-0</i>	29.08	19:23:36	2.19	2	7	10.4	7.6
+33	<i>GX 354-0</i>	31.08	15:54:18	1.13	3	7	7.6	10.1
+34	<i>GX 354-0</i>	03.09	03:26:34	1.62	2	7	10.6	9.5
+35	<i>GX 354-0</i>	03.09	08:39:32	1.49	2	5	7.0	6.6
36	<i>GX 354-0</i>	03.09	18:02:39	1.08	5	6	7.3	5.6
37	<i>4U 1812-12</i>	06.09	00:23:32	4.04	1	19	11.8	9.3
38	<i>GX 354-0</i>	07.09	20:30:07	1.55	5	6	7.8	5.5
39	<i>GX 354-0</i>	08.09	13:41:36	2.66	1	7	8.8	7.1
+40	<i>4U 1724-307</i>	08.09	18:48:30	1.48	1	44	12.3	10.2
+41	<i>GX 354-0</i>	08.09	19:41:21	2.63	1	8	11.6	9.8
42	<i>GX 354-0</i>	09.09	03:11:36	2.95	1	6	13.1	10.9
43	<i>GX 354-0</i>	09.09	16:28:54	1.45	3	7	7.7	8.6
+44	<i>GX 354-0</i>	09.09	22:22:24	2.58	1	7	10.0	12.0
^е 45	<i>GX 354-0</i>	11.09	05:04:28	3.92	1	7	5.9	5.9
46	<i>GX 354-0</i>	11.09	10:57:50	1.99	2	5	6.5	6.8
+47	<i>GX 354-0</i>	11.09	21:59:51	2.92	1	5	12.3	13.6
+48	<i>GX 354-0</i>	12.09	03:12:25	2.04	1	4	8.5	9.3
+49	<i>GX 354-0</i>	12.09	09:22:40	2.58	1	11	9.2	8.8
50	<i>GX 354-0</i>	13.09	16:40:43	1.03	5	9	6.2	6.8
51	<i>GX 354-0</i>	13.09	22:28:39	2.97	1	6	9.2	6.8
+52	<i>GX 354-0</i>	14.09	15:02:23	2.72	1	5	9.5	9.2
53	<i>GX 354-0</i>	14.09	20:55:10	2.17	2	9	6.7	5.3
54	<i>GX 354-0</i>	15.09	09:40:18	1.71	3	6	6.1	7.4
55	<i>GX 354-0</i>	15.09	15:49:09	3.10	1	4	9.2	8.5
+56	<i>SLX 1735-269</i>	15.09	17:42:29	2.16	1	450	14.9	18.5
57	<i>GX 354-0</i>	17.09	02:42:50	2.79	1	5	11.6	6.1
58	<i>GX 354-0</i>	17.09	08:58:31	2.95	1	7	9.8	7.8
59	<i>GX 354-0</i>	18.09	10:33:36	2.42	1	8	9.6	11.3
+60	<i>GX 354-0</i>	19.09	16:12:10	3.18	1	5	9.1	14.5
61	<i>GX 354-0</i>	20.09	05:40:37	3.70	1	12	14.6	10.2
62	<i>GX 354-0</i>	20.09	23:47:03	3.44	1	10	7.4	8.5

^а - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

^б - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

^в - длительность всплеска

^г - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

^д - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

^е - $\delta T = 10$ с; для остальных всплесков $\delta T = 5$ с (см. текст)

Табл. 6.2 (продолжение)

# ^а	Источник	Максимум всплеска			ΔT^B , с	S/N		
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб		$\delta t^б$, с	IM ^г , σ	LC ^д , σ
2003								
63	<i>GX 354-0</i>	21.09	14:07:40	2.93	1	8	11.8	15.4
64	<i>GX 354-0</i>	22.09	17:38:26	2.81	2	6	9.7	7.5
65	<i>GX 354-0</i>	23.09	02:16:11	2.40	1	7	14.6	11.2
66	<i>SLX 1735-269</i>	23.09	05:11:43	1.04	5	9	8.1	7.4
67	<i>GX 354-0</i>	23.09	10:53:38	2.37	1	5	7.7	7.5
68	<i>GX 354-0</i>	23.09	18:15:09	2.61	1	6	13.4	9.5
69	<i>SLX 1735-269</i>	23.09	23:13:11	1.05	5	8	6.7	6.6
70	<i>GX 354-0</i>	24.09	03:52:12	3.18	1	10	13.0	8.9
+71	<i>GX 354-0</i>	24.09	11:01:26	3.00	1	11	15.2	13.2
^е 72	<i>SAX J1712.6-3739</i>	24.09	14:00:09	2.18	2	18	11.9	5.0
73	<i>GX 354-0</i>	24.09	18:20:21	2.63	1	5	8.0	5.9
74	<i>4U 1608-522</i>	26.09	02:38:55	3.73	1	14	16.2	12.1
+75	<i>4U 1608-522</i>	26.09	15:34:51	3.79	1	11	21.4	18.9
76	<i>4U 1608-522</i>	27.09	05:10:24	4.95	1	12	21.1	33.2
77	<i>4U 1812-12</i>	27.09	16:08:45	3.06	1	17	12.1	8.7
78	<i>GX 354-0</i>	04.10	22:06:42	1.68	2	12	6.9	6.8
79	<i>GX 354-0</i>	05.10	09:34:42	2.72	1	6	9.1	5.0
80	<i>GX 354-0</i>	08.10	09:58:37	1.03	5	5	7.1	10.9
2004								
81	<i>GX 354-0</i>	17.02	04:47:50	3.27	1	7	14.4	11.0
82	<i>IGR J17364-2711</i>	17.02	14:41:30	1.59	1	13	8.7	6.8
83	<i>GX 354-0</i>	19.02	21:06:44	2.13	1	7	10.1	9.9
84	<i>GX 354-0</i>	20.02	02:44:00	2.11	1	8	13.9	12.0
85	<i>GX 354-0</i>	20.02	12:00:23	1.13	4	6	11.2	10.9
+86	<i>GX 354-0</i>	27.02	10:55:16	3.08	1	8	10.6	7.8
+87	<i>GX 354-0</i>	27.02	13:32:36	1.53	2	7	7.5	7.0
+88	<i>GX 354-0</i>	27.02	15:32:03	2.11	1	7	9.3	6.6
89	<i>GX 354-0</i>	02.03	07:34:38	1.52	2	6	7.8	5.8
+90	<i>GX 3+1</i>	02.03	09:25:34	0.98	2	7	7.5	6.4
+91	<i>4U 1724-307</i>	03.03	04:14:60	1.40	3	8	9.0	8.3
92	<i>GX 354-0</i>	08.03	04:14:45	1.03	5	4	8.8	6.5
93	<i>4U 1608-522</i>	20.03	20:59:32	3.72	1	13	11.2	18.1

а - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

б - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

в - длительность всплеска

г - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

д - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

е - $\delta T = 10$ с; для остальных всплесков $\delta T = 5$ с (см. текст)

Табл. 6.2 (продолжение)

# ^а	Источник	Максимум всплеска				ΔT^B , с	S/N	
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб	$\delta t^б$, с		IM ^Г , σ	LC ^Д , σ
2004								
+94	4U 1608 – 522	21.03	01:03:47	1.83	1	10	10.4	9.3
95	Aql X – 1	24.03	17:03:35	1.58	2	9	7.0	7.0
96	GX 354 – 0	29.03	02:40:47	0.99	5	5	6.5	5.6
97	GX 354 – 0	30.03	03:25:33	1.25	5	4	7.2	7.8
98	SLX 1744 – 299	30.03	03:37:46	0.81	5	22	7.6	6.6
99	KS 1741 – 293	30.03	03:43:45	0.88	5	7	6.9	5.7
100	GX 354 – 0	31.03	03:09:05	0.85	5	4	6.4	5.5
101	GX 354 – 0	01.04	23:36:53	0.99	5	5	6.3	5.5
102	Aql X – 1	28.04	07:54:48	1.96	2	7	8.9	8.1
+103	Aql X – 1	01.05	22:56:47	1.89	1	10	7.3	8.6

^а - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

^б - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

^В - длительность всплеска

^Г - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

^Д - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

жесткой компоненты в спектре источника как в спокойном состоянии, так и во время всплеска при снижении потока излучения ниже определенного уровня ([88]). Жесткая компонента во время всплеска была объяснена комптонизацией чернотельного излучения в высокотемпературной плазме, окружающей нейтронную звезду. Комптонизацией же была объяснена двухпиковая структура в мягких каналах (≤ 6 кэВ) в профиле рентгеновского всплеска, зарегистрированного от источника в 1987 г. обсерваторией EXOSAT. Расширения фотосферы, с которым обычно связывают такую структуру, в этом всплеске обнаружено не было ([22]). В 2005 г. от 4U 1608-522 был зарегистрирован супервсплеск длительностью в несколько часов ([96];).

В табл. 6.2 приведены семь всплесков, зарегистрированных телескопом IBIS от этого источника: по два в марте 2003 и 2004 гг. и три в сентябре 2003 г. (всплески 7, 10, 74, 75, 76, 93 и 94). Их регистрация в диапазоне энергий детектора ISGRI свидетельствует о достаточно большой жесткости, позволяя предположить, что они произошли во время низкого состояния источника. Небольшая длительность всплесков 8–14 с, более характерная для всплесков в ярком состоянии источника, может быть опять же связана с жестким диапазоном, в котором проводились наблюдения. Для всплесков I рода характерно уменьшение длительности в жестких каналах по сравнению с мягкими. Всплески имели классическую форму: быстрый подъем и более медленный экспоненциальный спад. В стандартном рентгеновском диапазоне (а два события, 75 и 94, были зарегистрированы также монитором JEM-X) в профилях всплесков вблизи максимума блеска появлялась двухпиковая структура.

Источник 4U 1636-536 известен как рентгеновский барстер, начиная с 1976 г., когда от него был зарегистрирован ряд всплесков спутником OSO-8

([109]). Благодаря высокой частоте и регулярности, всплески от этого источника исследовались всеми последующими рентгеновскими обсерваториями, включая SAS-3, *NaKucho*, *Tenma*, EXOSAT, КВАНТ, RXTE и *ВерроSAX*. Была выявлена значительная переменность (например, [67]) как в форме профиля и пиковом значении потока излучения всплесков (в 6 раз), так и в периоде их рекуррентности (в 24 раза). Телескопом IBIS/ISGRI от этого источника было зарегистрировано два всплеска умеренной интенсивности ~ 1 Краб и длительности ~ 10 с (всплески 5 и 19 в табл. 6.2).

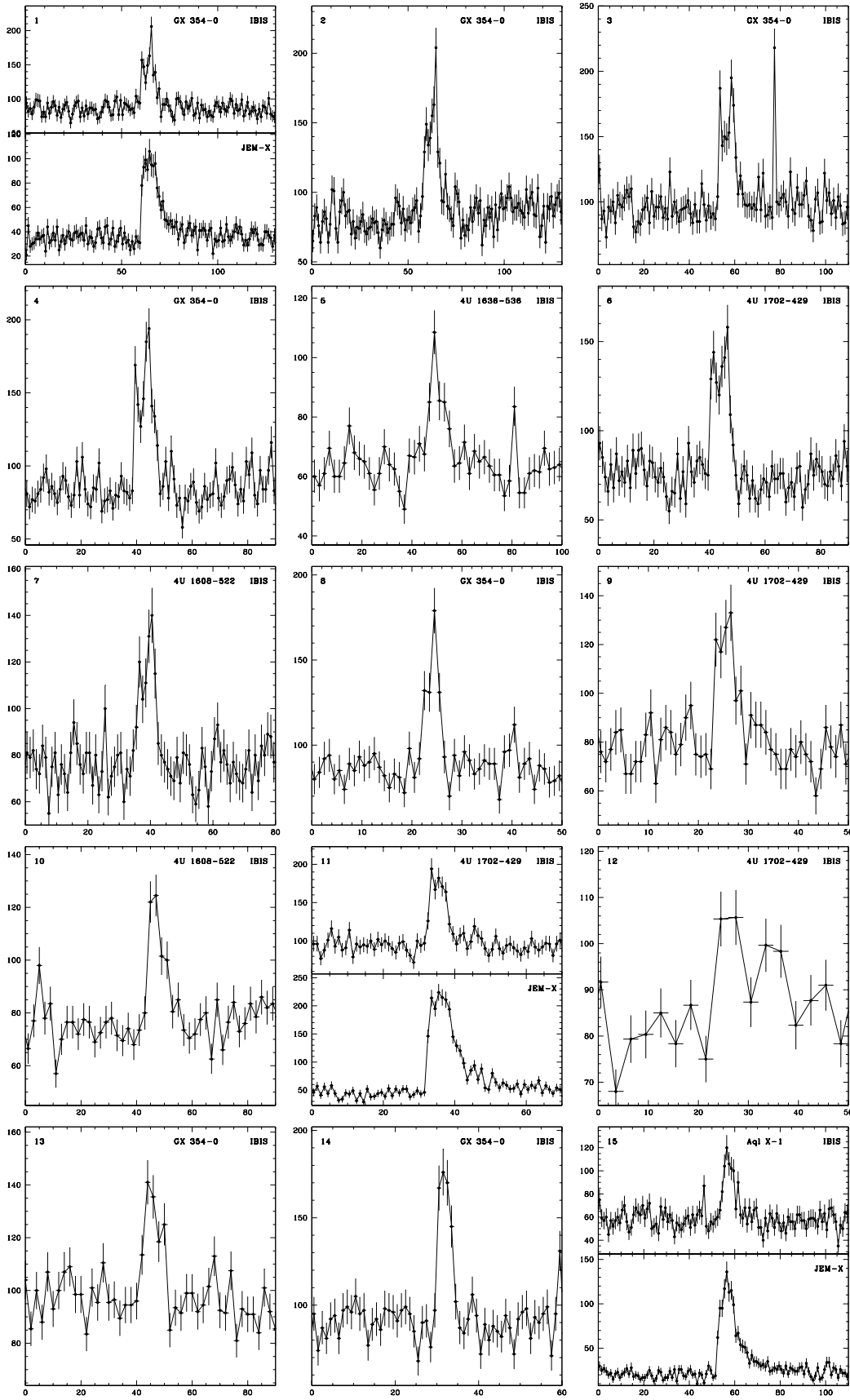
Источник 4U 1702-429 был отождествлен как барстер в 1979 г. по наблюдениям со спутника *NaKucho* ([71]). Возможно, всплески от него наблюдались и ранее спутниками OSO-8 ([110]) и SAS-3 ([73]). Позднее всплески от источника исследовались обсерваториями EXOSAT, КВАНТ, ГРАНАТ, RXTE, *ВерроSAX*. Анализ всплесковой активности источника показал, что она подтверждена изменениям с характерным временем ~ 1 года.

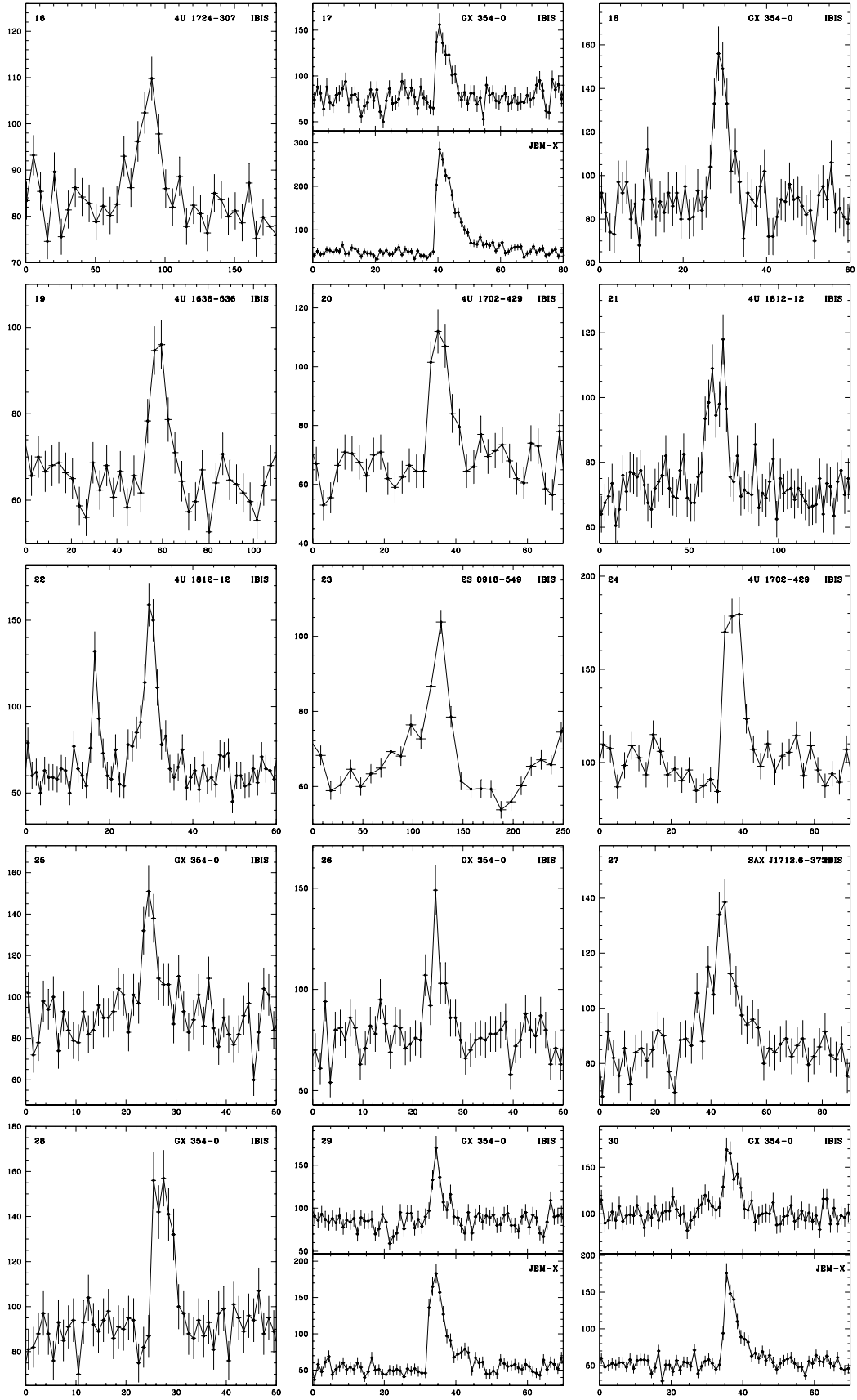
С источником 4U 1702-429 были отождествлены шесть всплесков, обнаруженных телескопом IBIS/ISGRI (табл. 6.2, всплески 6, 9, 11, 12, 20 и 24). Первые три всплеска имели двухпиковую особенность в профиле вблизи максимума блеска (рис. 6.4). Для всплеска под номером 11, который наблюдался монитором JEM-X, подобная структура была выявлена и в профиле в стандартном рентгеновском диапазоне. Эти профили вообще морфологически были похожи и в обоих диапазонах всплеск начался почти одновременно. С другой стороны в стандартном диапазоне пиковый поток был достигнут раньше, а длился всплеск дольше.

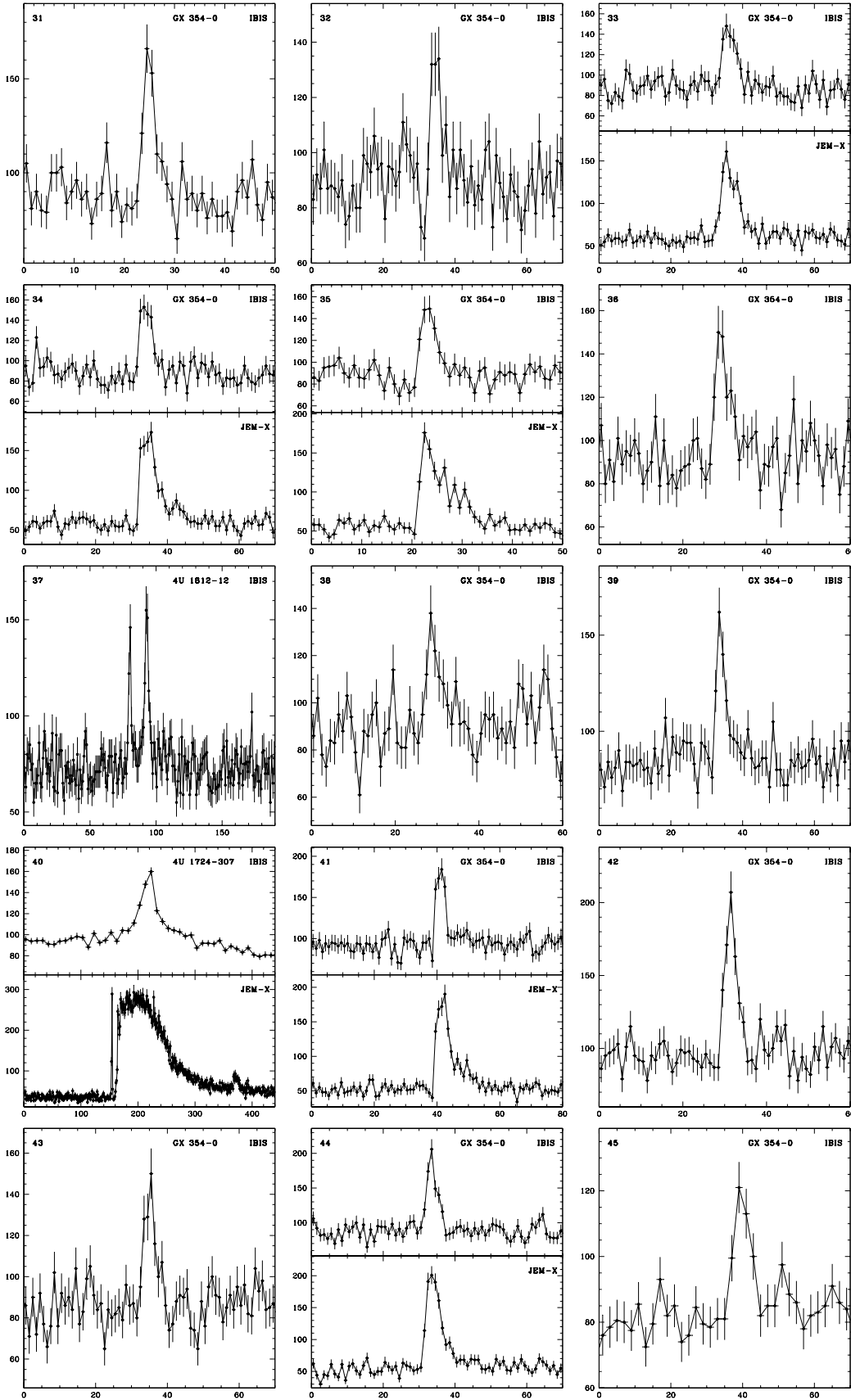
Рентгеновский транзиент SAX J1712.6-3739 был открыт обсерваторией *ВерроSAX* 24 августа 1999 г. в момент вспышки ([41]). В круг ошибок попадал слабый (~ 1.6 мКраб в диапазоне 0.1–2.4 кэВ) рентгеновский источник 1RXS J171237.1-373834 из обзора всего неба спутника ROSAT. Спустя несколько дней, 2 сентября 1999 г., уже после угасания транзиента, из этого направления обсерваторией *ВерроSAX* был зарегистрирован рентгеновский всплеск I рода ([54]). Долгое время этот всплеск оставался единственным известным. С помощью телескопа IBIS/ISGRI удалось зарегистрировать еще два всплеска от источника, представленных в табл. 6.2 под номерами 27 и 72. Оба всплеска имели почти треугольную форму. Проследить эволюцию всплесков в стандартном рентгеновском диапазоне не удалось, т.к. в обоих случаях источник находился вне поля зрения монитора JEM-X.

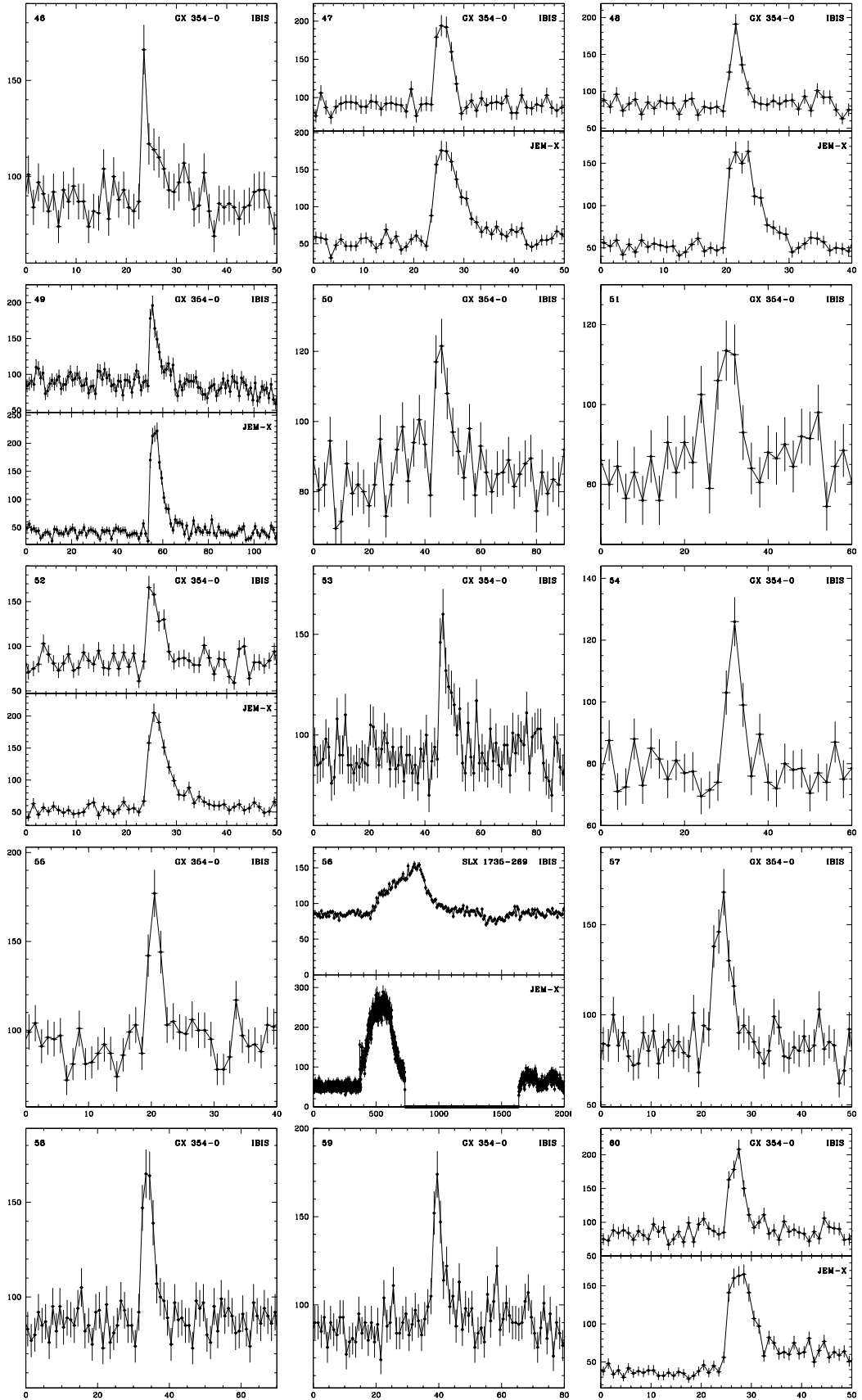
Барстер 4U 1724-307 расположен в шаровом скоплении Терзан 2. Гриндлей ([33]) показал, что именно 4U 1724-307 являлся источником мощного и долгого ($\gtrsim 300$ с) всплеска, зарегистрированного в 1975 г. спутником OSO-8 ([111]). К настоящему времени от источника зарегистрировано еще по крайней мере три мощных всплеска, подобных всплеску 1975 г., с очень сильным фотосферным расширением (телескопом АРТ-П обсерватории ГРАНАТ, прибором РСА обсерватории RXTE и прибором MECS обсерватории *ВерроSAX*; [34], [80]). Зарегистрировано также свыше двух десятков более слабых всплесков.

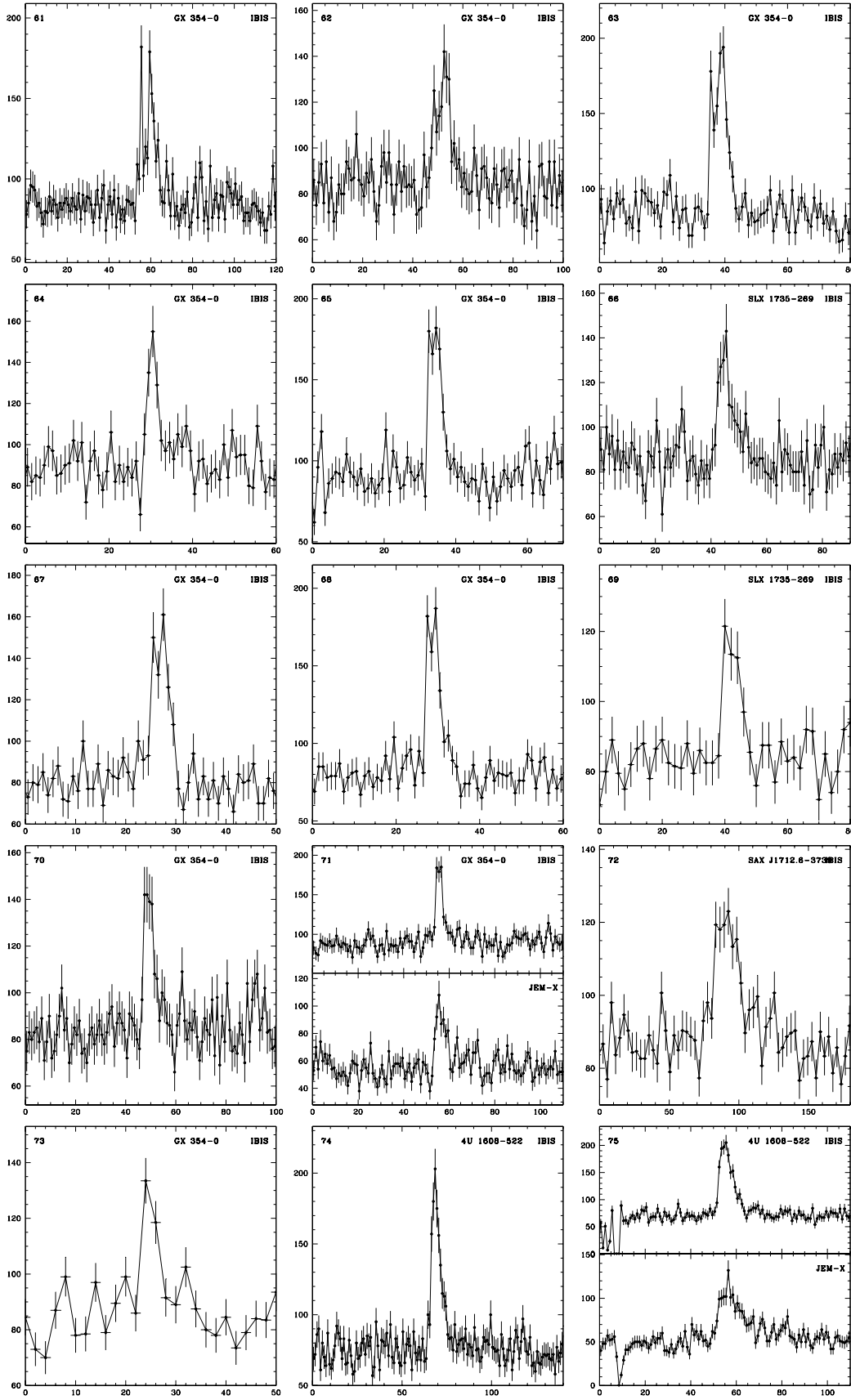
В табл. 6.2 с этим источником связаны три всплеска - 16, 40 и 91. Всплеск под номером 40 пополняет список его известных сверхмощных всплесков. В момент этого всплеска источник находился в центре поля зрения телескопа IBIS и монитора JEM-X, поэтому на рис. 6.4 приведены временные профили этого события в двух диапазонах энергии. Из рисунка видно, что они сильно отличаются: если в мягком диапазоне всплеск характеризовался узким прекурсором и широким основным событием с резким подъемом и долгим (~ 200 с) экспоненциальным

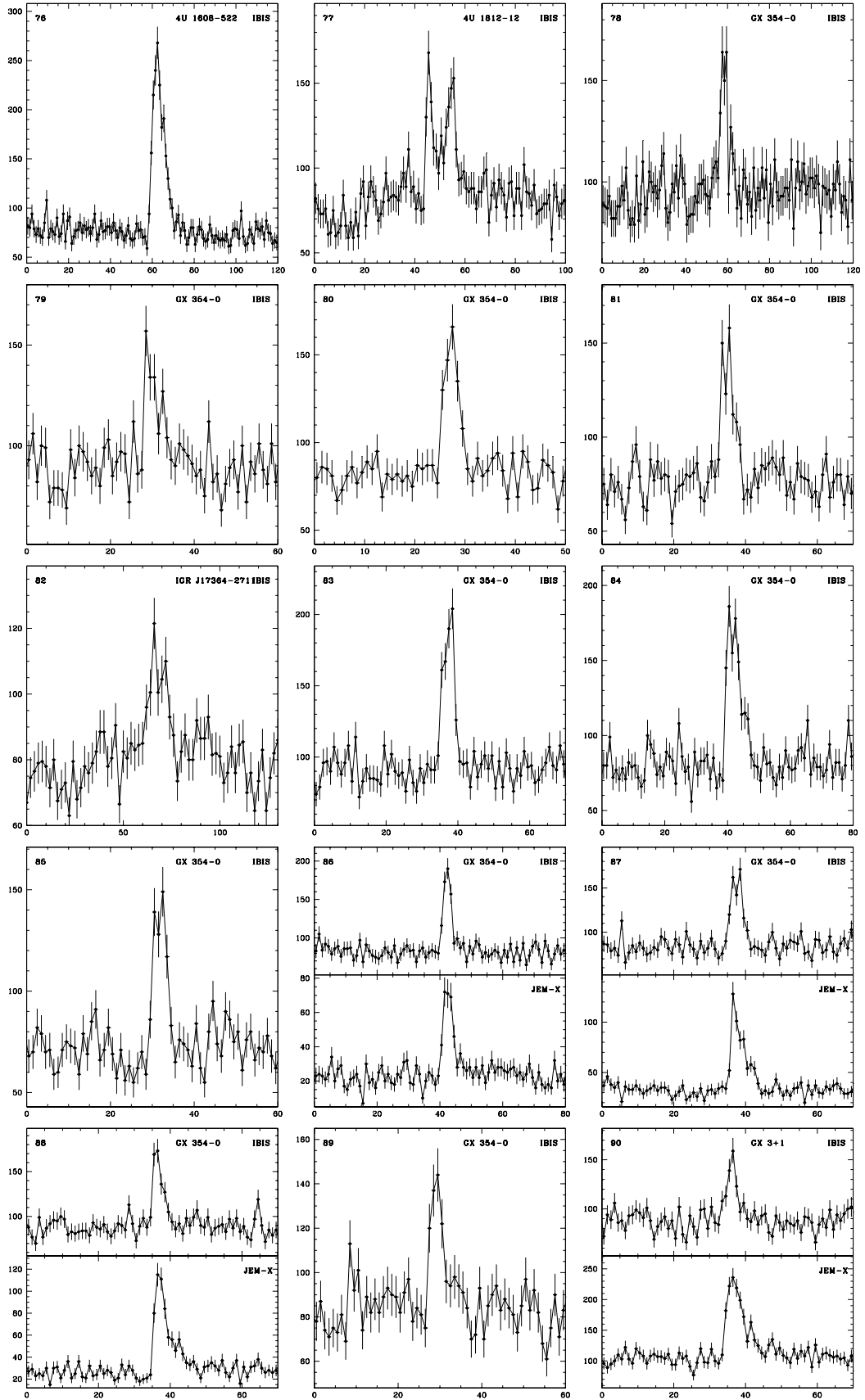












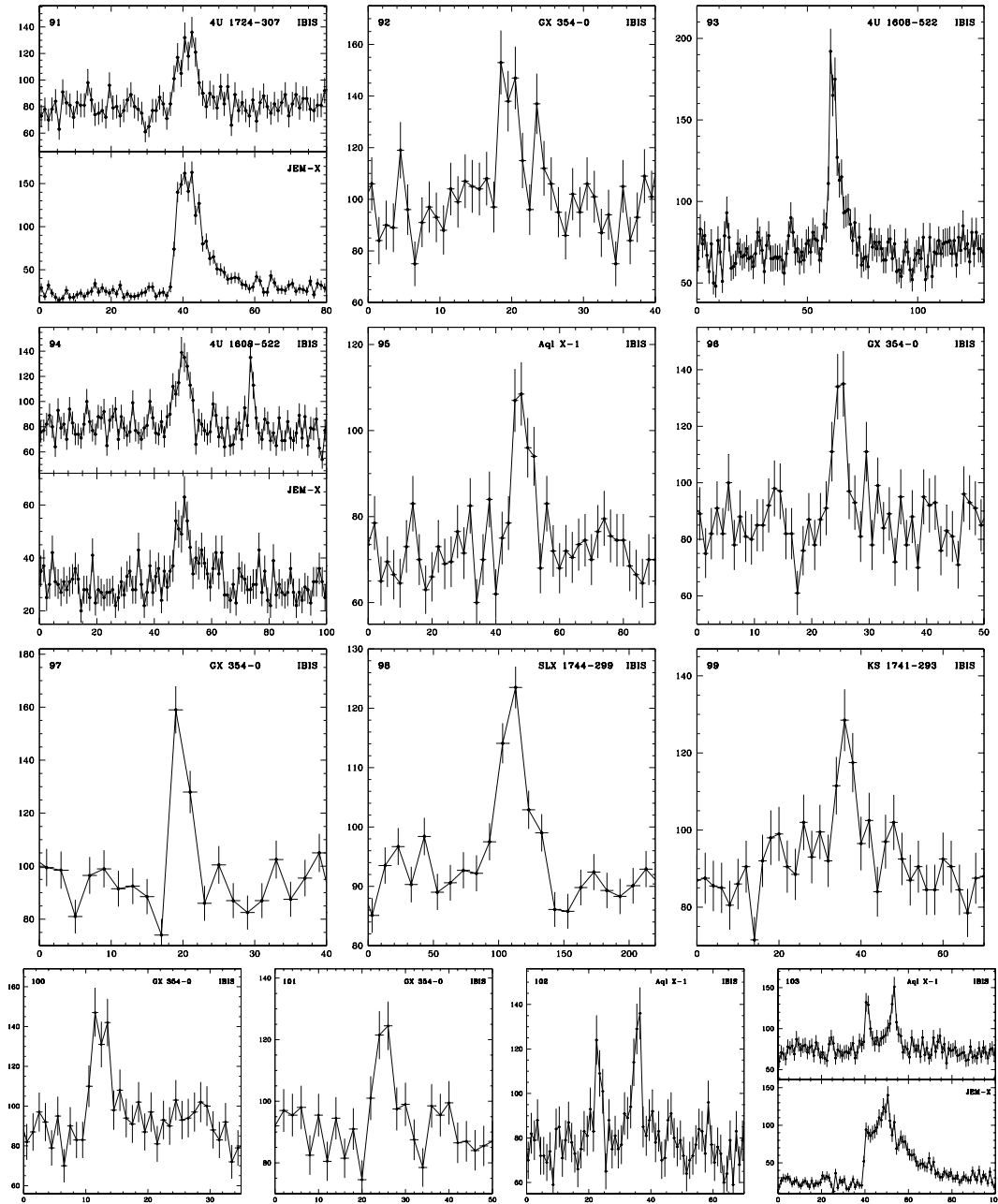


Рис. 6.4. Временные профили 103 рентгеновских всплеска, зарегистрированных детектором IBIS/ISGRI в период с января 2003 г. по май 2004 г. в диапазоне энергий 15–25 кэВ и отождествленных с барстерами. Для случаев, когда всплеск был зарегистрирован монитором JEM-X, приведен также профиль в диапазоне 3–20 кэВ.

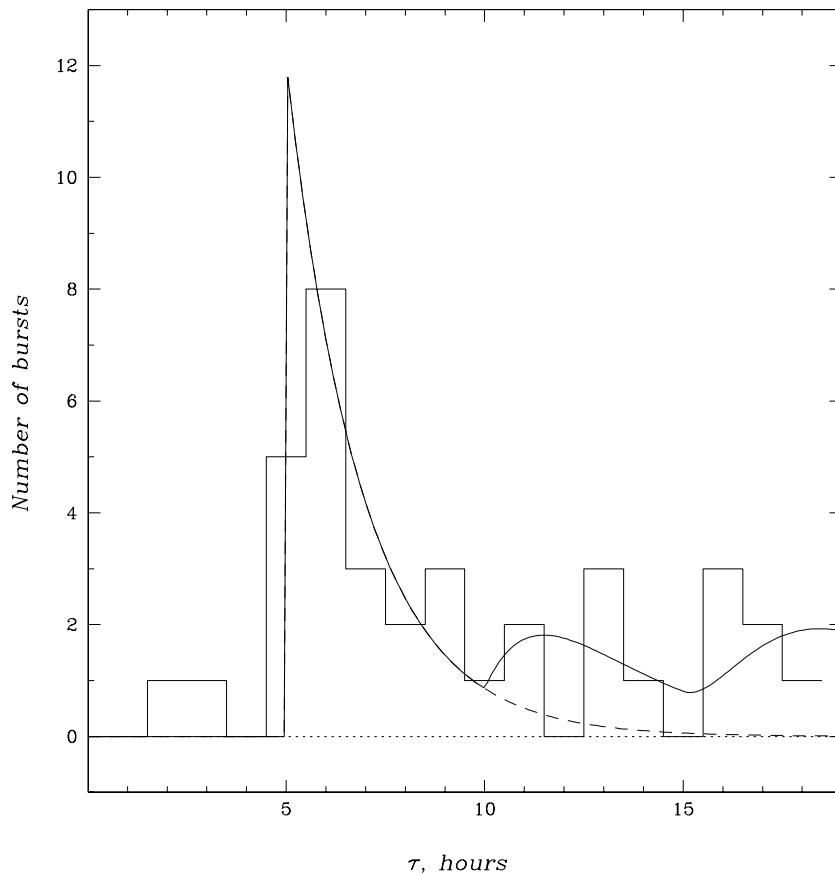


Рис. 6.5. Распределение всплесков рентгеновского барстера GX354-0 по значениям периода рекуррентности, а также его аппроксимация с помощью модели, подробно описанной в тексте.

спадом, т.е. обладал всеми особенностями, характерными для всплесков I рода ([124]), то в жестком диапазоне он имел почти треугольную форму, максимум потока был достигнут значительно позже, чем в мягком диапазоне, а сам всплеск длился лишь ~ 45 с. Отметим, что всплеск 86, который также был зарегистрирован монитором JEM-X, в мягком диапазоне имеет профиль не сильно отличающийся от профиля, измеренного телескопом IBIS.

GX 354-0 (4U 1728-337) явно выделяется среди барстеров, от которых телескопом IBIS/ISGRI были зарегистрированы рентгеновские всплески. Этот источник ответственен более, чем за половину всплесков, приведенных в табл. 6.2 (также для табл. 6.3). Открытый в 1976 г. ([123]), он быстро стал одним из самых известных барстеров. Период рекуррентности его всплесков приходится на диапазон от нескольких часов до десятков часов. Большое число всплесков, зарегистрированных от GX354-0 телескопом IBIS/ISGRI, позволило исследовать статистические распределение всплесков по их времени рекуррентности, длительности и уровню максимального потока.

На рис. 6.5 дано распределение рентгеновских всплесков, зарегистрированных от этого источника, по периоду рекуррентности τ (интервалу времени между моментами регистрации двух последовательных событий). Учтены лишь события с $\tau \leq 20$ ч. Время непрерывных наблюдений источника обычно не превы-

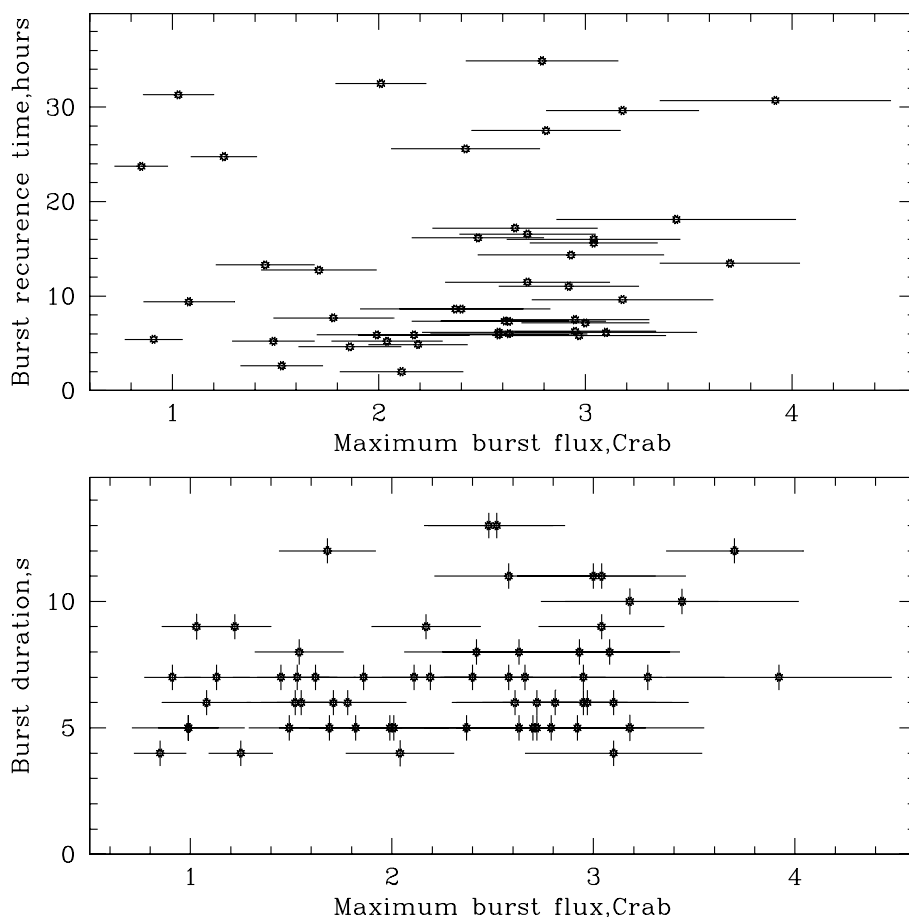


Рис. 6.6. Зависимость периода рекуррентности (вверху) и длительности (внизу) рентгеновских всплесков, зарегистрированных от барстера GX354-0, от значения максимального потока излучения во время всплеска.

шало 20 ч, поэтому между более отдаленными событиями почти наверняка происходили всплески, незарегистрированные детектором. Предположив, что свойства непрерывного излучения источника (например, темп аккреции) не менялись, а распределение всплесков по τ подчинялось в целом пуассоновской статистике, мы аппроксимировали его формулой

$$\frac{dN}{d\tau} = N_0 \lambda e^{-\lambda(\tau - \tau_0)} \theta(\tau - \tau_0).$$

Здесь функция

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 0 \\ 1, & \text{если } x \geq 0 \end{cases}$$

учитывает пороговый характер термоядерных вспышек (следующий всплеск может произойти лишь спустя время τ_0 , необходимое для накопления за счет аккреции критической массы вещества на поверхности звезды), а λ задает средний темп всплесков. Дополнительно мы учли, что некоторые всплески могли быть пропущены, поэтому на рис. 6.5 могут присутствовать также события, соответствующие двойному

$$\frac{dN^{(2)}}{d\tau} = a_2 N_0 \lambda^2 (\tau - 2\tau_0) e^{-\lambda(\tau - 2\tau_0)} \theta(\tau - 2\tau_0)$$

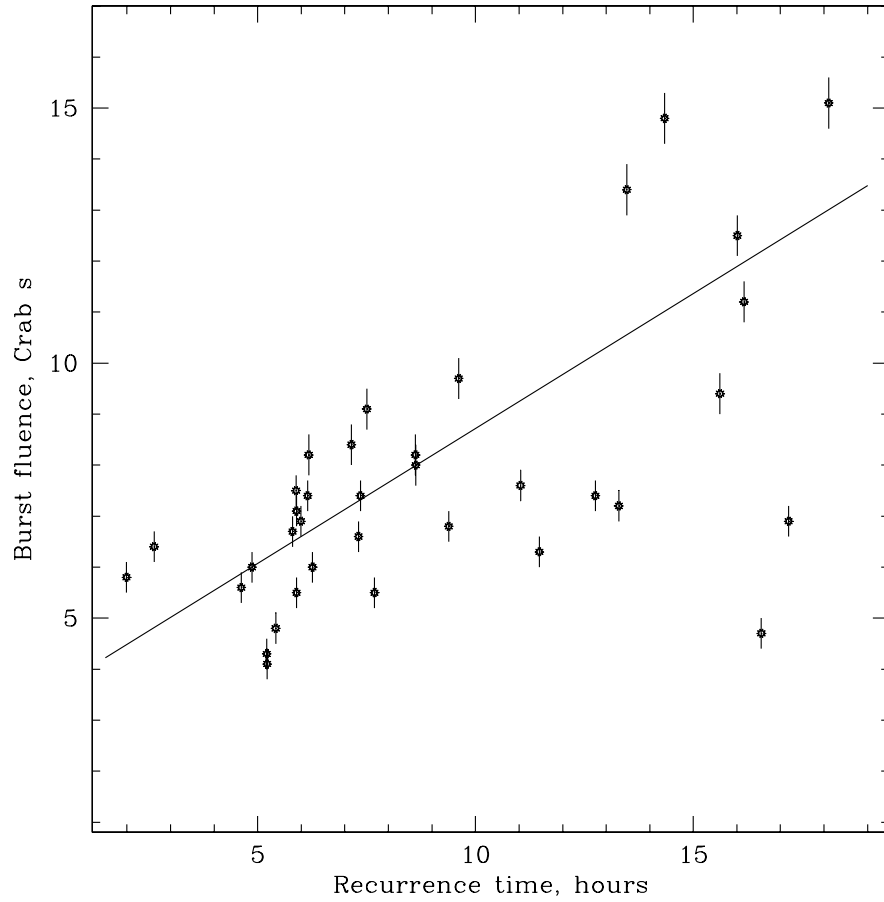


Рис. 6.7. Зависимость полной энергии, выделившейся во время всплесков, зарегистрированных от барстера GX354-0, от длительности предшествующего всплеску спокойного периода и ее аппроксимация линейным законом. Некоторые точки, соответствующие большим значениям периода рекуррентности и маленьким — энерговыделения, связаны с пропуском всплесков, произошедших при перенаведении обсерватории.

и тройному периоду рекуррентности

$$\frac{dN^{(3)}}{d\tau} = a_3 N_0 \lambda^3 \frac{(\tau - 3\tau_0)^2}{2} e^{-\lambda(\tau - 3\tau_0)} \theta(\tau - 3\tau_0).$$

Как показывает сплошная кривая на рис. 6.5, приведенные формулы обеспечивают достаточно хорошее согласие с данными наблюдений. Значение χ^2 , нормированное на число степеней свободы $N = 15$, составило $\chi_N^2 = 1.17$. Параметры аппроксимации: $\lambda = 0.53 \pm 0.05 \text{ ч}^{-1}$, $\tau_0 = 5.0 \pm 0.7$. Доля событий, ошибочно принятых за последовательные, оказалась достаточно большой $a_2 = 0.3 \pm 0.1$ и $a_3 = 0.5 \pm 0.1$ (их вклад показан на рисунке штриховой линией). Среднее значение периода рекуррентности всплесков для данного источника $\langle \tau \rangle = \tau_0 + 1/\lambda \simeq 6.9$ ч.

На рис. 6.6 приведены зависимости периода рекуррентности τ (вверху) и длительности T (внизу) всплесков от максимального потока F . Никаких закономерностей в соотношении между данными величинами выявить не удастся. Однако, если мы рассмотрим зависимость полного энерговыделения во время всплеска (величины, равной произведению среднего потока и длительности

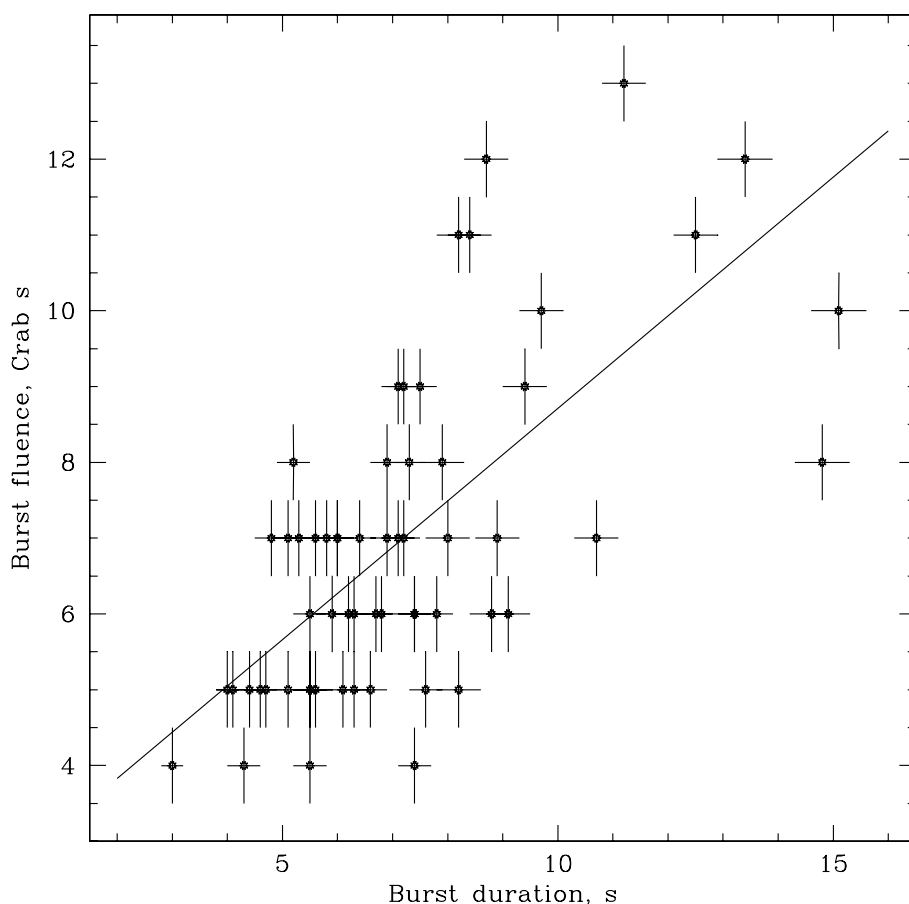


Рис. 6.8. Зависимость полной энергии, выделившейся во время всплесков, зарегистрированных от барстера GX354-0, от длительности всплесков и ее аппроксимация линейным законом.

$E = \langle F \rangle T$) от периода рекуррентности τ , определенная закономерность проявляется (рис. 6.7). Мы аппроксимировали ее с помощью линейного закона $E = E_0 + A\tau$. Такое поведение кажется естественным: чем большим был интервал между всплесками, тем больше накопилось вещества на поверхности нейтронной звезды и тем более мощным был всплеск. Можно даже предположить, что величина $A \simeq \langle F_X \rangle / \alpha$, где $\langle F_X \rangle$ — средний поток непрерывного излучения источника (в единицах потока от Крабовидной туманности), а $\alpha \sim 100$ — фактор, показывающий, насколько энерговыделение при аккреции оказывается эффективнее энерговыделения, связанного с термоядерным горением вещества. Ситуация несколько осложнялась присутствием в выборке событий, соответствующих многократным периодам рекуррентности. Чтобы уменьшить их влияние, при аппроксимации мы учитывали лишь события с $3 \text{ ч} \leq \tau \leq 10 \text{ ч}$. Полученные значения параметров $E_0 = 2.36 \pm 0.23$ Краб с и $A = 0.67 \pm 0.03$ Краб с ч⁻¹. Соответствующий средний поток $\langle F_X \rangle \simeq A\alpha \simeq 19$ мКраб.

На рис. 6.8 показана зависимость энерговыделения от длительности всплеска T . Здесь также наблюдается некоторая закономерность, аппроксимировав которую линейным законом $E = E_1 + BT$, мы нашли $E_1 = 2.61 \pm 0.14$ Краб с и $B = 0.61 \pm 0.02$ Краб с с⁻¹. Подобная линейная зависимость естественным образом возникает в случае ярких всплесков с околоэддингтоновским потоком излучения, но, видимо, остается качественно верной и в случае более слабых вспле-

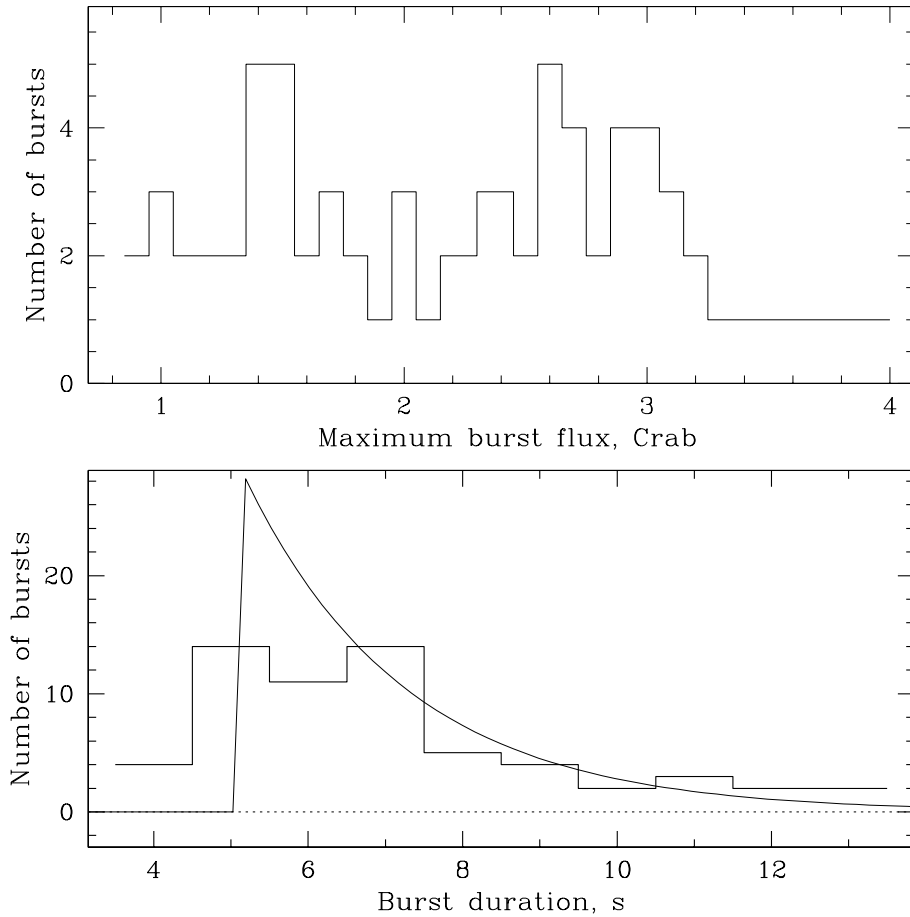


Рис. 6.9. Распределение всплесков рентгеновского барстера GX354-0 по значениям максимального потока излучения во время всплеска (вверху) и продолжительности всплеска (внизу). В последнем случае сплошной кривой показана также аппроксимация наблюдаемого распределения моделью, описанной в тексте.

сков.

На рис. 6.9 приведены распределения числа зарегистрированных всплесков в зависимости от максимального потока излучения F и их длительности T . В целом по потоку всплески распределены достаточно равномерно вплоть до 3.2 Краб. Некоторое превышение числа всплесков наблюдается в областях максимальных значений потока ~ 1.5 Краб и 2.2–3.2 Краб. На данном этапе говорить о существовании двух типов всплесков, характерных для этого источника, по-видимому, преждевременно. Распределение всплесков по их длительности более неравномерно. Большинство всплесков имеют длительность в области 5–7 с. Используя полученные выше зависимости $dN/d\tau$ и $E(\tau)$ и $E(T)$, можно попытаться аппроксимировать распределение числа зарегистрированных всплесков по их длительности

$$\frac{dN}{dT} = \frac{dN}{dE} B = \frac{dN}{d\tau} \frac{B}{A},$$

где $\tau = (BT + E_1 - E_0)/A$. Результат такой аппроксимации показан на рис. 6.9 сплошной линией. Нам пришлось лишь скорректировать нормировку данного распределения, чтобы учесть различие в числе всплесков, представленных на рис. 6.5 и 6.9.

Источник SLX 1735-269 характеризуется жестким степенным рентгеновским спектром, из-за чего природа его компактного объекта долгое время оставалась неопределенной (например, [28]). Первый рентгеновский всплеск от этого источника, поставивший точку в дискуссии о его природе, был зарегистрирован лишь недавно ([5]). В табл. 6.2 этот барстер ответственен за всплески 56, 66 и 69. Свойства первого всплеска, отличающегося необычайно большой длительностью (~ 450 с в диапазоне телескопа IBIS/ISGRI и более 1500 с в диапазоне монитора JEM-X) подробно изучены в работе Молькова и др. ([82]). Всплеск был таким мощным, что привел к насыщению телеметрического канала монитора JEM-X и включению фильтрации, чем и объясняется необычная форма его профиля в стандартном рентгеновском диапазоне на рис. 6.4. В работе Молькова и др. ([82]) приведен восстановленный рентгеновский профиль этого всплеска. Всплески под номером 66 и 69 продолжались ~ 10 с и были значительно менее мощными, чем всплеск под номером 56.

Транзиентный источник KS 1741-293 был открыт и идентифицирован как барстер (два всплеска) модулем КВАНТ во время вспышки 20–22 августа 1989 г. ([40]). Он оказался на самом краю круга ошибок локализации источника рентгеновских всплесков, зарегистрированных спутником SAS-3 из области галактического центра (источник MXB 1743-29). Возможно, это один и тот же источник, но, учитывая, что положение MXB 1743-29 определено плохо, а область эта густо населена, более вероятным кажется случайное совпадение. К тому же, как отметили ин'т Занд и др. ([40]), временные профили зарегистрированных ими всплесков и всплесков, наблюдавшихся спутником SAS-3, сильно отличались.

Источник KS 1741-293 был в ярком состоянии во время наблюдений области галактического центра обсерваторией ИНТЕГРАЛ весной 2003 г. ([8]) и весной 2004 г. ([29]). Единственный отождествленный с ним всплеск в табл. 6.2 (всплеск 99) был зарегистрирован 30 марта 2004 г.

GX 3+1 (4U 1744-265) — один из наиболее ярких рентгеновских источников в поле галактического центра. Известен как барстер с 1983 г. ([72]). Телескопом IBIS/ISGRI от него был зарегистрирован один всплеск (номер 90 в табл. 6.2) умеренной интенсивности, с профилем почти треугольной формы. В мягком рентгеновском диапазоне (а всплеск был зарегистрирован также монитором JEM-X) его профиль был ближе к каноническому профилю всплеска I рода (рис. 6.4).

Источник SLX 1744-299 был открыт обсерваторией Spacelab 2 в 1987 г. ([99]). Позже из этого направления был зарегистрирован рентгеновский всплеск ([100]), показавший, что, на самом деле, здесь скрывается пара близких (разделенных лишь $\sim 2.8'$) источников, SLX 1744-299 и SLX 1744-300, последний из которых является барстером. В 1990 г. в ходе интенсивных наблюдений области галактического центра телескопом АРТ-П обсерватории ГРАНАТ (Павлинский и др., 1994) были зарегистрированы еще 5 всплесков, в том числе один очень мощный и долгий ~ 300 с. Этот всплеск был отождествлен с SLX 1744-299, т.е. первый источник также оказался барстером. Телескопом IBIS/ISGRI от этих источников был зарегистрирован всплеск 98 в табл. 6.2.

Источник 4U 1812-12 был впервые идентифицирован как барстер Мураками и др. ([87]). С тех пор и до наблюдений обсерваторией ИНТЕГРАЛ от него было зарегистрировано всего 12 всплесков. Четыре из всплесков, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI, были связаны с этим барстером (всплески 21, 22, 37 и 77 в табл. 6.2). Все эти всплески имели четко выраженную двухпиковую структуру профиля, причем во всплесках 22, 37 и 77 можно говорить о двух отдельных пиках равной амплитуды, разнесенных на 15–20 с. Похожие профили

Табл. 6.3. Рентгеновские всплески, зарегистрированные телескопом IBIS/ISGRI в диапазоне энергии 15-25 кэВ в 2004 г.

# ^а	Источник	Максимум всплеска			ΔT^B , с	S/N		
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб		$\delta t^б$, с	IM ^Г , σ	LC ^д , σ
2004								
+104	<i>GX 354-0</i>	22.08	14:37:53	1.75	2	7	11.6	8.9
+105	<i>SLX 1735-269</i>	23.08	17:23:59	1.04	2	46	11.7	10.2
106	<i>GX 354-0</i>	23.08	21:53:59	1.59	2	7	8.3	6.0
107	<i>GX 354-0</i>	01.09	01:22:21	0.77	5	6	6.5	5.4
108	<i>GX 354-0</i>	01.09	15:25:02	1.65	2	8	10.4	8.5
+109	<i>GX 354-0</i>	01.09	19:26:43	1.61	3	5	7.9	5.3
+110	<i>GX 354-0</i>	01.09	23:12:18	1.44	2	6	7.7	9.5
111	<i>GX 354-0</i>	02.09	03:23:25	2.80	1	7	8.1	10.0
112	<i>GX 354-0</i>	02.09	07:16:21	1.65	2	7	7.7	6.5
113	<i>GX 354-0</i>	03.09	14:32:30	2.97	1	4	8.0	4.6
114	<i>GX 354-0</i>	03.09	18:39:35	1.83	2	8	7.8	6.0
115	<i>GX 354-0</i>	03.09	23:17:42	1.66	2	8	9.9	8.7
116	<i>GX 354-0</i>	04.09	09:06:02	3.40	1	5	6.5	5.7
117	<i>GX 354-0</i>	04.09	16:19:11	0.84	2	6	8.0	4.9
118	<i>GX 354-0</i>	04.09	23:50:03	3.55	2	5	7.7	4.6
+119	<i>4U 1702-429</i>	07.09	10:51:47	2.26	1	5	8.9	9.6
120	<i>GX 354-0</i>	07.09	11:09:51	1.69	5	4	5.9	3.8
121	<i>GX 354-0</i>	07.09	14:27:14	3.01	1	4	8.8	5.8
122	<i>GX 354-0</i>	07.09	18:04:56	1.03	4	5	8.2	6.5
+123	<i>GX 354-0</i>	07.09	21:30:48	1.29	2	7	6.5	5.0
124	<i>GX 354-0</i>	08.09	01:54:26	2.61	1	7	10.1	6.8
125	<i>GX 354-0</i>	08.09	09:00:22	1.94	2	5	6.9	3.0
+126	<i>GX 354-0</i>	08.09	12:41:39	1.79	2	5	7.9	8.9
127	<i>GX 354-0</i>	08.09	15:50:10	3.27	1	8	8.3	3.5
128	<i>4U 1702-429</i>	08.09	17:43:26	1.05	3	6	6.2	5.2
+129	<i>4U 1636-536</i>	11.09	04:16:54	1.36	2	8	8.3	4.8
130	<i>GX 354-0</i>	15.09	12:56:11	1.45	2	3	7.1	5.6
+131	<i>GX 354-0</i>	19.09	12:00:32	1.39	2	5	7.2	5.6
132	<i>GX 354-0</i>	22.09	17:37:15	1.44	3	5	7.9	5.9
+133	<i>GX 354-0</i>	23.09	04:10:50	1.56	2	4	6.6	7.0
134	<i>GX 354-0</i>	23.09	07:37:29	0.97	4	7	6.7	4.3
135	<i>GX 354-0</i>	30.09	11:47:22	1.74	4	6	7.7	7.8

^а - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

^б - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

^в - длительность всплеска

^г - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

^д - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

Табл. 6.3 (продолжение)

# ^а	Источник	Максимум всплеска			$\delta t^б$, с	$\Delta T^в$, с	S/N	
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб			IM ^г , σ	LC ^д , σ
2004								
136	GX 354 – 0	30.09	14:54:25	2.50	1	7	11.7	11.4
137	GX 354 – 0	01.10	03:11:27	0.45	1	6	7.1	8.6
138	GX 354 – 0	01.10	06:53:21	2.27	1	6	8.5	10.5
139	GX 354 – 0	01.10	14:28:34	2.60	2	5	9.8	5.4
140	GX 354 – 0	01.10	22:11:34	2.60	1	4	9.4	4.8
141	GX 354 – 0	02.10	01:58:58	2.45	2	7	7.5	7.2
+142	GX 354 – 0	02.10	05:59:15	2.46	1	7	7.8	10.1
143	GX 354 – 0	02.10	10:12:10	1.71	2	5	11.2	7.5
144	GX 354 – 0	02.10	14:16:06	3.06	2	5	8.4	4.6
+145	GX 354 – 0	02.10	21:50:09	3.05	1	9	12.1	12.5
+146	GX 354 – 0	16.10	07:27:17	1.20	3	4	6.7	5.5
+147	GX 354 – 0	17.10	10:58:54	1.25	3	7	6.7	5.8
+148	GX 354 – 0	20.10	06:37:13	1.05	3	6	6.5	6.9
149	GX 354 – 0	20.10	11:35:45	1.35	4	6	8.4	8.0
2005								
150	4U 1702 – 429	18.02	15:35:56	1.92	5	8	8.5	5.4
151	4U 1702 – 429	19.02	02:26:13	2.03	2	8	11.0	9.6
152	4U 1702 – 429	19.02	14:27:24	2.84	2	6	9.5	8.3
+153	4U 1636 – 536	19.02	15:38:52	1.34	2	5	6.5	5.9
154	GX 354 – 0	21.02	10:06:19	1.17	5	5	8.8	5.0
155	4U 1636 – 536	22.02	13:48:56	1.14	5	9	8.3	6.1
+156	4U 1702 – 429	24.02	20:22:07	1.13	4	10	7.4	9.9
+157	4U 1702 – 429	25.02	04:53:55	2.27	1	6	10.2	2.0
158	4U 1702 – 429	25.02	13:58:35	1.80	2	6	7.8	6.4
159	4U 1702 – 429	27.02	16:08:41	2.47	1	10	9.3	4.1
160	4U 1608 – 522	03.03	19:46:16	3.80	1	11	15.1	12.7
161	4U 1608 – 522	04.03	13:13:59	2.09	2	4	9.2	6.2
162	4U 1608 – 522	05.03	22:37:27	2.56	1	17	12.7	12.2
163	4U 1636 – 536	06.03	01:25:52	1.37	4	7	6.3	5.9
+164	4U 1608 – 522	06.03	12:30:56	4.21	1	9	18.6	11.8
+165	4U 1608 – 522	06.03	22:55:52	5.02	1	35	15.7	7.7
+166	4U 1608 – 522	08.03	07:56:40	5.07	1	14	12.8	19.5
+167	4U 1608 – 522	09.03	14:08:27	4.27	1	9	14.7	10.6

а - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

б - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

в - длительность всплеска

г - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

д - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

Табл. 6.3 (продолжение)

# ^а	Источник	Максимум всплеска				ΔT^B , с	S/N	
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб	$\delta t^б$, с		IM ^г , σ	LC ^д , σ
2005								
+168	GX 354-0	17.03	08:16:32	1.11	4	5	8.0	5.5
169	GX 354-0	18.03	23:12:29	2.80	1	6	10.9	7.3
170	GX 354-0	20.03	19:38:07	2.50	2	5	9.0	5.4
171	GX 354-0	20.03	23:28:19	2.33	2	7	9.8	5.7
172	GX 354-0	22.03	01:24:37	2.33	1	6	9.0	4.9
173	GX 354-0	23.03	11:44:33	1.68	2	6	8.1	5.1
174	GX 354-0	24.03	15:39:10	1.75	2	4	7.3	6.2
+175	GX 354-0	24.03	21:14:22	2.43	1	6	11.9	8.9
+176	GX 354-0	25.03	02:22:48	2.53	2	5	12.2	5.4
177	GX 354-0	26.03	09:05:20	3.08	1	14	10.2	5.2
178	GX 354-0	28.03	01:47:04	0.73	2	6	8.4	4.8
179	GX 354-0	04.04	01:17:29	1.39	3	4	6.2	6.4
180	4U 1702-429	04.04	04:55:51	2.92	2	9	8.8	6.2
181	4U 1702-429	06.04	08:56:54	1.81	2	9	9.6	3.2
182	GX 354-0	07.04	10:06:45	0.90	5	4	6.8	6.1
183	4U 1702-429	08.04	06:04:19	2.04	2	17	10.0	11.6
+184	4U 1812-12	28.04	06:00:38	4.65	1	12	17.0	15.7
185	GX 354-0	12.08	16:47:26	1.11	5	6	6.3	5.1
186	4U 1608-522	12.08	22:09:58	3.99	1	5	6.9	6.4
187	GX 354-0	17.08	03:06:31	2.16	2	5	7.5	6.7
188	4U 1608-522	17.08	08:55:27	3.67	1	6	8.7	9.3
189	GX 354-0	25.08	16:19:41	2.50	2	6	6.3	6.0
190	4U 1636-536	25.08	21:28:22	0.89	4	7	6.3	4.5
191	4U 1702-429	26.08	07:07:35	2.59	2	5	9.6	5.2
192	4U 1608-522	26.08	10:51:25	5.11	1	14	20.1	25.2
+193	4U 1608-522	27.08	11:34:03	4.60	1	18	19.3	20.2
194	GX 354-0	28.08	13:24:16	2.90	3	4	7.1	4.2
195	GX 354-0	28.08	21:39:42	2.27	2	6	10.3	5.8
196	GX 354-0	29.08	08:29:35	2.10	2	7	9.5	6.8
197	4U 1608-522	29.08	10:39:19	4.52	1	12	15.5	8.5
+198	4U 1636-536	29.08	13:47:36	0.82	5	8	7.0	5.5

а - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

б - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

в - длительность всплеска

г - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

д - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

Табл. 6.3 (продолжение)

# ^a	Источник	Максимум всплеска			ΔT^B , с	S/N			
		дата, UTC	время, ч:м:с	поток, Краб		IM ^Г , σ	LC ^Д , σ		
2005									
+199	4U 1702 – 429	30.08	06:21:50	3.00	1	9	16.2	11.6	
200	GX 354 – 0	30.08	12:10:38	4.62	1	6	11.1	3.2	
201	4U 1702 – 429	30.08	16:45:34	1.32	3	6	7.9	4.4	
+202	4U 1636 – 536	04.09	16:48:35	1.38	2	4	7.1	6.1	
+203	4U 1608 – 522	04.09	21:28:47	2.35	1	6	11.9	14.1	
204	GX 354 – 0	18.09	20:41:52	3.09	1	6	10.8	2.7	
205	GX 354 – 0	19.09	12:41:51	2.33	2	5	9.2	7.6	
206	GX 354 – 0	19.09	16:11:59	1.97	2	5	11.5	8.3	
207	GX 354 – 0	24.09	20:25:07	1.87	2	7	6.9	5.3	
208	GX 354 – 0	25.09	14:55:49	1.52	3	5	10.0	4.4	

^a - знаком "+" отмечены всплески, зарегистрированные также телескопом JEM-X

^b - интервал вблизи максимума всплеска, использованный для вычисления потока

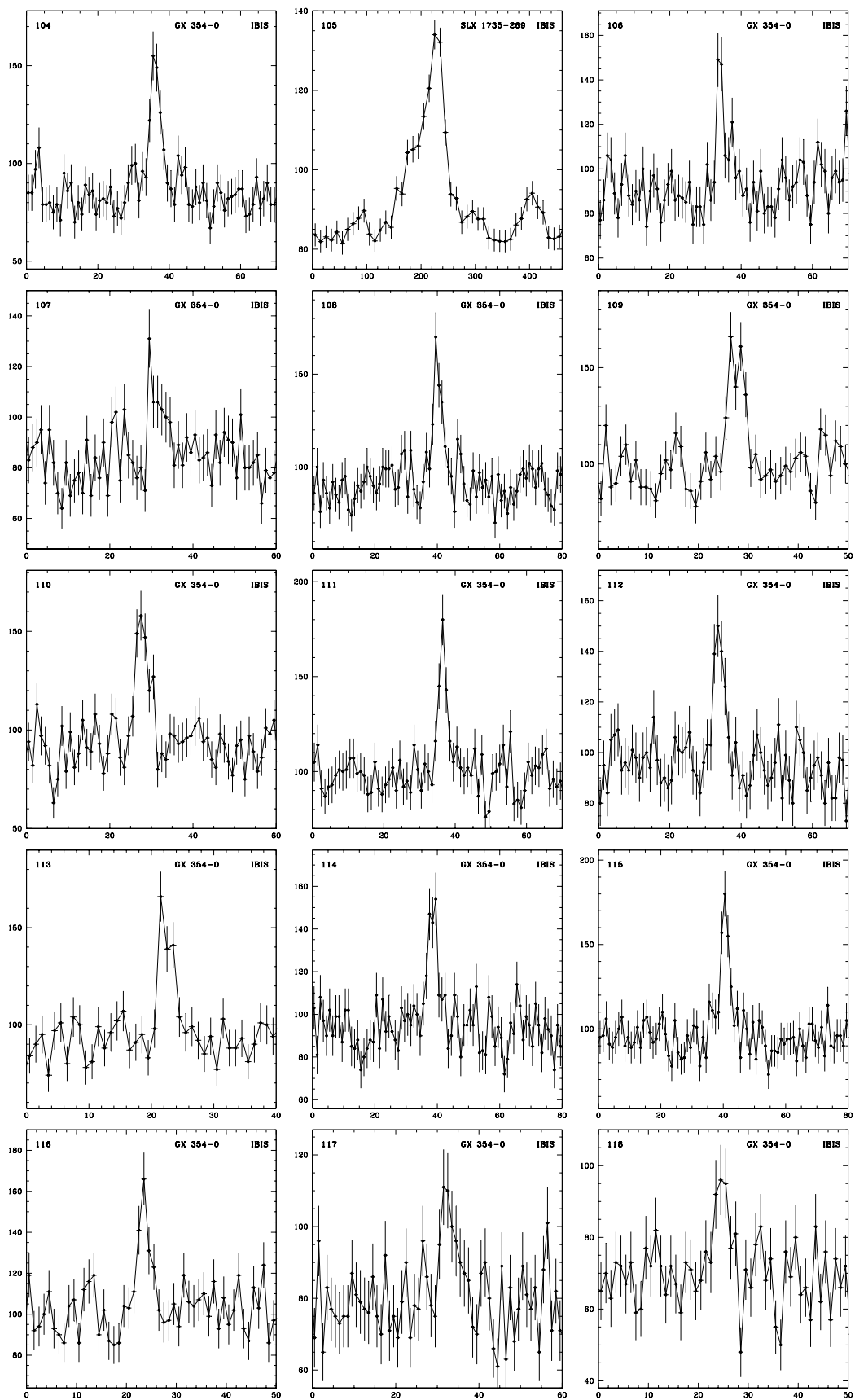
^c - длительность всплеска

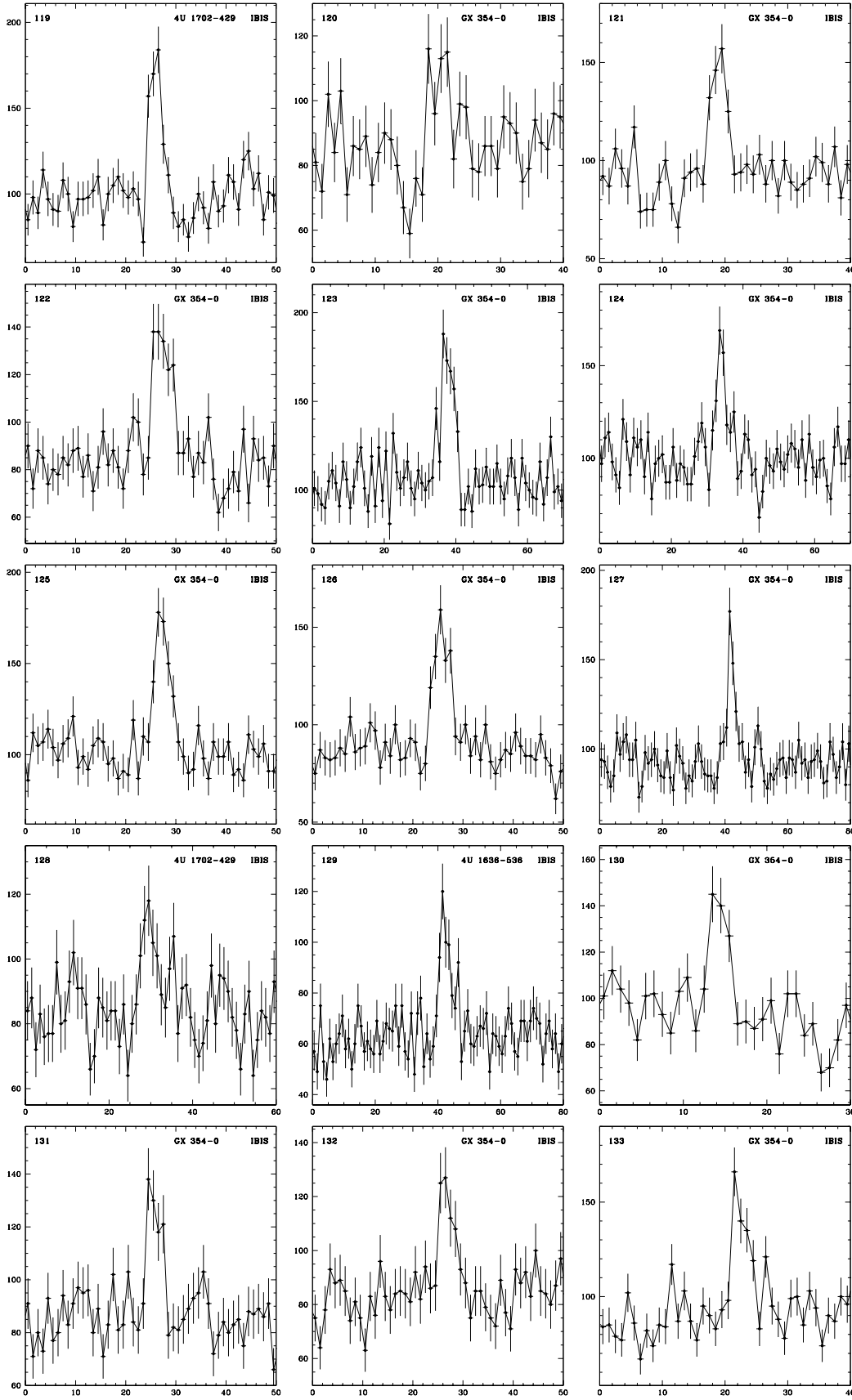
^d - значимость регистрации источника на изображении во время интервала δt

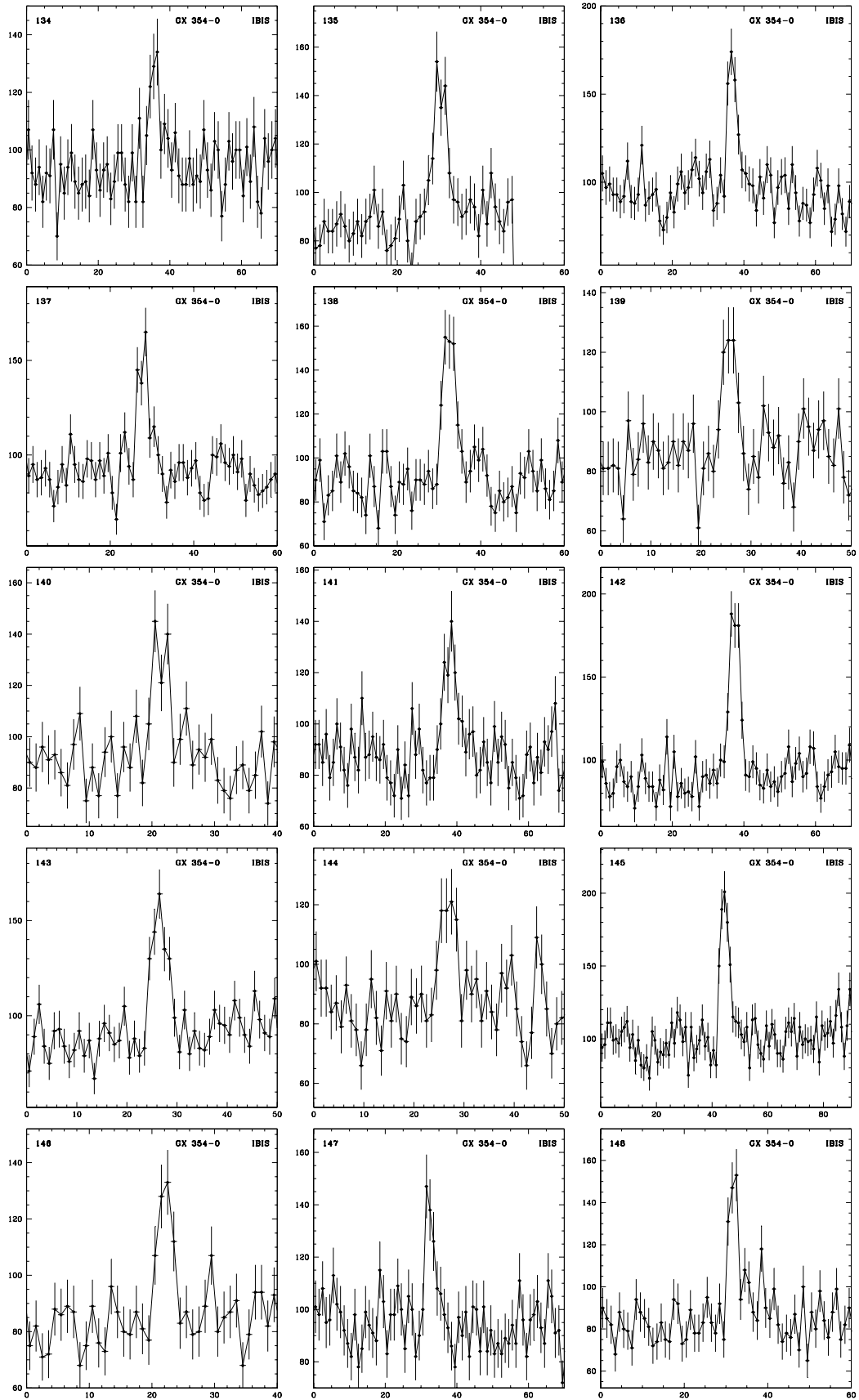
^e - значимость регистрации источника по скорости счета детектора

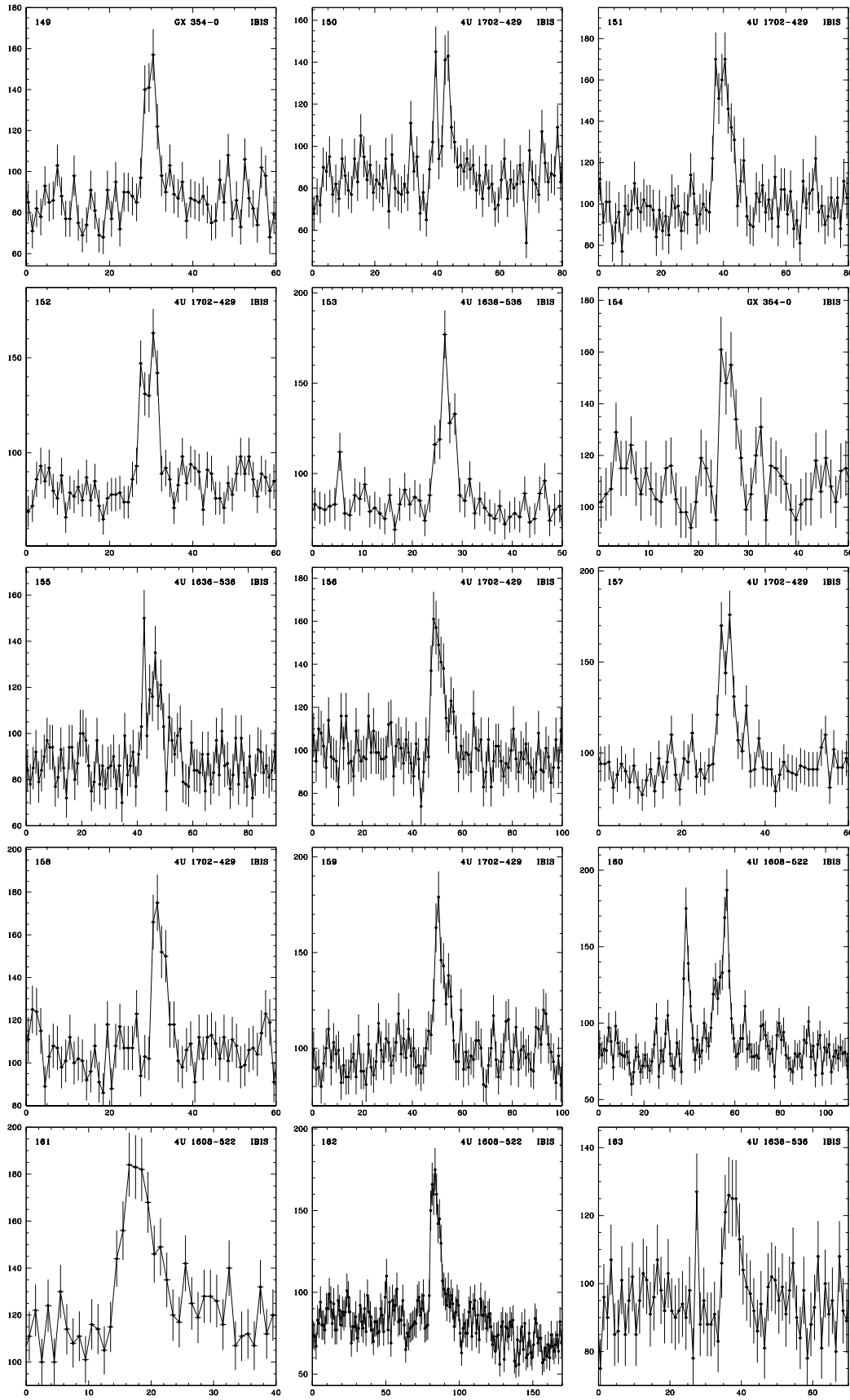
наблюдались у большинства всплесков, зарегистрированных в 1996–99 гг. обсерваторией ВерроSAX, что было объяснено достижением сверхэддингтоновской светимости во время всплеска и использовано для оценки расстояния до источника $D \simeq 4$ кпк.

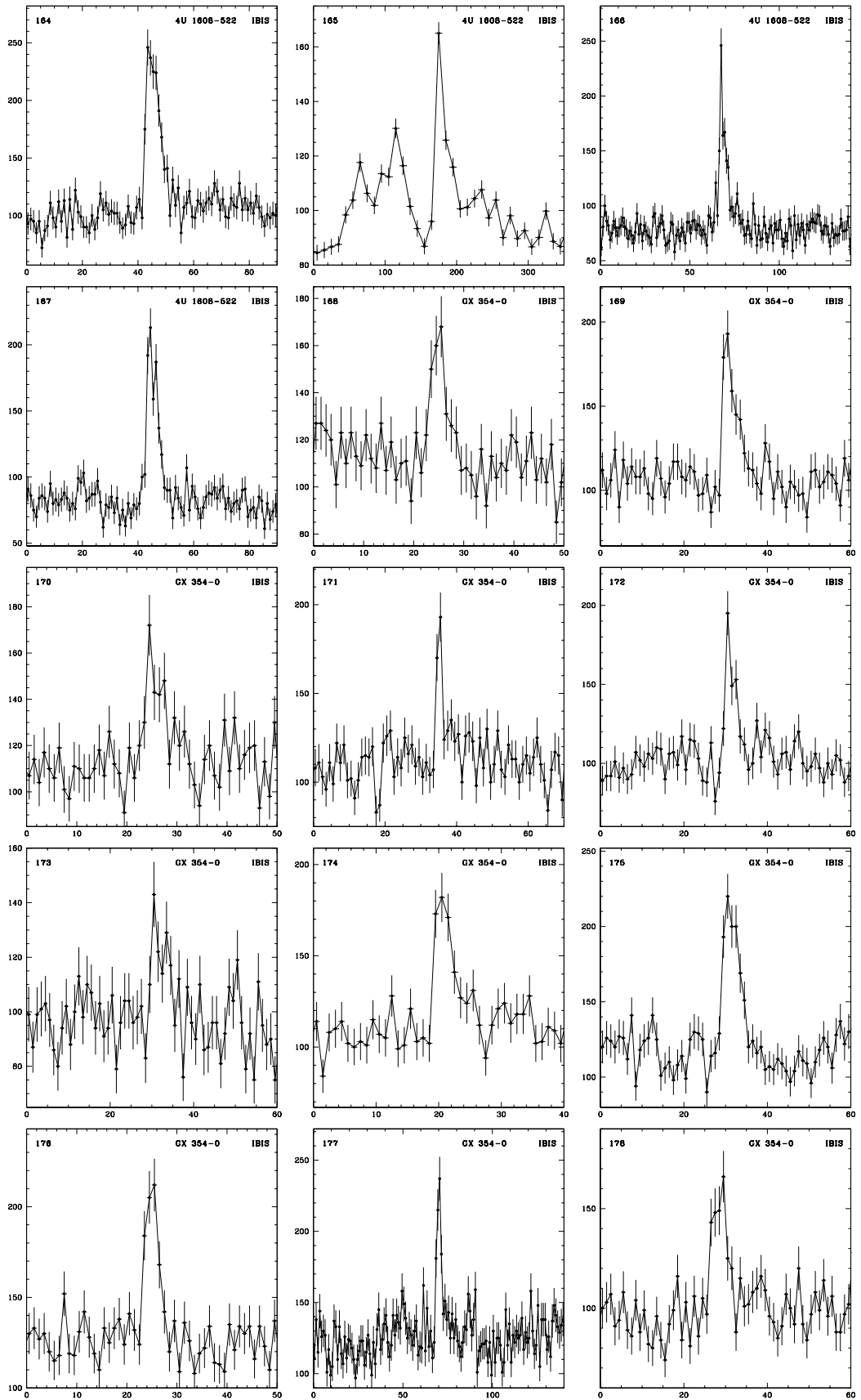
Транзиентный барстер Aql X-1 (4U 1908+005) имеет много общего с вышеупомянутым источником 4U 1608-522. Рентгеновские всплески от него впервые наблюдались в мае 1980 г. обсерваторией Nakucho ([56]). Телескопом IBIS/ISGR1 от этого барстера в течение рассмотренного периода наблюдений было зарегистрировано четыре всплеска (табл. 6.2, всплески 15, 95, 102 и 103). Всплески 15 и 103 наблюдались также монитором JEM-X. Регистрация монитором JEM-X всплеска 15 была впервые отмечена в работе Молькова ([81]), в которой подробно обсуждались наблюдения обсерваторией ИНТЕГРАЛ рентгеновской вспышки источника, произошедшей весной 2003 г. Там же упоминалось о регистрации еще одного рентгеновского всплеска через ~ 2.5 часа после первого. Наш анализ показал, что этот всплеск был слишком мягким для того, чтобы он мог быть зарегистрирован детектором ISGR1. Временные профили всплесков 102 и 103 в жестком диапазоне характеризуются двухпиковой структурой с отдельно стоящим прекурсором. В мягком диапазоне (по крайней мере в случае всплеска 97) прекурсор сливается с основным событием и максимальный поток достигается в промежутке между двумя жесткими пиками. Длительность всплеска в рентгеновском диапазоне заметно превышает его длительность на жестких энергиях.

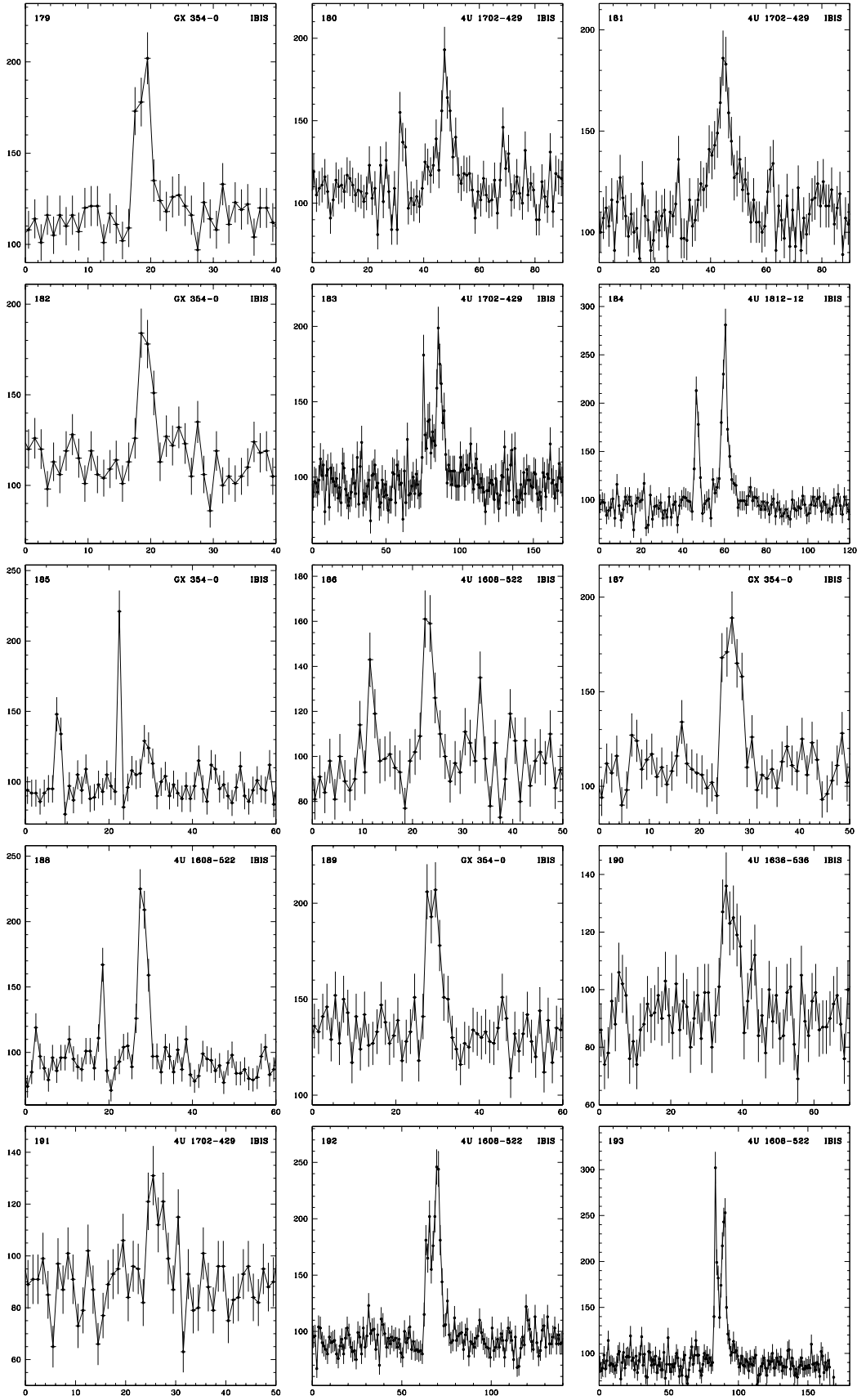












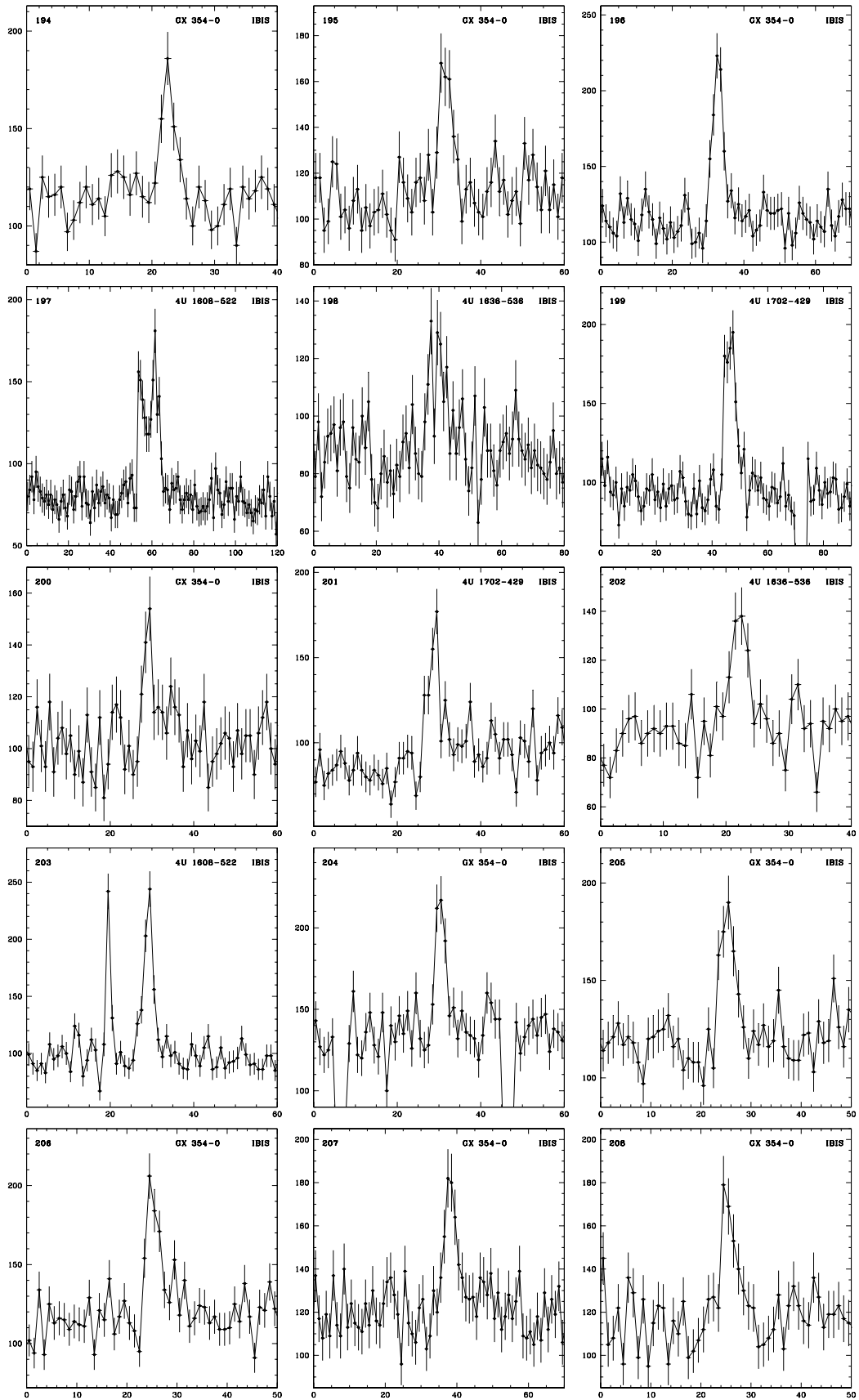


Рис. 6.10. Временные профили 105 рентгеновских всплесков, зарегистрированных детектором IBIS/ISGR1 в период с августа 2004 г. по ноябрь 2005 г. в диапазоне энергий 15–25 кэВ и отождествленных с барстерами.

Табл. 6.4. Кросс-корреляция всплесков, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI, и событий в экспериментах SPI/ACS и GOES с 3 июля 2004 г по 26 сентября 2005 г.

Инструмент	ISGRI	ISGRI ^a	ISGRI ^b + GOES	ISGRI ^b + ACS	ISGRI ^b + GOES+ACS
Всплески	823	198	155	26	8

^a- локализованные и отождествленные всплески ISGRI

^b- нелокализованные всплески ISGRI

6.3.3 Другие источники всплесков

Восемнадцать из локализованных всплесков нам удалось связать с источниками, не относящимися к барстерам: космические гамма-всплески, GRS 1915+105, Vela X-1,4U 1700-377. Учитывая специфику данной работы, мы ограничимся лишь упоминанием о них. Как уже упоминалось, еще 69 событий, зарегистрированных детектором ISGRI, были также зарегистрированы антисовпадательной защитой гамма-спектрометра SPI, но не были зарегистрированы мониторами GOES, т.е. вероятно являются гамма-всплесками, произошедшими вне поля зрения телескопа IBIS.

Даже после учета всех этих событий, а также вероятных 145 солнечных вспышек (событий зарегистрированных монитором GOES) остается 748 зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI, но неотожествленных всплесков. Часть из них несомненно связана с приборными эффектами, например, возбуждением на короткое время элементов детектора ISGRI. Многие всплески оказались слишком слабыми, чтобы быть достоверно выявленными на изображении. Мы планируем продолжить работу по анализу неотожествленных всплесков и представить ее результаты в отдельной статье.

6.4 Обсуждение

Основной целью данного исследования был поиск новых рентгеновских барстеров в низком (выключенном) состоянии и транзиентных барстеров с малой постоянной светимостью. В результате работы во время всплеска был открыт один ранее неизвестный барстер, получивший название IGR J17364-2711.

Много это или мало при экспозиции наблюдений области галактического центра ~ 3.4 Мс (см. рис. 6.1) ? Прежде всего оценим время рекуррентности всплесков для нового источника

$$\tau = \alpha TF / F_X \simeq 6 \times 10^8 \text{ с} \simeq 20 \text{ лет.}$$

Здесь $\alpha \sim 100$ — фактор, показывающий эффективность энерговыделения при аккреции по сравнению с энерговыделением при термоядерном горении на поверхности нейтронной звезды. Мы предположили, что все всплески от этого источника похожи на всплеск, зарегистрированный детектором ISGRI, т.е. характеризуются длительностью $T \simeq 13$ с и максимальным потоком $F \simeq 1.6$ Краб, и приняли постоянный поток фотонов от источника $F_X \simeq 3 \times 10^{-6}$ Краб в диапазоне 15–25 кэВ (соответствует типичной для маломассивных систем в выключенном состоянии светимости $L_X \simeq 1 \times 10^{33}$ эрг с⁻¹ диапазоне 2–30 кэВ на

расстоянии 8.5 кпк при спектре, подобном спектру туманности в Крабе). Регистрация лишь одного всплеска за ~ 3.4 Мс наблюдений означает, что в данной области Галактики, где в поле размером $\sim 8^\circ \times 8^\circ$ мы наблюдаем сразу до 80% ($4 \times 10^9 M_\odot$) звезд галактического балджа, не считая звезд ($3 \times 10^9 M_\odot$) других компонент Галактики (см. [25]), может находиться не более 180 подобных систем. Эта число сопоставимо с числом постоянных и транзиентных источников, в том числе барстеров, известных в поле. Более строгие ограничения на число остающихся неизвестными барстеров, постоянно находящихся в низком (выключенном) состоянии, могут быть получены с использованием функции рентгеновской светимости Галактики (например, [39]). Здесь, однако, следует соблюдать осторожность, учитывая жесткий диапазон, в котором наблюдались всплески, и связанный с ним отбор их источников.

В самом деле, рентгеновские всплески, зарегистрированные телескопом IBIS/ISGRI и представленные в табл. 6.2, отличаются не столько большей интенсивностью, сколько жесткостью спектров излучения, что позволяет выделить их источники в особую группу барстеров. Во время большинства наблюдений в поле зрения телескопа постоянно находились другие известные барстеры, отличающиеся высоким и стабильным темпом генерации всплесков (GS 1826-238, A1742-294, 4U1820-303, 4U1705-440, 4U1735-444 и другие). От них не было зарегистрировано ни одного всплеска. В то же время, например, от источника GX354-0 был зарегистрирован 135 всплеск, что составляет более половины всех событий ISGRI, отождествленных с барстерами. Этот результат нельзя объяснить эффектом селекции, он свидетельствует об особенности поведения самого источника.

Многие из зарегистрированных всплесков имеют двухпиковую структуру временного профиля (см. рис. 6.4). Как правило, это свидетельствует о достижении во время термоядерного взрыва на поверхности нейтронной звезды критического эддингтоновского потока излучения, в результате чего атмосфера нейтронной звезды начинает истекать, а ее фотосфера — расширяться. Расширение фотосферы сопровождается ее охлаждением, что и приводит к провалу во временном профиле, особенно сильному на жестких энергиях, и формированию двухпиковой структуры. Эта картина осложняется эффектами комптонизации, роль которой возрастает в радиационно-доминированной среде, и особенностями протекания термоядерных реакций. К сожалению, в большинстве случаев нам не удалось получить временной профиль всплесков в стандартном рентгеновском диапазоне. Поле зрения монитора JEM-X составляет лишь $\sim 15\%$ от поля зрения телескопа IBIS. Поэтому монитор JEM-X смог наблюдать лишь 60 из 208 рассматриваемых всплесков, зарегистрированных телескопом IBIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Разработана, адаптирована для использования с пакетом HEAsoft и апробирована модель BDLE для аппроксимации спектров рентгеновского излучения ярких маломассивных рентгеновских двойных, содержащих нейтронную звезду со слабым магнитным полем в качестве компактного объекта.
2. Впервые проведено всестороннее исследование транзиентного барстера MX 0836-429. От этого источника зарегистрированы и исследованы 39 рентгеновских всплесков, проведен спектральный (впервые получены широкополосные рентгеновские спектры) и временной анализ излучения в спокойном состоянии и во время всплесков. Показано существование двух спектральных состояний системы с различной жесткостью. Получено значение верхнего предела на расстояние до источника: $D \sim 8$ кпк. На основе анализа времени рекуррентности всплесков определен параметр $\alpha \simeq 140$ режима термоядерного горения, что характерно для рентгеновских всплесков, произошедших в результате взрывного горения гелия.
3. Проведен подробный спектральный анализ излучения барстера KS 1731-260 в спокойном состоянии и во время всплеска. В рамках спектральной модели BDLE определены темп аккреции вещества на нейтронную звезду, наклонение системы, температура плазмы в пограничном слое и во внутренних областях аккреционного диска. Анализ всплесков в системе позволяет утверждать, что содержание водорода в области термоядерного взрыва на поверхности нейтронной звезды, явившегося причиной возникновения наблюдаемых всплесков, было значительным.
4. Создан каталог рентгеновских всплесков, зарегистрированных в 2003-2005 гг. телескопом IBIS/ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 15-25 кэВ. На временных историях скорости счета телескопа, записанных с разрешением 5 с, обнаружено 1900 всплесков, 390 из которых удалось локализовать и связать с известными рентгеновскими источниками, в частности 207 — с известными рентгеновскими барстерами. Открыт новый рентгеновский барстер — IGR J17364-2711. Отмечена уникальность рентгеновского барстера GX 354-0: число всплесков от этого источника, зарегистрированных на энергиях выше 15 кэВ, значительно превышает число подобных всплесков, зарегистрированных от других барстеров (более 65% от всех всплесков). Для этого источника исследованы статистические распределения числа всплесков по их длительности, уровню максимального потока и периоду рекуррентности.

Литература

- [1] (Н.Л. Александрович, М.Г. Ревнивцев, В.А. Арефьев и др.), Письма в Астрон. журн. v.28, 5, pp. 323-330 (2002).
- [2] (T. Aoki, T. Dotani, K. Ebisawa, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan 44, 641 (1992).
- [3] (A. Babul, B. Paczynski), Astrophys. J. 323, 582 (1987).
- [4] (E. M. Basinska, W. H. G. Lewin, M. Sztajno, et al.), Astrophys. J. 281, 337 (1984).
- [5] (A. Bazzano, M. Cocchi, P. Ubertini, et al.), IAUC 6668, 2 (1997).
- [6] (D. Barret, G. Vedrenne), ApS 92, 505 (1994).
- [7] (D. Barret, C. Motch and P. Predehl), Astron. Astrophys. 329, 965 (1998).
- [8] (G. Belanger, A. Goldwurm, P. Goldoni), Astrophys. J. 601, 163 (2004).
- [9] (R.D. Belian, J.P. Conner, W.D. Evans), Astrophys. J. 206, L135 (1976).
- [10] (T. Belloni, G. Hasinger, W. Pietecch, et al.), Astron. Astrophys. 271, 487 (1993).
- [11] (L. Bildsten), 2000arXt.confE..65B
- [12] (C. F. Bradshaw, E. B. Fomalont, B. J. Geldzahler), Astrophys. J. 512, L121 (1999).
- [13] (N. White, L. Stella, A. Parmar), Astrophys. J. 324, 363 (1988).
- [14] (M. Van der Klis, G. Hasinger, E. Damen, et al.), Astrophys. J. 360, 19 (1990).
- [15] (J. van Paradijs), Nature 274, 650 (1978).
- [16] (H.M. van Horn, C.J. Hansen), Astrophys. J. 191, 479-482 (1974).
- [17] (R.A.D. Wijnands and M. Van der Klis), Astrophys. J. 482, 65 (1997).
- [18] (R.A.D. Wijnands, J.M. Miller, C. Markwardt, et al.), Astrophys. J. 560, 159-162 (2001).
- [19] (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, et al.), Astron. Astrophys. 411, L1 (2003).
- [20] (S.E. Woosley, R.E. Taam), Nature 263, 101 (1976).
- [21] (M. Gilfanov, M. Revnivtsev, S. Molkov), Astron. Astrophys. 410, 217 (2003).
- [22] (M. Gottwald, L. Stella, N.E. White, P. Barr), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 229, 395-403 (1987).

- [23] (D. Gotz, S. Mereghetti, S. Molkov, et al.), *Astron. Astrophys.* 445, 313 (2005).
- [24] (S.A. Grebenev, R.A. Syunyaev), *IAU Circ.* 5294 (1991).
- [25] (S.A. Grebenev, M.N. Pavlinsky, R.A. Syunyaev), Proc. "Rontgenstrahlung from the Universe", eds. H.U. Zimmermann, J. Trumper and H. Yorke, MPE Report 263, p. 141-142 (1996).
- [26] (С.А. Гребенев, А.А. Лутовинов, М.Н. Павлинский и др.), Ротапринт ИКИ РАН, Препринт 2031 (2000).
- [27] (S.A. Grebenev, R.A. Syunyaev), *Astron. Lett.* 28, 150 (2002).
- [28] (S.A. Grebenev, M.N. Pavlinsky, R.A. Sunyaev), Proceedings of the 2nd INTEGRAL Workshop "The Transparent Universe", ESA SP-382 (1997).
- [29] (S.A. Grebenev, P. Ubertini, J. Chenevez, et al), *ATEL* 275, 1 (2004).
- [30] (S.A. Grebenev, I.V. Chelovekov, R.A. Syunyaev), In proceedings of the 6th INTEGRAL Workshop "The Obscured Universe", ESA SP-622 (2006).
- [31] (J. Grindley, H. Gursky), *Astrophys. J.* 205, L131 (1976).
- [32] (J. Grindley, H. Gursky), *Astrophys. J.* 209, L61 (1976).
- [33] (J.E. Grindley), *Astrophys. J.* 224, L107 (1978).
- [34] (M. Guainazzi, A.N. Parmar, A. Segreto, et al.), *Astron. Astrophys.* 339, 802 (1998).
- [35] (P.G. Jonker, M. van der Klis, J. Homan, et al.), *Astrophys. J.* 553, 335 (2001).
- [36] (P.C. Joss), *Nature* 270, 310 (1977).
- [37] (A.M. Juett, D. Psaltis, D. Chakrabarty), *Astrophys. J.* 560L, 59J (2001).
- [38] (T. Di Salvo, R. Iaria, L. Burderi, et al.), *Astrophys. J.* 542, L1034 (2000).
- [39] (A.N. Emelyanov, V.A. Aref'ev, E.M. Churazov, et al), *Astron. Lett.* 27, 781 (2001).
- [40] (J.J.M. in't Zand, L. Heise, A.C. Brinkman, et al.), *AdSpR* 11, 187 (1991).
- [41] (J.J.M. in't Zand, L. Heise, A. Bazzano, et al.), *IAU Circ.* 7243 (1999).
- [42] (J.J.M. in't Zand, A. Cumming, M.V. van der Sluys, et al.), *Astron. Astrophys.* 441, 675 (2005).
- [43] (Ya.B. Zeldovich and N.I. Shakura), *Sov. Astron.* 13, 175 (1969).
- [44] (А.Ф. Илларионов, Р.А. Сюняев), *Астрон. журн.* 51, 698 (1974).
- [45] (Н.С. Имбуренко, М.Н. Павлинский, Г.Г. Бабалян, и др), *imse.book* 182 (1989).
- [46] (Н.А. Иногамов, Р.А. Сюняев), *Письма в Астрон. журн.* 25, 269 (1999).
- [47] (А.Д. Каминкер, Г.Г. Павлов, Ю.А. Шибанов), *Астрон. журн.* 65, 753 (1988).
- [48] (A.D. Kaminker, G.G. Pavlov, Y.A. Shibano, et al.), *Astron. Astrophys.* 220, 117 (1989).

- [49] (E. Kellogg, H. Gursky, S. Murray, et al.), *Astrophys. J. Lett.* 169, L99 (1971).
- [50] (A. Claret, A. Goldwurm, B. Cordier, et al.), *Astrophys. J. Lett.* 423, 436 (1994).
- [51] (L. Cominsky, C. Jones, W. Forman, H. Tananbaum), *Astrophys. J.* 224, 46 (1978).
- [52] (А.С. Компанеец), *ЖЭТФ* 31, 876 (1956).
- [53] (R. Cornelisse, F. Verbunt, J.J.M. in't Zand, et al.), *Astron. Astrophys.* 392, 885 (2002).
- [54] (M. Cocchi, L. Natalucci, J.J.M. in't Zand, et al.), *IAU Circ.* 7247 (1999).
- [55] (M. Cocchi, A. Bazzano, L. Natalucci, et al.), *Astron. Astrophys.* 378, 37 (2001).
- [56] (K. Koyama, H. Inoue, K. Makishima, et al.), *Astrophys. J.* 247, L27-L29 (1981).
- [57] (D. J. Christian, J. H. Swank), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 109, 177 (1997).
- [58] (E. Kuulkers, J. J. M. in't Zand, M. H. van Kerkwijk, et al.), *Astron. Astrophys.* 382, 503 (2002).
- [59] (И.И. Лапидус, Р.А. Сюняев, Л.Г. Титарчук, и др.), *Письма в Астрон. журн.* 18, 30 (1992).
- [60] (R.A. London, W.M. Howard and R.E. Taam), *Astrophys. J.* 287, 27 (1984).
- [61] (R.A. London, R.E. Taam and W.M. Howard), *Astrophys. J.* 306, 170 (1986).
- [62] (N. Lund, S. Brandt, C. Budtz-Joergesen, et al.), *Astron. Astrophys.* 411, 231 (2003).
- [63] (A. Lutovinov, S. Grebenev, S. Molkov and R. Sunyaev), *ANS* 324, 337 (2003).
- [64] (A. Lutovinov, M.C. Bel, G.S. Belanger, et al.), *ATEL* 328, 1 (2004).
- [65] (W. H. G. Lewin, J. van Paradijs, L. Cominsky, S. Holzner), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 193, 15 (1980).
- [66] (W. H. G. Lewin, P. C. Joss), *Space Sci. Rev.* 28, pp.3-87 (1981).
- [67] (W. H. G. Lewin, W. Penninx, J. van Paradijs, et al.), *Astrophys. J.* 319, 893 (1987).
- [68] (W. H. G. Lewin, J. van Paradijs and R.E. Taam), *Space Sci. Rev.* 62, 223 (1993).
- [69] (D.Q. Lamb and F.K. Lamb), *Astrophys. J.* 220, 291 (1978).
- [70] (P. Magdziarz, A.A. Zdziarski), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 273, 837 (1995).
- [71] (K. Makishima, H. Inoue, K. Koyama, et al.), *Astrophys. J.* 255, 49-53 (1982).
- [72] (K. Makishima, K. Mitsuda, H. Inoue), *Astrophys. J.* 267, 310 (1983).
- [73] (H. Marshall, F.K. Li, S. Rappaport), *IAU Circ.* 3141 (1977).
- [74] (L. Marashi, A. Cavaliere), in "Highlights in astronomy", E.A. Muller(ed), Reidel, Dordrecht, v.4, Part I, p.127 (1977).
- [75] (T. Markert; H.V. Bradt; Clark, G.W., et al.), *IAU Circ.* 2765 (1975).

- [76] (T. Markert, C.R. Canizares, G.W. Clark, et al.), *Astrophys. J.* 218, 801 (1977).
- [77] (S. Mereghetti, D. Gotz, J. Borkowski, et al.), *Astrophys. J.* 411, 291 (2003).
- [78] (R.P. Mignani, S. Chaty, I.F. Mirabel and S.K. Mereghetti), *Astron. Astrophys* 389, 11 (2002).
- [79] (K. Mitsuda, H. Inoue, K. Koyama, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* 36, 741 (1984).
- [80] (S.V. Molkov, S.A. Grebenev, A.A. Lutovinov), *Astron. Astrophys* 357, L41-L44 (1984).
- [81] (S.V. Molkov, A.A. Lutovinov, S.A. Grebenev), *Astron. Astrophys* 411, 357 (2003).
- [82] (S. Molkov, M. Revnivtsev, A. Lutovinov, R. Sunyaev), *Astron. Astrophys* 434, 1069-1075 (2005).
- [83] (M.P. Muno, D.W. Fox, E.H. Morgan), *Astrophys. J.AAS* 19512607, v.31, p.1556 (1999).
- [84] (M.P. Muno, D.W. Fox, E.H. Morgan and L. Bildsten), *Astrophys. J.* 542, 1016-1033 (2000).
- [85] (T. Murakami, H. Inoue, K. Koyama, et al.), *Astrophys. J.* 240, 143 (1980).
- [86] (T. Murakami, H. Inoue, K. Koyama, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* 32, 543-546 (1980).
- [87] (T. Murakami, H. Inoue, K. Koyama, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* 35, 531-537 (1983).
- [88] (N. Nakamura, T. Dotani, H. Inoue, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* 41, 617-639 (1989).
- [89] (G. Nelemans, P.G. Jonker, T.R. Marsh, et al.), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 348, L7 (2004).
- [90] (L.A. Nelson, S.A. Rappaport, P.C. Joss), *Astrophys. J.* 304, 231 (1986).
- [91] (J. A. Orosz, E. Kuulkers), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, (1998).
- [92] (M. N. Pavlinsky, S. A. Grebenev, A. A. Lutovinov, et al.), , (1994).
- [93] (M. N. Pavlinsky, S. A. Grebenev, A. A. Lutovinov, et al.), *Astron. Lett.* 27, 297 (2001).
- [94] (G.G. Pavlov, Yu.A. Shibano, V.E. Zavlin), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 253, 193 (2001).
- [95] (R. Popham and R. Sunyaev), *Astrophys. J.* 547, 355 (2001).
- [96] (R. Remillard, E. Morgan), *ATEL* 482 (2005).
- [97] (M.G. Revnivtsev and R.A. Syunyaev), *Astron. Astrophys.* 339, 699-702 (2003).
- [98] (M.G. Revnivtsev and M.R. Gilfanov), *Astron. Astrophys.* 453, 253 (2006).

- [99] (G.K. Skinner, A.P. Willmore, C.J. Eyles, et al.), *Nature* 330, 544 (1987).
- [100] (G.K. Skinner, A.J. Foster, A.P. Willmore and C.J. Eyles), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 243, 72 (1990).
- [101] (D.A. Smith, E.H. Morgan, H. Bradt), *Astrophys. J.* 479, 137-140 (1997)
- [102] (Р. А. Сюняев, Н.И. Шакура), *Астрон. журн.* 51, 102 (1974).
- [103] (Р. А. Сюняев, Н.И. Шакура), *Adv. Space Res.* 8,135 (1986).
- [104] (Р. А. Сюняев), *IAU Circ.* 4839 (1989).
- [105] (Р. А. Сюняев, М.Р. Гильфанов, Е.М. Чуразов), *Письма в Астрон. журн.* v.16, pp.136-143 (1990).
- [106] (Р. А. Сюняев), *IAU Circ.* 5180 (1991).
- [107] (Р.А. Сюняев, Л.Г. Титарчук), *Письма в Астрон. журн.* 12, 857 (1986).
- [108] (Р.А. Сюняев, Н.И. Шакура), *Письма в Астрон. журн.* 12, 286 (1986).
- [109] (J.H. Swank, R.H. Becker, E.A. Boldt, et al.), *IAU Circ.* 3000 (1976).
- [110] (J.H. Swank, R.H. Becker, S.H. Pravdo, et al.), *IAU Circ.* 3010 (1976).
- [111] (J.H. Swank, R.H. Becker, E.A. Boldt, et al.), *Astrophys. J.* 212, L73-L76 (1977).
- [112] (Н.Р. Сибгатуллин и Р.А. Сюняев), *Письма в Астрон. журн.* 24, 894 (1998).
- [113] (T. E. Strohmayer, W. Zhang and J.H. Swank), *Astrophys. J.* 487, L77 (1997).
- [114] (V. Suleimanov and J. Poutanen), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 369, 2036 (2006).
- [115] (Л.Г. Титарчук), *Письма в Астрон. журн.* 14, 537 (1988).
- [116] (P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, et al.), *Astron. Astrophys.* 411, 131 (2003).
- [117] (W. Forman, H. Tananbaum, C. Jones), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 206, L29 (1976).
- [118] (W. Forman, C. Jones, L. Cominsky, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 38, 353 (1978).
- [119] (A.J. Foster, R.R. Ross and A.C. Fabian), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 221, 409 (1986).
- [120] (G. Hasinger, W. Pietsch, T. Belloni), *IAU Circ.* 5142 (1990).
- [121] (G. Hasinger and M. van der Klis), *Astron. Astrophys.* 225, 79 (1989).
- [122] (C.J. Hansen, H.M. van Horn), *Astrophys. J.* 195, 735 (1975).
- [123] (J.A. Hoffman, W.H.G. Lewin, J. Doty, et al.), *Astrophys. J.* 210, L13 (1976).
- [124] (J.A. Hoffman, W.H.G. Lewin, J. Doty), *Astrophys. J.* 217, L23-L28 (1977).
- [125] (J.A. Hoffman, H. L. Marshall, W. H.G. Lewin), *Nature* 271, 630 (1978).

- [126] (J. A. Hoffman, W. H. G. Lewin, F. A. Primini, et al.), *Astrophys. J.* 233, L51 (1979).
- [127] (J. A. Hoffman, L. Cominsky and W. H. G. Lewin), *Astrophys. J.* 240, 27 (1980).
- [128] (И.В. Человеков, А.А. Лутовинов, С.А. Гребенев и Р.А. Сюняев), *Письма в Астрон. журн.* v.31, pp. 764-779 (2005).
- [129] (И.В. Человеков, С.А. Гребенев и Р.А. Сюняев), *Письма в Астрон. журн.* v.32, pp. 456-477 (2006).
- [130] (И.В. Человеков, С.А. Гребенев и Р.А. Сюняев), *Письма в Астрон. журн.* v.32, pp. 187-198 (2006).
- [131] (M.J. Church and M. Balucinska-Church), *Astron. Asrtrophys.* , (2001).
- [132] (E.M. Churazov, M.R. Gilfanov, R.A. Sunyaev et al.), *Astrophys. J.* 443, 341 (1995).
- [133] (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* 24, 337 (1973).
- [134] (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 175. 613 (1976).
- [135] (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *Adv. Space Res.* 8, 135 (1986).
- [136] (N. Shaposhnikov, L. Shakura and H. Frank), *Astrophys. J.* 593, L35 (2003).
- [137] (M. Sztajno, E. M. Basinska, L. R. Cominsky, et al.), *Astrophys. J.* 267, 713 (1983).
- [138] (N.A. Eismont, A. V. Ditrikh, G. Janin, et al.), *Astron. Astrophys.* 411, L37 (2003).
- [139] (T. Ebisuzaki), *Publ. Astron. Soc. Japan* 39, 287 (1987).
- [140] (T. Ebisuzaki and K. Nomoto), *Astrophys. J.* 305, L67 (1986).