

ТЕЛЕСКОП ART-XC НА БОРТУ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ

© 2022 г. **М. Павлинский**¹, А. Ткаченко¹, В. Левин¹, Н. Александрович¹, В. Арефьев¹, В. Бабышкин², О. Батанов¹, Ю. Боднар³, А. Богомолов¹, А. Бубнов¹, М. Бунтов¹, Р. Буренин¹, И. Человеков¹, К.-Т. Чен⁴, Т. Дроздова¹, С. Элерт⁵, Е. Филиппова¹, С. Фролов³, Д. Гамков¹, С. Гаранин³, М. Гарин³, А. Глушенко¹, А. Горелов³, С. Гребенев¹, С. Григорович³, П. Гуреев², Е. Гурова¹, Р. Илькаев³, И. Катасонов¹, А. Кривченко¹, Р. Кривонос¹, Ф. Коротков¹, М. Куделин¹, М. Кузнецова¹, В. Лазарчук³, И. Лапшов¹, В. Липилин¹, И. Ломакин², А. Лутовинов^{1*}, И. Мереминский¹, С. Мольков¹, В. Назаров¹, В. Олейников¹, Е. Пикалов³, Б. Д. Рэмси⁵, И. Ройз³, А. Ротин¹, А. Рядов³, Е. Санкин³, С. Сазонов¹, Д. Седов³, А. Семена¹, Н. Семена¹, Д. Сербинов¹, А. Ширшаков², А. Штыковский¹, А. Швецов³, Р. Сюняев^{1,6}, Д. А. Шварц⁴, В. Тамбов¹, В. Ворон⁷, А. Яскович¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Химки, Россия

³РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская область, Россия

⁴Университетская ассоциация космических исследований, Хантсвилл, США

⁵НАСА/Маршалловский центр космических полетов, Хантсвилл, США

⁶Астрофизический институт Общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

⁷Государственная космическая корпорация Роскосмос, Москва, Россия

(Перевод статьи М. Pavlinsky, et al., Astronomy & Astrophysics, 2021, v. 650, A42, воспроизведенный с разрешения © ESO)

Поступила в редакцию 31.12.2020 г.

После доработки 22.03.2021 г.; принята к публикации 22.03.2021 г.

ART-XC (Astronomical Roentgen Telescope — X-ray Concentrator) — телескоп с оптикой косоугольного падения, чувствительный в жестком рентгеновском диапазоне, на борту обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (СРГ). Обсерватория СРГ, флагманская астрофизическая миссия Российской федеральной космической программы, была успешно выведена на орбиту в окрестность второй точки Лагранжа (L2) системы Солнце–Земля 13 июля 2019 г. ракетой-носителем “Протон” (с космодрома Байконур). Телескоп ART-XC разработан для проведения первого рентгеновского обзора всего неба в режиме прямого изображения (с использованием оптики косоугольного падения) в диапазоне энергий 4–30 кэВ и построения самой глубокой и наиболее четкой карты неба в диапазоне 4–12 кэВ. Наблюдения, выполненные на ранних этапах калибровки и проверки работоспособности приборов, а также во время начавшегося 12 декабря 2019 г. и продолжающегося сейчас обзора всего неба, показали, что летные характеристики телескопа ART-XC очень близки к параметрам, предсказанным на основании результатов наземных калибровок. Ожидается, что по завершении 4-летнего обзора всего неба ART-XC зарегистрирует ~5000 источников (~3000 активных ядер галактик, включая сильно поглощенные галактики и далекие квазары, несколько сотен скоплений галактик, ~1000 катаклизмических переменных и других галактических источников) и построит высококачественную карту галактического фонового излучения в диапазоне энергий 4–12 кэВ. ART-XC хорошо оснащен и для обнаружения транзитных рентгеновских источников. В этой статье мы опишем сам телескоп, результаты его наземных калибровок, основные задачи и особенности миссии, подтвердим сохранение характеристик ART-XC по измерениям на орбите, представим первые научные результаты.

Ключевые слова: космические аппараты, рентгеновские приборы и телескопы, обзоры всего неба.

DOI: 10.31857/S0320010822050011

*Электронный адрес: lutovinov@iki.rssi.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Астрономический рентгеновский телескоп — концентратор рентгеновских лучей им. М.Н. Павлинского¹ (ART-XC, Павлинский и др., 2011, 2016) — один из двух рентгеновских телескопов обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (СРГ) — флагманского астрофизического проекта Российской федеральной космической программы (Сюняев и др., 2021, 2022). ART-XC сконструирован для получения прямых изображений неба в рентгеновских лучах с использованием рентгеновской оптики косоугольного падения. ART-XC также может быть использован в режиме с намного большим эффективным полем зрения, но без хорошего углового разрешения (“режим концентратора”). Телескопы ART-XC и eROSITA (другой прибор обсерватории СРГ, Предель и др., 2021) взаимно дополняют друг друга, будучи чувствительными в диапазонах энергий 4–30 кэВ и 0.2–8 кэВ соответственно.

Единственный обзор всего неба, выполненный ранее с помощью рентгеновского телескопа с оптикой косоугольного падения, — это обзор всего неба обсерваторией ROSAT (RASS) в диапазоне энергий 0.1–2.4 кэВ (Wang и др., 1999). На более высоких энергиях рентгеновские обзоры всего неба проводились либо с помощью коллимированных приборов (например, Uhuru, Forman и др., 1978, и HEAO-1, Vud и др., 1984), либо с помощью телескопов с кодирующей апертурой (например, INTEGRAL/IBIS и Swift/BAT, см. ниже). Чувствительность этих обзоров была сильно ограничена плохим угловым разрешением. Телескоп ART-XC обеспечит выполнение первого в истории обзора всего неба, основанного на прямых наблюдениях с оптикой косоугольного падения в диапазоне энергий 4–30 кэВ, т.е. на значительно более высоких энергиях по сравнению с RASS. Телескоп оптимизирован для проведения обзоров в диапазоне 4–12 кэВ с максимумом чувствительности на 8–10 кэВ.

Телескоп ART-XC был разработан Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН, Москва) и Российским федеральным ядерным центром — Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров). Разработка рентгеновской оптики для телескопа

осуществлялась независимо во ВНИИЭФ и в Маршалловском центре космических полетов НАСА (MSFC). Зеркальные системы, разработанные во ВНИИЭФ, были установлены в квалификационную модель ART-XC, которая использовалась для испытаний стойкости телескопа к вибрации и износу. Это позволило значительно сократить сроки осуществления проекта ART-XC. Одновременно, в MSFC были разработаны, изготовлены и откалиброваны системы рентгеновских зеркал для летной модели телескопа. Важно отметить, что при создании телескопа ART-XC и при составлении списка его важнейших научных задач большое значение имел огромный опыт, приобретенный ИКИ РАН ранее — при разработке и в процессе использования телескопа ART-P на борту обсерватории GRANAT (см., например, Сюняев и др., 1993; Павлинский и др., 1994), а также приборов обсерватории РЕНТГЕН на борту космической станции МИР (см., например, Сюняев и др., 1991).

ART-XC — первый рентгеновский телескоп с вольтеровской оптикой косоугольного падения, разработанный и запущенный в космос Россией.

2. ТЕЛЕСКОП ART-XC

2.1. Конструкция телескопа

ART-XC состоит из самого телескопа и четырех отдельных блоков электроники, смонтированных на термостабилизированной платформе, расположенной в 0.5 м под телескопом (рис. 1, Павлинский и др., 2012).

Телескоп имеет массу около 350 кг, размеры 3.5 м в высоту и 0.9 м в диаметре, потребляемая мощность составляет 150 Вт. Основными элементами телескопа являются семь рентгеновских зеркальных систем (MSs) и соответствующие им детекторы рентгеновского излучения (УРД). Каждая пара “зеркальная система-детектор” образует “модуль” телескопа. Модули соосны, ниже они обозначаются как модули T1–T7. Зеркальные системы смонтированы на платформе, расположенной в верхней части конструкции телескопа. Семь рентгеновских детекторов собраны в фокальной плоскости. Детекторы и зеркала находятся в коническом корпусе из углепластикового волокна. Верхняя часть конического корпуса покрыта медным экраном, блокирующим рассеянное излучение, приходящее сбоку от зеркальной системы, которое в отсутствие экрана могло бы значительно повысить общий рентгеновский фон детектора. Эта проблема была подробно исследована Мадсенем и др. (2017) для орбитального телескопа NuSTAR (Харрисон и др., 2013).

¹Михаил Павлинский (1959–2020 гг.) был научным руководителем телескопа ART-XC и заместителем научного руководителя обсерватории СРГ. Он внес решающий вклад в успешную реализацию этого проекта и создание в России современной школы космического приборостроения. К нашему величайшему сожалению, в июле 2020 г. М.Н. Павлинский скончался. В память о Михаиле Павлинском было решено назвать телескоп ART-XC его именем — телескоп ART-XC им. М.Н. Павлинского.

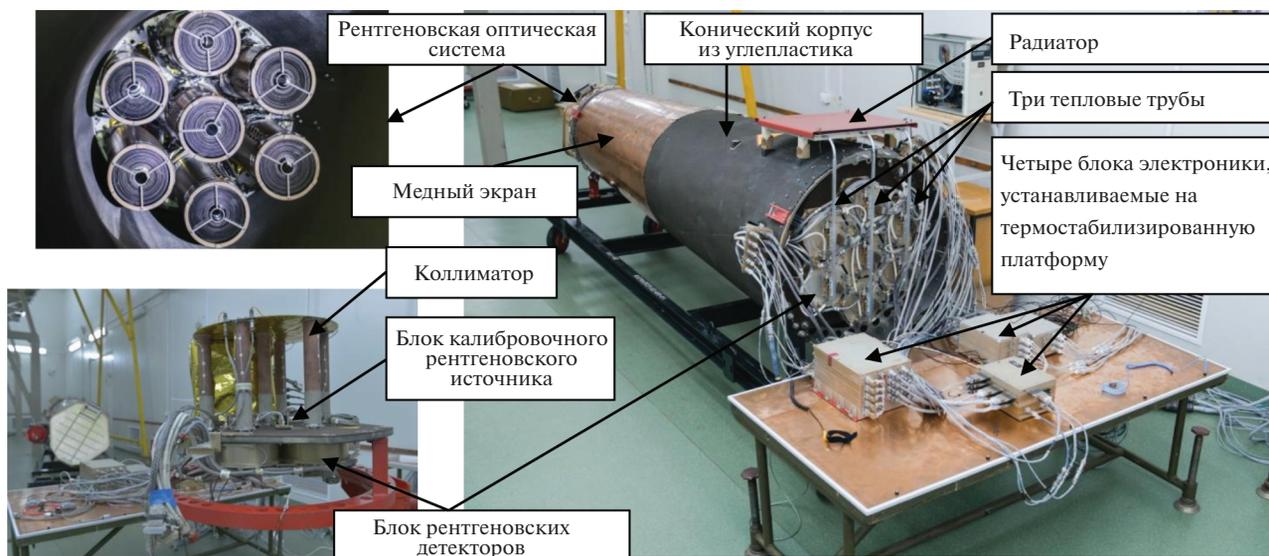


Рис. 1. Телескоп ART-XC. *Вверху слева:* вид на 7 зеркальных систем, направленных на детекторы. *Внизу слева:* вид сбоку на блок детекторов до сборки; в блоке находятся 7 детекторов, соосных с 7 зеркальными системами. Над блоком в направлении зеркальных систем установлены коллиматоры (свой для каждого детектора), каждый оснащен блоком калибровочного источника. *Справа:* собранный телескоп, вмещающий все 7 зеркальных систем (слева в глубине), блок детекторов (справа вблизи) и связанное с ними оборудование, в том числе элементы системы терморегулирования: радиатор и тепловые трубы. Блоки электроники на переднем плане для полета должны быть установлены на термостабилизированную платформу (не показана). Звездный датчик расположен на дальнем конце углепластиково-медной трубы телескопа — со стороны зеркальных систем (не видны на рисунке).

Телескоп имеет бортовую систему калибровки, которая используется для определения коэффициента усиления и энергетического разрешения детектора, и систему терморегулирования. Система калибровки содержит модуль управления приводами и семь блоков калибровочных источников рентгеновского излучения — по одному на каждый детектор. Калибровочный рентгеновский источник

состоит из смеси радиоактивных ^{241}Am и ^{55}Fe , он выдвигается из свинцового блока с помощью шагового двигателя.



Рис. 2. Подготовка одной из зеркальных систем телескопа ART-XC к испытаниям на установке MSFC по измерению степени рассеяния света.

С точки зрения обеспечения термостабильности телескоп — довольно сложный объект. Система управления тепловым режимом телескопа состоит из 36 активных элементов — нагревателей, установленных в разных местах конструкции телескопа (Семена и др., 2014). Инструмент имеет две строго термостабилизированные зоны: рентгеновские зеркала и детекторы. Стабильная температура обочек зеркала в интервале $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ обеспечивается нагревом его внешней оболочки и тепловыми экранами. Нижняя часть внешней оболочки зеркала имеет температуру $+27^\circ\text{C}$, верхняя часть — $+28^\circ\text{C}$. Температура теплового экрана составляет $+22^\circ\text{C}$ со стабильностью 0.01°C . Характерные температуры детекторов обсуждаются ниже. В виде отдельных блоков электроники представлены: блок системы сбора и обработки информации, два блока электроники для детекторов и блок терморегулирования. Звездный датчик БОКЗ-МФ смонтирован на платформе зеркальных систем в непосредственной близости от зеркал.

Далее системы и компоненты телескопа ART-XC описаны подробнее. Основные параметры телескопа приведены в табл. 1. Приведенные

Таблица 1. Характеристики телескопа ART-XC

Основные параметры телескопа ART-XC	
Масса телескопа	350 кг
Размеры	3.5 м × ∅0.9 м
Потребляемая мощность	150 Вт
Диапазон энергий	4–30 кэВ
Эффективная площадь для наблюдений в режиме наведения	385 см ² на 8.1 кэВ ^a
Поле зрения	~0.3 град ² (∅ = 36')
Грасп	43.8 см ² град ² на 8.1 кэВ
Угловое разрешение (FWHM) в обзорной моде (ограничено размером пиксела)	53''
Эффективность детектора	50% на 4.6 кэВ, 86% на 8.1 кэВ
Энергетическое разрешение	9% на 13.9 кэВ ^b
Временное разрешение	23 мкс
Оптика телескопа ART-XC	
Число зеркальных систем	7
Номинальное фокусное расстояние	2700 мм
Дефокусировка	–7 мм
Число вложенных оболочек в системе	28
Форма оболочек	Вольтер-1
Диаметр оболочек (пересечение)	49–145 мм
Толщина оболочек	0.25–0.35 мм
Материал оболочек	Ni/Co
Покрытие зеркал	Ig (90% объемной плотности)
Входной фильтр	18.5 мкм майлара + 0.11 мкм Al
Диаметр HPD по оси	30–35'' ^b
Детекторы телескопа ART-XC	
Тип детектора	Двухсторонний стриповый диод Шоттки
Размер кристалла (CdTe)	29.95 мм × 29.95 мм × 1.00 мм
Производитель кристалла	Ascgad (Япония)
Рабочая площадь	28.56 мм × 28.56 мм
Число стрипов	48 × 48
Ширина стрипа	520 мкм
Межстриповое расстояние	75 мкм
Микросхема ASIC, 2 шт.	VA64TA I (Ideas, Норвегия)
Рабочий диапазон энергий	4–120 кэВ
Входное окно	Be, ∅30 мм, толщина 100 мкм

^a В калибровочной линии радиоактивного ⁶⁰Co.^b В линии радиоактивного ²³⁷Np.^c См. табл. 3.

значения учитывают результаты обширных наземных калибровок, которые описываются ниже в п. 3. Как обсуждается далее в разделе 6, полетные калибровки в целом подтвердили предполетные параметры ART-XC.

2.2. Зеркальные системы

Конструкция рентгеновской оптики ART-XC была разработана независимо во ВНИИЭФ и MSFC на основе спецификаций ИКИ РАН. В MSFC использовали классическую форму зер-

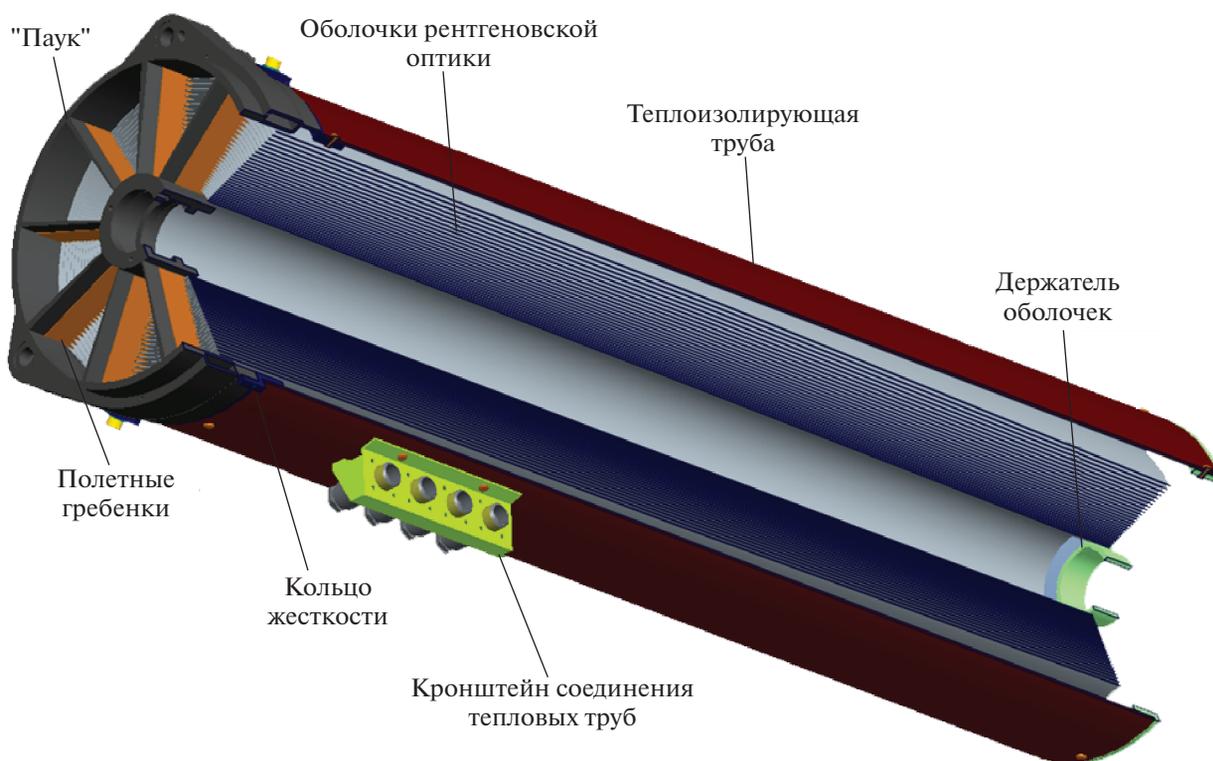


Рис. 3. Поперечный разрез зеркальной системы телескопа ART-XC. Внутренняя перегородка (предназначенная для сокращения посторонней засветки) и нагревательные элементы не показаны.

кал типа Вольтер-I (“параболоид-гиперболоид”) вместо приближения “конус-конус” к геометрии Вольтер-I, используемого ВНИИЭФ. Основные характеристики, такие как масса и эффективная площадь зеркальных систем, были одинаковыми, но модули, произведенные MSFC, имели значительно лучшее угловое разрешение. ВНИИЭФ изготовил семь зеркальных систем. Все они

были установлены в квалификационную модель ART-XC, которая была подвергнута вибрационным и ресурсным испытаниям. MSFC изготовил, испытал (рис. 2) и откалибровал восемь идентичных рентгеновских зеркальных систем для ART-XC (Губарев и др., 2012, 2014; Кривонос и др., 2017). Семь из них были установлены в летную модель телескопа, а восьмая стала запасной.



Рис. 4. Зеркальные системы телескопа ART-XC, установленные на монтажном стенде.

Каждая зеркальная система (рис. 3) содержит 28 вложенных зеркальных оболочек типа Вольтер-I. Оболочки изготовлены из никеля с использованием техники гальванопластики. Оболочки имеют диаметры, меняющиеся от 49 до 145 мм. Их толщина меняется с радиусом от 250 до 350 мкм. Внешние оболочки сделаны более толстыми для увеличения их жесткости и, следовательно, улучшения углового разрешения зеркальной системы. Внутренняя поверхность никель-кобальтовых зеркал телескопа ART-XC покрыта слоем, состоящим на 90% объемной плотности из иридия (Ir) толщиной ~ 10 нм. Этот металл имеет более высокий коэффициент отражения рентгеновского излучения, чем золото на энергиях выше 10 кэВ. Верхние концы оболочек вклеены в поддерживающую структуру — так называемый “паук”.

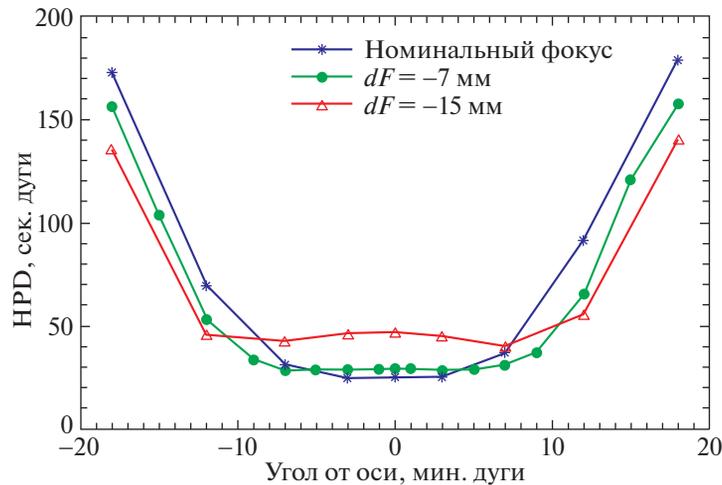


Рис. 5. Диаметр кружка половинной мощности (HPD) зеркальной системы для номинального фокусного расстояния (2700 мм) и для двух расфокусирующих положений $dF = -7$ и -15 мм. Диаметр HPD был измерен на энергии 8.1 кэВ для зеркальной системы MS1 на установке MSFC по измерению степени рассеяния света.

Вес каждой зеркальной системы телескопа ART-XC составляет около 17 кг. Номинальное фокусное расстояние — 2700 мм. Во время установки в телескоп (рис. 4) зеркальные системы были расфокусированы на 7 мм для обеспечения более равномерного углового разрешения по полю зрения (см. рис. 5, Губарев и др., 2014). Таким

образом, точное расстояние от зеркальной системы до плоскости детектора составляет 2693 мм.

2.3. Комплекс рентгеновских детекторов

Детекторы рентгеновского излучения в фокальной плоскости телескопа ART-XC (Павлинский и др., 2016; Левин и др., 2016) были разработаны в ИКИ РАН специально для миссии SRG. Детекторная система ART-XC состоит из семи узлов рентгеновских детекторов (УРД с номерами от 01 до 07 по числу модулей телескопа), двух блоков электроники (БЭ) и одного блока коммутации для последовательного интерфейса (БК, Левин и др., 2014). Потребляемая мощность системы детекторов составляет 42 Вт, а полная масса — 39.6 кг. Два блока электроники состоят из семи идентичных модулей (четыре в БЭ-01 и три в БЭ-02).

Один модуль в БЭ обслуживает один узел рентгеновского детектора. Каждый модуль подключен к сети распределения первичного питания и получает две импульсные команды от системы управления космического аппарата. Блок электроники включает в себя коммутатор основного питания, фильтр электромагнитных помех, комплект низковольтных DC/DC-преобразователей, регулируемый высоковольтный DC/DC-преобразователь, а также схему контроля тока потребления и защиты. Блок электроники обеспечивает рентгеновский детектор всеми необходимыми низковольтными и высоковольтными напряжениями питания и защищает его от высокого потребления тока. Блок коммутации (БК) используется для распределения интерфейсов управления/телеметрии и синхронизации времени.

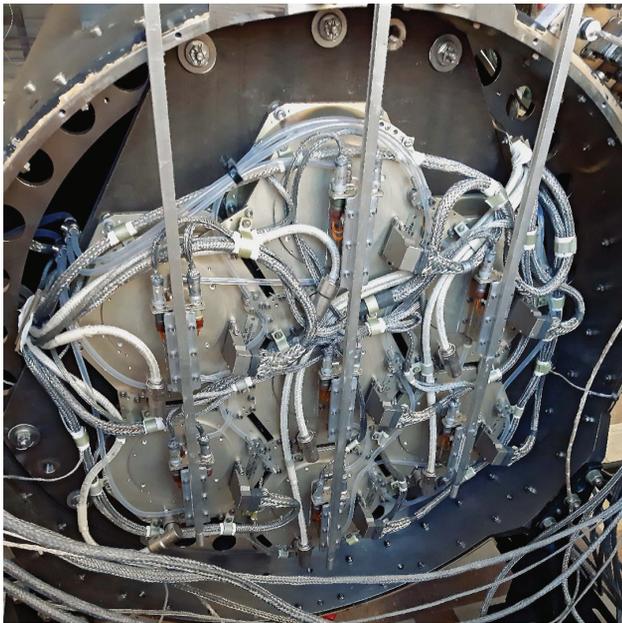


Рис. 6. Семь узлов рентгеновских детекторов (УРД), установленных в фокальной плоскости телескопа ART-XC (вид с задней стороны детекторов).

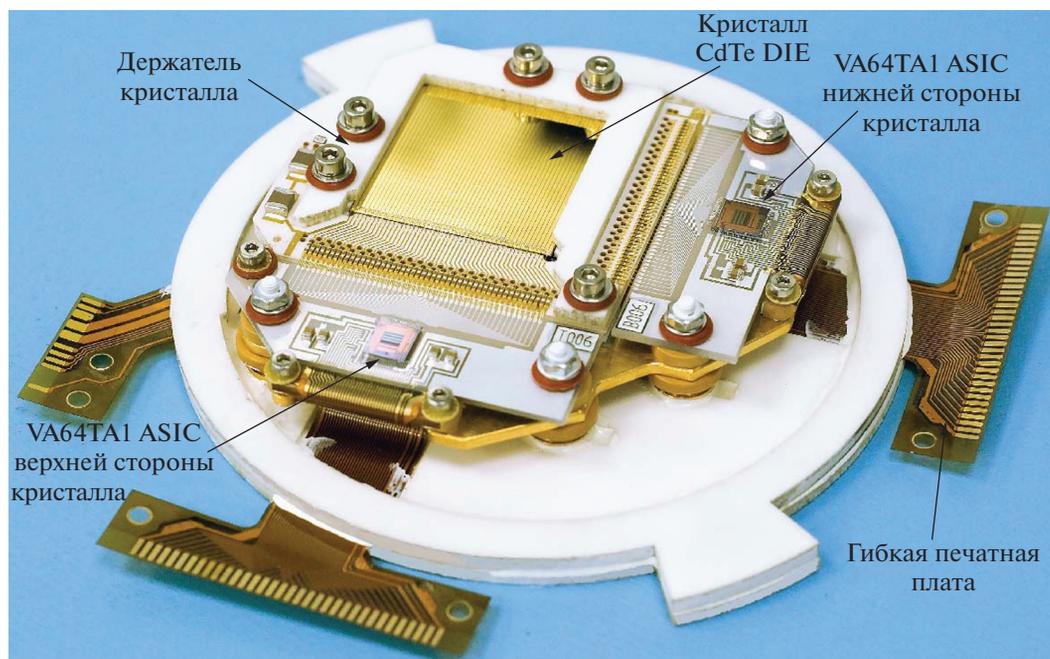


Рис. 7. Гибридная интегральная микросхема детектора рентгеновского излучения (модель СД01).

Оба интерфейса основаны на стандарте RS-485 с гальванической развязкой.

Узлы рентгеновских детекторов и блоки электроники разделены для того, чтобы снизить выделение мощности внутри УРД. Один детекторный канал (один УРД и один модуль в БЭ) потребляет 6 Вт от бортовой сети питания. В УРД выделяется 3.5 Вт мощности и еще 2.5 Вт — в модуле в БЭ. Два блока БЭ размещены на термостабилизированной платформе космического аппарата. Семь УРД и блок коммутации (БК) находятся в модуле телескопа ART-XC (рис. 6).

Узел рентгеновского детектора (УРД) выполняет следующие задачи: прием и обработка команд из Системы сбора и обработки информации (ССОИ), обработка сигналов синхронизации времени, обеспечение всех необходимых измерений параметров детектора, усиление и аналого-цифровое преобразование выходных сигналов детектора, обработка оцифрованных данных, нахождение участков с зарегистрированными событиями, упаковка данных в телеметрические кадры и передача телеметрической информации в ССОИ.

Детектор рентгеновского излучения, расположенный внутри блока УРД, представляет собой большую гибридную интегральную схему (рис. 7). Чувствительные элементы детектора — это высококачественные кристаллы CdTe (Киши и др., 2008), изготовленные компанией Ascgad (Япония). Размер кристалла 29.95 мм × 29.95 мм × 1.00 мм.

Структура электродов на кристаллах имеет следующую структуру: (вверху) Au/Pt/CdTe/Al/Ti/Au (внизу). Структура CdTe/Al на нижнем электроде образует барьер Шоттки (Тояма и др., 2004). Высококачественный CdTe с барьером Шоттки обеспечивает очень низкий ток утечки. Для работы детектора в двухсторонней стриповой конфигурации, верхний и нижний электроды кристалла изготавливаются методом фотолитографии. На верхней стороне формируются 48 параллельных полосок (стрипов), окруженных охранным кольцом. Такой же узор формируется на нижней стороне, но он повернут на 90° относительно узора на верхней стороне, что позволяет восстановить две координаты регистрируемого события на плоскости детектора. Ширина стрипов составляет 520 мкм, ширина зазоров между ними — 75 мкм. Чувствительная область детектора имеет размер 28.48 мм × 28.48 мм. С учетом фокусного расстояния зеркальной системы (~2700 мм), угловой размер стриповой полоски приблизительно равен 45''.

Стрипы на кристалле подключены ко входам двух специализированных интегральных микросхем (ASIC) VA64TA1 (Танака и др., 2006) производства компании Ideas (Норвегия). Одна микросхема ASIC обслуживает верхнюю сторону кристалла, а другая — нижнюю. Спектрометрический канал VA64TA1 состоит из зарядочувствительного усилителя, быстрого CR-RC формирователя импульсов, дискриминатора, мед-

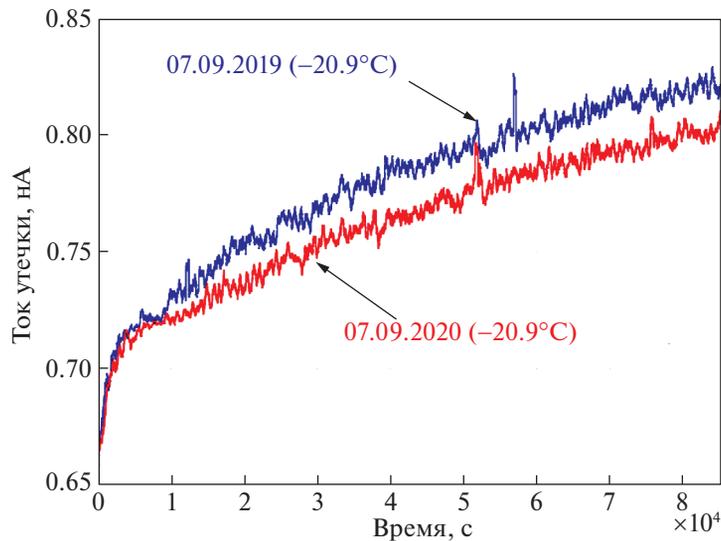


Рис. 8. Зависимость тока утечки от времени в течение одного дня работы детектора на основе кристалла CdTe при напряжении -100 В.

ленного CR-RC формирователя импульсов и устройства выборки и хранения. Каждая микросхема ASIC имеет 64 спектрометрических канала, но используются только 48. Из-за некоторых особенностей архитектуры микросхемы VA64TA1 (она имеет всего один выходной триггерный сигнал) определение сработавшего (триггерного) канала происходит программным образом. УРД может работать в двух режимах. В первом режиме запоминается время события, а также шесть значений амплитуды, зарегистрированных в трех стрипах в верхнем слое и трех стрипах в нижнем слое, в которых было зарегистрировано событие. Это основной режим наблюдения. В этом режиме УРД выдает один телеметрический кадр (1024 байта) на каждое 81 событие. Во втором режиме УРД сохраняет 96 значений амплитуды со всех стрипов верхнего и нижнего слоев. В этом режиме УРД создает один телеметрический кадр (1024 байта) на каждые три события. Из-за большого объема генерируемой информации второй режим используется только для проверок детектора.

Мертвое время детекторов не превышает 0.8 мс. Точность определения времени регистрации события относительно сигналов синхронизации времени космического аппарата не хуже 23 мкс.

Во время полета тепловой режим УРД и рентгеновских детекторов поддерживается блоком управления системой обеспечения теплового режима телескопа ART-XC. Рабочая температура детекторов должна находиться между -22 и -19°C . Стабильность температуры детекторов выдерживается с точностью лучше $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ в месяц.

Высокое напряжение, обеспечиваемое модулем в БЭ, может регулироваться от 0 до -360 В, но реально используется напряжение -100 В. Такое относительно невысокое рабочее напряжение выбрано по трем причинам: рабочий энергетический диапазон телескопа ART-XC не превышает 30 кэВ; это позволяет снизить ток утечки в матрице и уменьшить рабочее напряжение компонентов, обслуживающих высоковольтную сторону кристалла CdTe.

Из-за хорошо известного поляризационного эффекта в приборах на основе CdTe с барьером Шоттки, мы регулярно включаем и выключаем высокое напряжение, подведенное к кристаллу CdTe. На этапе ввода телескопа в эксплуатацию мы провели испытания всех детекторов в течение двух суток непрерывной работы и обнаружили лишь пренебрежимо малые признаки поляризации ($<1\%$). Учитывая низкую рабочую температуру кристаллов CdTe, поддерживаемую в течение долгого времени, мы решили выполнять их деполяризацию раз в сутки. На детекторы подается высокое напряжение 23 ч 50 мин в день, а наблюдения они проводят 23 ч 44 мин в день. Когда режим работы одного детектора изменяется с наблюдения на деполяризацию, все остальные детекторы остаются в режиме наблюдения. Как только деполяризованный детектор возвращается в режим наблюдения, выполняется деполяризация следующего детектора и так далее. Общее время деполяризации всех детекторов — 1 ч 52 мин. В процессе эксплуатации мы отслеживаем токи утечки всех кристаллов. Имеется возможность

измерять только полный ток через объем кристалла и охранные кольца. Один детектор (в УРД-02) имеет ток утечки менее 850 пА, два детектора — менее 400 пА и четыре детектора — менее 100 пА. На рис. 8 показана зависимость токов утечки детектора в УРД-02 от времени за один день работы (“ноль” — время включения высокого напряжения). После одного года полета ток утечки немного уменьшился.

2.4. Электроника телескопа

Электроника телескопа ART-XC состоит из нескольких функциональных компонент (рис. 9):

- комплекс детекторов рентгеновского излучения;
- система сбора и обработки информации (ССОИ);
- звездный датчик (БОКЗ-МФ);
- блок управления системой обеспечения теплового режима (БУ СОТР);
- электроника калибровочных источников.

ССОИ непрерывно собирает и запоминает данные с детекторов, передает данные в бортовую радиосистему (радиокомплекс) во время сеансов связи с Землей, обеспечивает электрический и логический интерфейсы с системой управления космического аппарата.

Блок управления системой обеспечения теплового режима работает непрерывно, контролируя электрические нагреватели телескопа ART-XC. Как было сказано выше, в телескопе 36 основных и 36 резервных нагревателей и столько же датчиков. Каждый нагреватель управляется своим собственным датчиком независимо от других с использованием ПИД-регуляторов. В качестве датчиков температуры используются платиновые термометры сопротивления типа Pt100.

Все электронные компоненты прошли необходимую квалификацию и дополнительные испытания, включая радиационные испытания и выборочный разрушающий физический анализ.

2.5. Бортовая система обработки данных

Система сбора и обработки информации (ССОИ) телескопа ART-XC выполняет следующие задачи:

- сбор и хранение данных с семи детекторов;
- получение и хранение данных ориентации космического аппарата и кватернионов от звездных и гироскопических датчиков;
- поддержание работы датчиков (аналоговых и цифровых), опрашиваемых телеметрической системой космического аппарата;
- синхронизация подсистем и привязка данных к бортовому времени;
- загрузка телекоманд в блок управления телескопом;
- загрузка научных и служебных данных.

Научные данные, накопленные семью детекторами, и данные с БУ СОТР передаются через шину данных телескопа ART-XC (UART/RS-485) в ССОИ. Последняя также получает данные ориентации и кватернионы от гироскопических датчиков космического аппарата и звездных датчиков (БОКЗ-МФ и SED-26), которые передаются системой управления космического аппарата (см. рис. 10). Типичный объем данных телескопа ART-XC составляет 90–120 МБайт в день.

Твердотельная память ССОИ, основанная на флэш-технологии, имеет емкость 512 МБ. Этого объема достаточно, чтобы хранить научные данные за 5 дней. Данные хранятся в памяти с использованием ECC кодов Хэмминга, что позволяет исправлять одиночные ошибки и обнаруживать двойные.

ССОИ имеет высокоскоростной интерфейс с бортовой радиосистемой на базе физического стандарта LVDS (Low Voltage Differential Signaling). Структура пакетов, передаваемых в эту систему, соответствует стандарту CCSDS 133.0-B-1. Радиосистема использует дополнительные турбокоды или коды свертки для передачи по радиолинии, что обеспечивает надежную передачу данных в сеансах связи с Землей.

Телекоманды для управления прибором передаются в ССОИ из системы управления космическим аппаратом по шине данных полезной нагрузки (ГОСТ Р 52070-2003/MIL-STD-1553). Телекоманды могут быть привязаны к определенному времени (сохраняясь в памяти ССОИ) и выполняться с задержкой или напрямую. ССОИ выполняет функцию передачи команд от шины

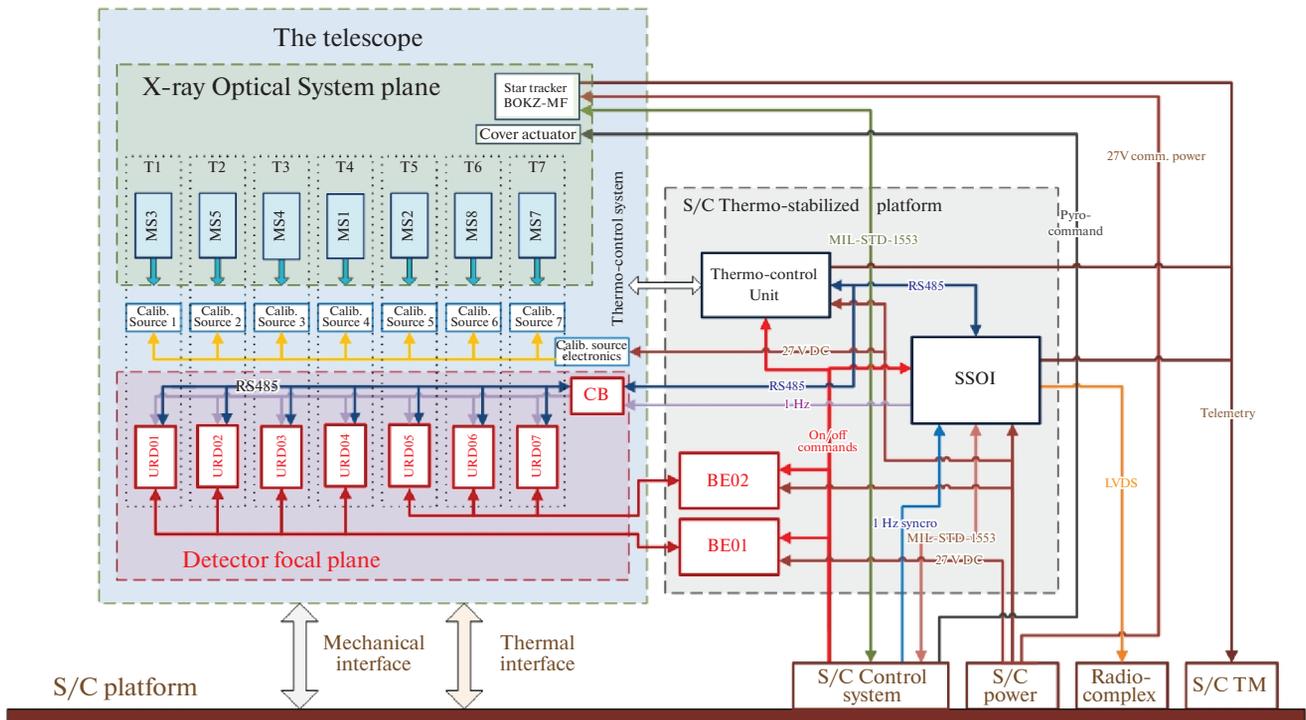


Рис. 9. Блок-схема систем, узлов и интерфейсов телескопа ART-XC.

данных полезной нагрузки (ГОСТ Р 52070-2003/MIL-STD-1553) на шину телескопа ART-XC (UART/RS-485). Регулярный объем команд для ART-XC, загружаемых на борт во время связи с Землей, составляет около 1–2 кбайт в день.

Синхронизация данных со шкалой времени осуществляется передачей кода бортового времени (КБВ) через информационные шины (ГОСТ Р 52070-2003/MIL-STD-1553 и RS-485), а также через синхроимпульсы с частотой 1 Гц. Кратковременная стабильность генератора бортовых часов составляет всего лишь 1×10^{-7} , что приводит к постоянному смещению КБВ на 10 мс в день. КБВ периодически подстраивается специальными командами, передаваемыми на космический аппарат во время сеансов связи с Землей.

2.6. Калибровочные рентгеновские источники

Все детекторы телескопа ART-XC примерно раз в два месяца калибруются. Для этой цели в поле зрения каждого детектора с помощью блока калибровочных источников, имеющего линейный привод, вдвигается источник рентгеновского излучения (изотопы $^{241}\text{Am} + ^{55}\text{Fe}$). Когда детектор используется для наблюдений, калибровочный источник находится внутри свинцового бокса

(рис. 11). Для выполнения калибровки детектора на космический аппарат посылаются необходимые команды. Все калибровочные источники работают независимо.

2.7. Звездный датчик

Звездный датчик телескопа ART-XC БОКЗ-МФ установлен на платформу зеркальной системы рядом с зеркалами, соосно с оптической осью телескопа. БОКЗ-МФ может использоваться как дублирующий звездный датчик в системе управления ориентацией космического аппарата. Основные параметры датчика БОКЗ-МФ представлены в табл. 2. Также на борту космического аппарата находятся два звездных датчика SED-26 от компании SODERN (Франция), информация с которых об ориентации может быть использована при анализе данных телескопа ART-XC. Эти звездные датчики установлены на оптическом корпусе телескопа eROSITA и относятся к системе управления космического аппарата.

3. НАЗЕМНЫЕ КАЛИБРОВКИ

Наземные калибровки телескопа ART-XC проводились с 2014 по 2018 г., при этом на разных этапах были задействованы три испытательных

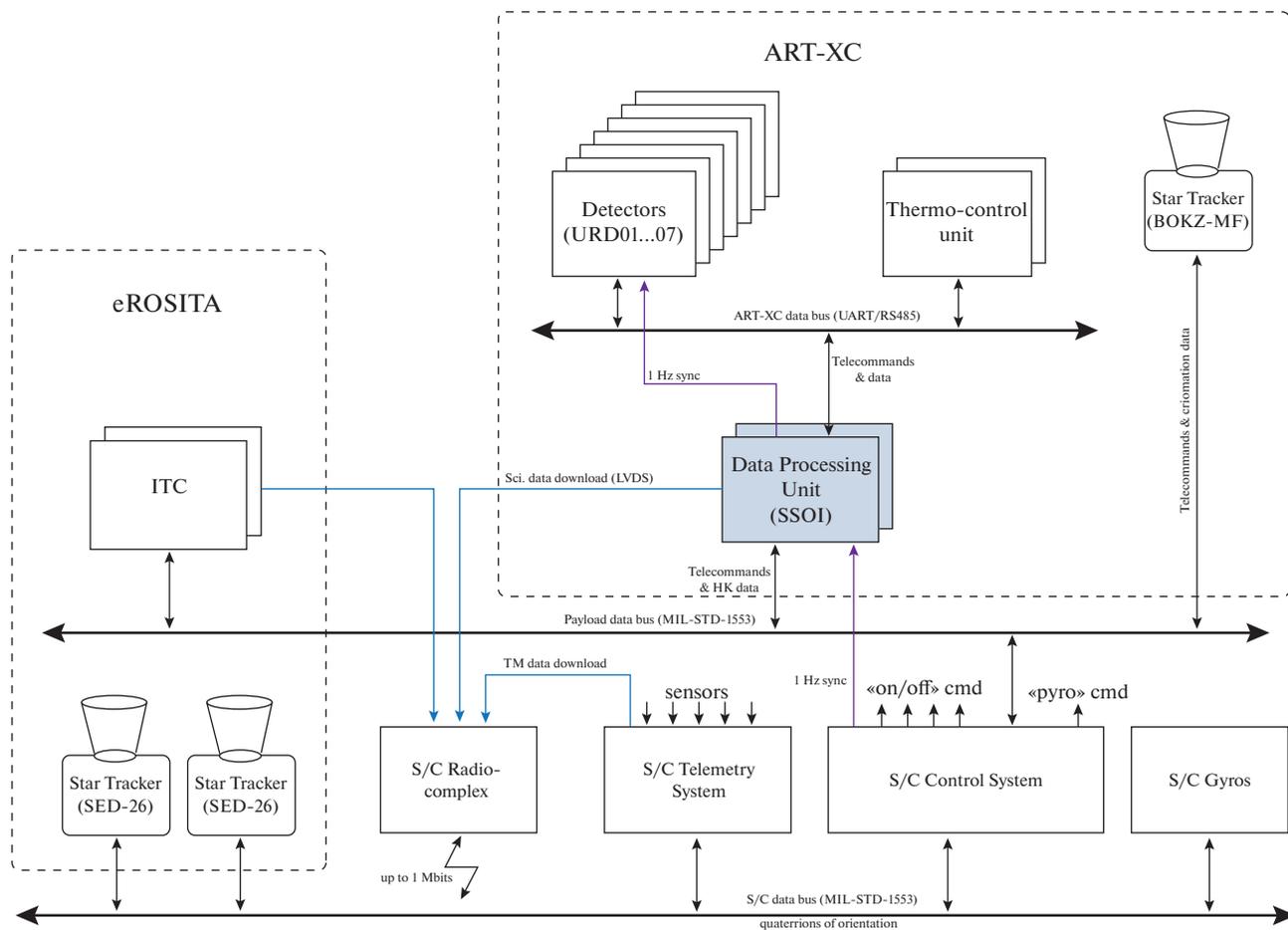


Рис. 10. Бортовая структура обработки данных.

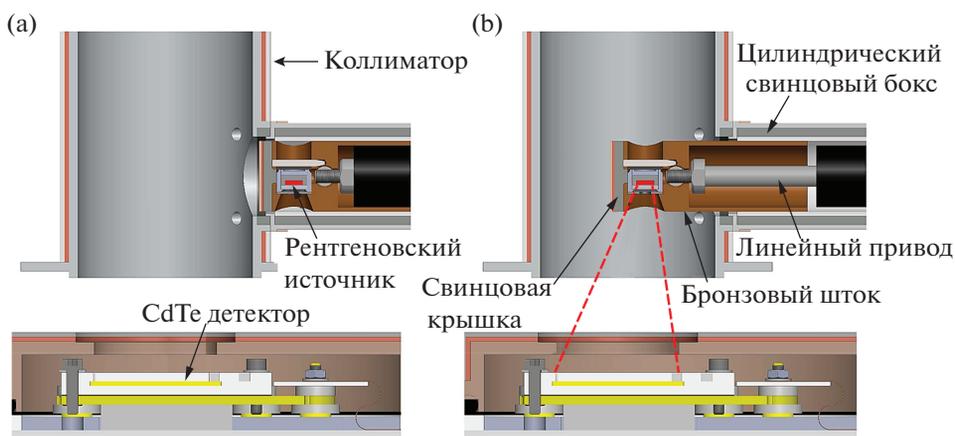


Рис. 11. Калибровочный источник, убранный в свинцовый цилиндрический бокс, прикрепленный к коллиматору модуля телескопа (а). Свинцовый бокс гарантирует отсутствие значимого потока излучения от источника во время астрофизических наблюдений. Источник может быть введен в коллиматор, как показано на панели (b), для облучения детектора.

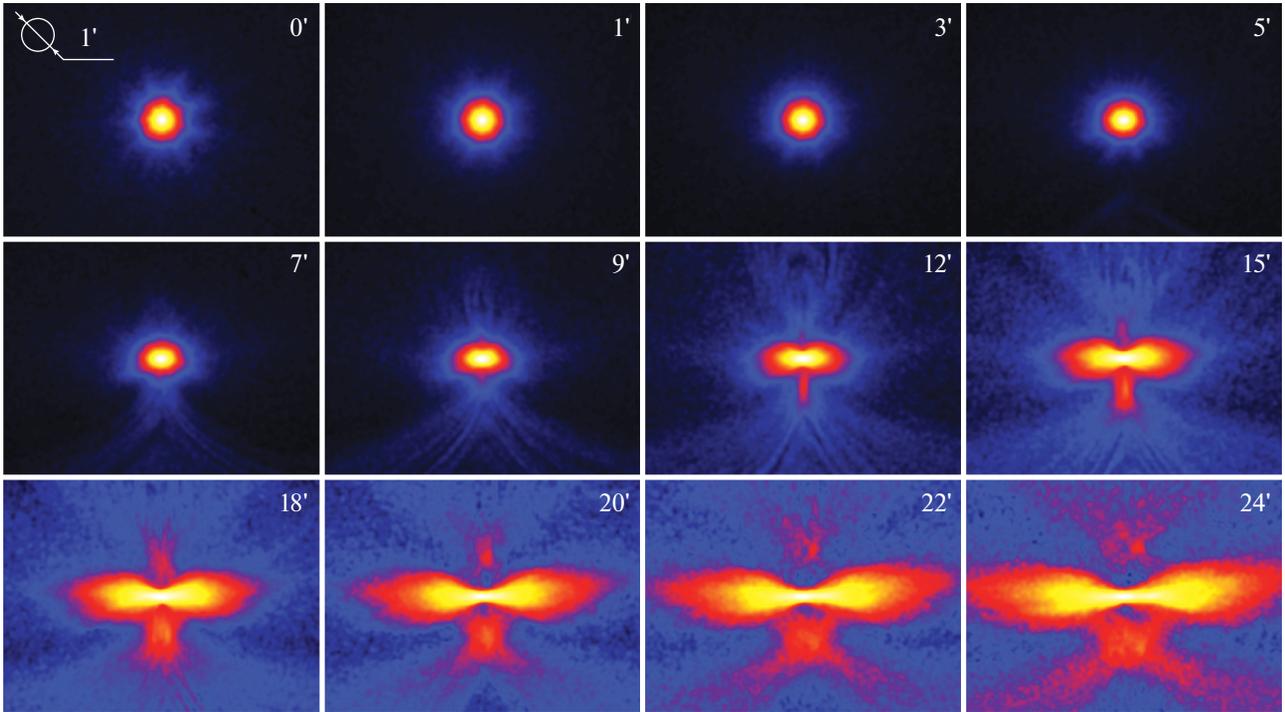


Рис. 12. Образцы функции PSF размытия точечного источника в зеркальной системе MS1 для разных углов смещения (Кривонос и др., 2017). Функция PSF была получена усреднением измерений, выполненных под четырьмя азимутальными углами. Угол смещения показан в верхнем правом углу каждого изображения размером $400'' \times 560''$. Цветовая шкала — логарифмическая. Зеркальная система была расфокусирована на 7 мм.

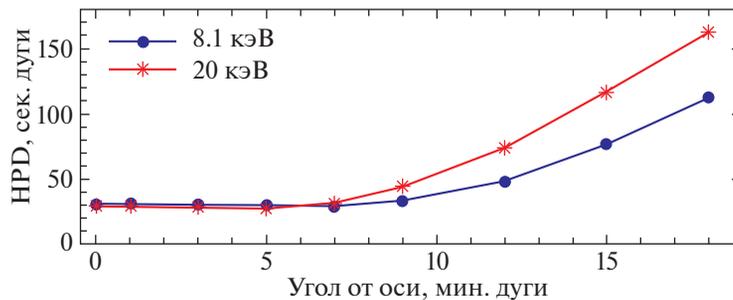


Рис. 13. Диаметр половинной мощности HPD зеркальной системы MS1 на энергиях 8.1 и 20 кэВ для нескольких значений углового расстояния от оси системы (получено на испытательном стенде MSFC по измерению степени рассеяния света). Зеркальная система расфокусирована на 7 мм.

центра: испытательный стенд по измерению степени рассеяния света NASA/MSFC (США), рентгеновский испытательный стенд ИКИ РАН (Россия) и рентгеновский испытательный стенд PANTER Института вневзвешной физики Общества им. Макса Планка (Германия).

Сначала летные зеркальные системы телескопа ART-XC были откалиброваны на испытательном стенде по измерению степени рассеяния света NASA/MSFC (Губарев и др., 2014; Кривонос и

др., 2017). Для каждой зеркальной системы были измерены: диаметр половинной мощности (HPD), функция размытия точечного источника (PSF) с высоким разрешением и эффективная площадь на разных угловых расстояниях от оси и при разных значениях азимутального угла. Рисунок 12 показывает усредненные по азимутальному углу изображения функции PSF размытия точечного источника, полученные для одной из зеркальных систем при разных углах смещения относительно

Таблица 2. Основные характеристики звездного датчика БОКЗ-МФ телескопа ART-XC

Параметр	Значение
Масса	2.8 кг
Потребляемая мощность	$\lesssim 14$ Вт
Допустимая угловая скорость ^a	1 град с^{-1}
Частота обновления ^b	1 с^{-1}
Точность (rms) $\sigma_x, \sigma_y/\sigma_z$	2''5/25''
Поле зрения	14°
Звездная величина	≤ 6 mag
Данные на выходе	Матрица ориентации (cos)
Шина	ГОСТ Р 52070-2003/ MIL-STD-1553

^a Угловая скорость космического аппарата.

^b Частота обновления данных ориентации.

оси системы. Диаметр HPD половинной мощности зеркальной системы MS1 на энергиях 8.1 и 20 кэВ для нескольких значений оффсетного угла показан на рис. 13. В табл. 3 приведены основные параметры, полученные для каждой из восьми зеркальных систем. Семь из них имеют очень похожие характеристики, они были установлены на летной модели ART-XC. Одна зеркальная система (MS6) показала несколько худшее угловое разрешение и поэтому стала запасной.

На основании этих данных калибровки зеркальных систем была создана модель PSF телескопа ART-XC, которая используется при анализе данных ART-XC для обнаружения рентгеновских источников и определения их характеристик. Отметим, что эффективная функция PSF размытия точечного источника в телескопе ART-XC в режимах обзора и сканирования получается путем свертки реальной PSF зеркальной системы с квадратным окном размером в один пиксель детектора (45''). Полученная модель PSF для разных положений источника в поле зрения телескопа показана на рис. 14.

На следующем шаге летные зеркальные системы телескопа ART-XC были откалиброваны вместе с блоками детекторов на 60-метровом рентгеновском испытательном стенде ИКИ РАН в Москве, Россия. По разным причинам время, выделенное для калибровки летных зеркальных систем, было серьезно ограничено. Поэтому были проведены дополнительные, более детальные исследования с помощью запасной зеркальной системы (MS6) и одного из запасных УРД (его заводской номер 29, соответственно, в дальнейшем мы обозначаем его УРД-29) (Павлинский и др., 2018, 2019а,б). Основной целью этих испытаний было определение характеристик рентгеновских детекторов телескопа ART-XC, проверка математической модели зеркальной системы телескопа, основанной на моделировании трассировки лучей, и оценка совершенства телескопа в целом.

Рисунок 15 показывает зависимость от энергии энергетического разрешения ΔE (FWHM), измеренного у запасного УРД-29 телескопа ART-XC. Значительное отклонение от ожидаемой зависимости $\Delta E \sim E^{1/2}$, наблюдаемое у УРД-29 на энергии 5.9 кэВ, связано с особенностью архитектуры микросхемы ASIC VA64TA1. Микросхема не имеет пикового детектора, что приводит при обработке сигналов с амплитудой, близкой к пороговой, к "растяжению" формы пика в сторону низких энергий.

На рис. 16 показана зависимость эффективности регистрации фотонов запасным детектором телескопа ART-XC от их энергии, согласно измерениям на рентгеновском стенде ИКИ РАН. Эффективность достигает 50% на 4.6 кэВ и превышает 90% на энергиях выше 9.5 кэВ.

Завершающий этап наземной калибровки телескопа ART-XC проходил на рентгеновском стенде PANTER Института внеземной физики Общества им. Макса Планка в Ньюрайде, Германия, в октябре 2018 г. (рис. 17). Для этих испытаний использовались запасная система зеркал телескопа ART-XC и запасной детекторный блок, а также pnCCD камера TRoPIC стенда PANTER, которая использовалась также для наземной калибровки зеркальных систем телескопа eROSITA.

Во время этих калибровок была измерена эффективная площадь по оси запасной зеркальной системы телескопа ART-XC с помощью запасного детектора телескопа и рентгеновской камеры TRoPIC. Результаты измерений хорошо согласуются друг с другом (см. табл. 4). Рисунок 18 показывает зависимость эффективной площади запасной зеркальной системы от угла до оси системы по измерениям pnCCD камерой TRoPIC. Параметры функции PSF размытия точечного источника на оси системы приведены в табл. 5.

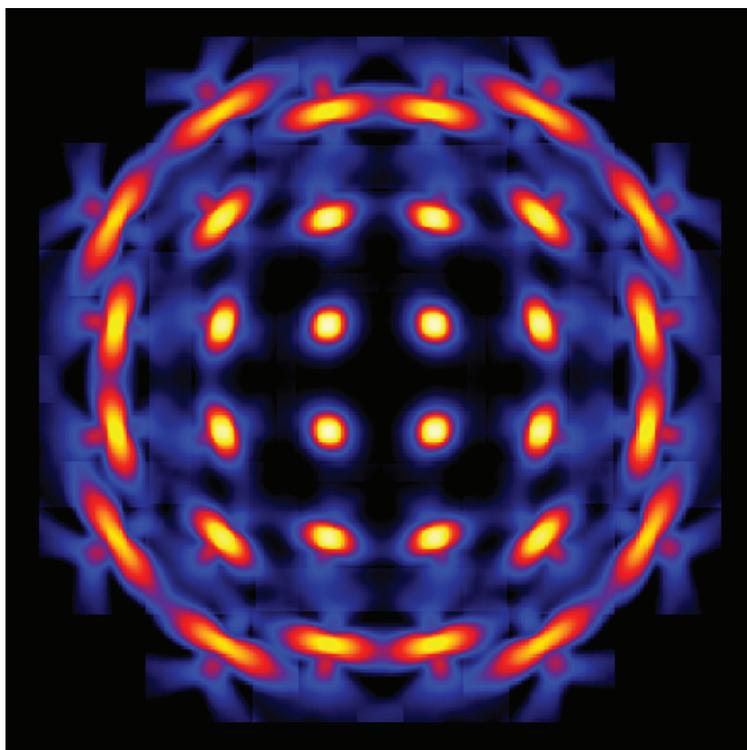


Рис. 14. Модель функции размытия точечного источника (PSF) телескопа ART-XC на энергии 8.1 кэВ, применимая к данным обзора и сканирующих наблюдений, для разных положений точечных источников в поле зрения телескопа.

Таблица 3. Основные параметры зеркальных систем телескопа ART-XC на энергии 8.1 кэВ

Номер системы	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	MS8
HPD ^a на оси, сек. дуги	29.7	31.8	32.2	33.7	30.3	40.3	33.0	34.8
W90 ^b на оси, сек. дуги	94.1	108.6	101.1	121.9	124.7	139.2	115.9	117.4
Эффективная площадь на оси, см ²	71.0	69.0	67.0	65.2	64.0	66.0	67.0	66.6

^a Диаметр круга половинной мощности.

^b Диаметр круга, содержащего 90% фотонов точечного источника.

Предположив, что все семь летных детекторов телескопа ART-XC имеют примерно такую же эффективность как эффективность, измеренная для запасного УРД-29, и приняв хорошо откалиброванную модель для эффективной площади зеркальных систем, можно оценить зависимости от энергии эффективной площади по оси телескопа ART-XC и его граспа (Павлинский и др., 2019а,б). Рисунок 19 показывает полученные оценки эффективной площади телескопа ART-XC. На оси телескопа эффективная площадь на энергии 8.1 кэВ составляет ~ 385 см².

4. МИССИЯ

4.1. Планирование и график работы миссии

Миссия SRG управляется разработчиком и создателем платформы “Навигатор” — НПО им. С.А. Лавочкина. Планирование миссии в основном происходит ежемесячно. План наблюдений на следующий месяц готовится ИКИ РАН и проверяется НПО им. С.А. Лавочкина на предмет наличия возможных наблюдательных ограничений. Утвержденная месячная программа наблюдений обычно делится на блоки-расписания, которые

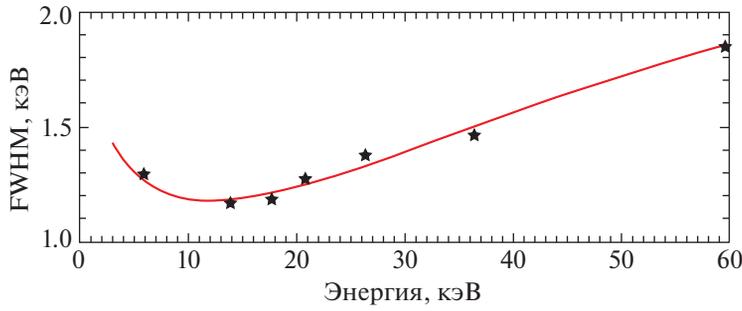


Рис. 15. Энергетическое разрешение (FWHM) детектора в запасном УРД (номер 29) телескопа ART-XC как функция от энергии. Красная кривая — это приближение кубической полиномиальной функцией от $E^{1/2}$ в диапазоне 3–60 кэВ.

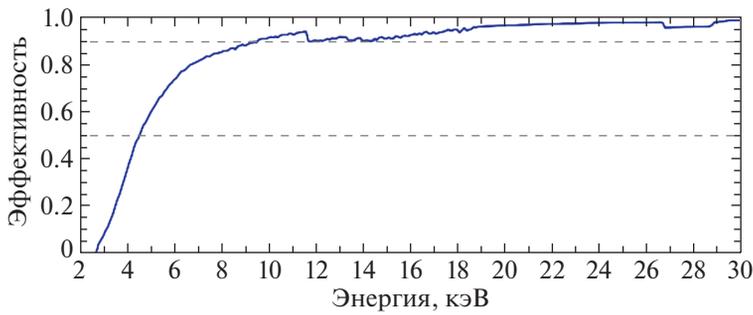


Рис. 16. Оценка эффективности детектора в запасном УРД-29 телескопа ART-XC на основе модели эффективности детектора в спектрометре XR-100T-CdTe (Amptek, США).

могут быть отправлены на космический аппарат в ходе ежедневных контактов с Землей. Это, естественно, устанавливает ограничение на время

отклика обсерватории SRG на возможные транзитные события — от одного дня до нескольких дней. Действующее расписание наблюдений об-

Таблица 4. Эффективная площадь на оси запасной зеркальной системы телескопа ART-XC по измерениям на испытательном стенде PANTER

Источник	Энергия ^а , кэВ	Эффективная площадь ^б	
		УРД-29	TRoPIC
Ti	4.51	60.4 ± 0.6	—
Cr	5.41	60.9 ± 0.4	60.6 ± 1.1
Cu	8.04	66.8 ± 0.4	67.0 ± 0.7
Ge	9.89	—	68.1 ± 1.4

^а Энергия K_{α} -линии излучения.

^б Площадь, измеренная разными детекторами, см².

Таблица 5. Параметры функции PSF размытия точечного источника в запасной зеркальной системе телескопа ART-XC (по данным pCCD камеры TRoPIC рентгеновского испытательного стенда PANTER)

Источник	Энергия ^а , кэВ	HPD ^б , сек. дуги	W_{90} ^в , сек. дуги
Ti	4.51	35.7	159
Cr	5.41	36.1	152
Fe	6.40	36.6	170
Cu	8.04	38.6	225
Ge	9.89	38.9	241

^а Энергия K_{α} -линии излучения.

^б Диаметр круга сбора 50% мощности.

^в Диаметр круга сбора 90% мощности.

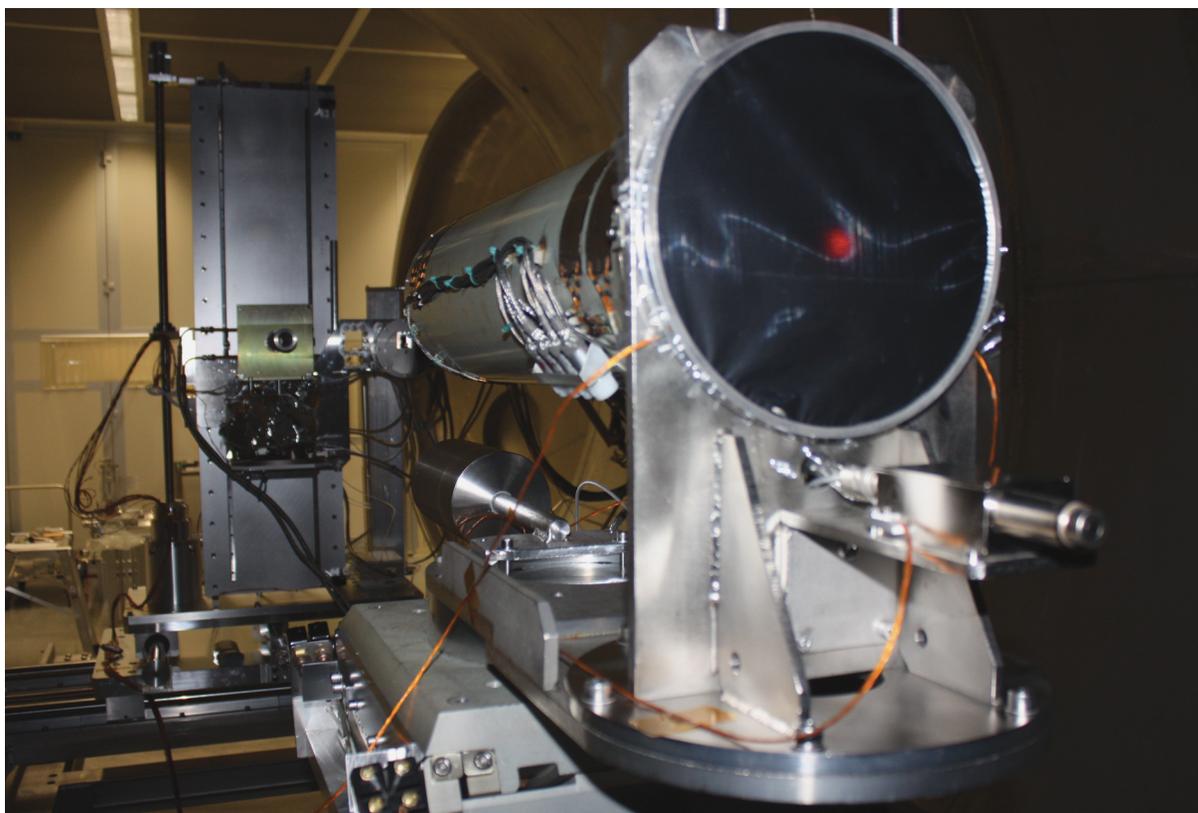


Рис. 17. Запасная зеркальная система MS6 телескопа ART-XC и детекторный блок УРД-29, установленные на рентгеновском стенде PANTER.

серватории СРГ доступно на специальном сайте srg.cosmos.ru. В табл. 6 приведены основные вехи работы телескопа ART-XC с момента запуска обсерватории СРГ и до начала обзора всего неба.

4.2. Режимы наблюдений телескопом ART-XC

Существуют три режима научных наблюдений, проводимых телескопом ART-XC на борту космического аппарата: (1) режим точечных (направленных) наблюдений, (2) обзорный режим и (3) режим сканирования.

В режиме точечных наблюдений оптическая ось телескопа фиксируется в заданном направлении. Этот режим обычно используется для калибровочных наблюдений.

Режим обзора используется во время обзора всего неба. В этом режиме оптическая ось телескопа вращается с периодом 4 ч вокруг оси космического аппарата, направленной в сторону Солнца. Это обеспечивает полное покрытие неба примерно за 6 мес. Мы можем управлять параметрами движения оси вращения, устанавливая плоскость вращения, скорость вращения и начальное направление. Обычно это делается раз в неделю. В течение первых двух обзоров плоскость вращения совпадала с плоскостью эклиптики.

Режим сканирования — это третий режим наблюдений, реализованный в миссии СРГ, который позволяет наблюдать довольно большие области неба (максимально $12^{\circ}5 \times 12^{\circ}5$) с равномерной экспозицией. В этом режиме оптическая ось телескопа ART-XC движется “по змейке”. Система управления космическим аппаратом автоматически проводит серию повторных последовательных вращений вокруг двух осей космического аппарата с набором predetermined параметров; этот набор называется “шаблоном”, разрабатывается он в ИКИ РАН. До использования “шаблон” должен быть проверен и согласован с Группой управления космическим аппаратом.

Режим сканирования широко использовался на этапе калибровки и проверки работоспособности, а также во время дополнительных калибровочных сеансов. С его помощью получены превосходные результаты (см. рис. 20).

4.3. Научный центр управления

Схема наземного научного сегмента показана на рис. 21. Основные задачи научного центра управления — это контроль состояния оборудования, мониторинг работоспособности, сброс телеметрической информации, а также распаковка,

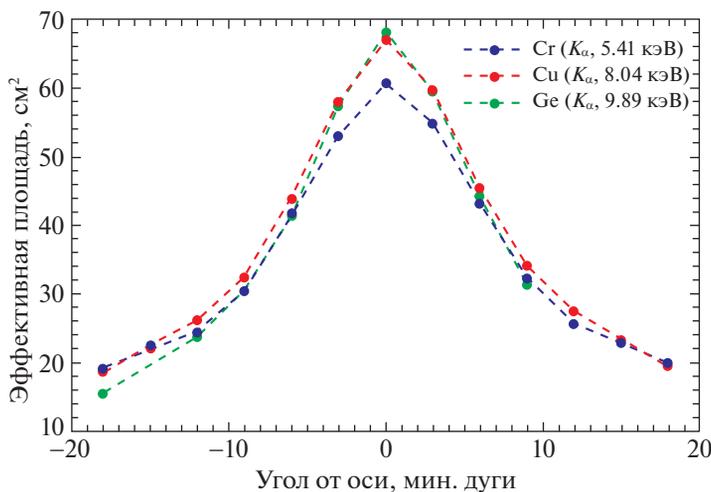


Рис. 18. Эффективная площадь запасной зеркальной системы телескопа ART-XC как функция угла до оси системы (по данным измерений pCCD камерой TRoPIC на испытательном стенде PANTER). Измерения выполнены в K_{α} -линиях Cr (5.41 кэВ, синие точки), Cu (8.04 кэВ, оранжевые точки) и Ge (9.89 кэВ, зеленые точки).

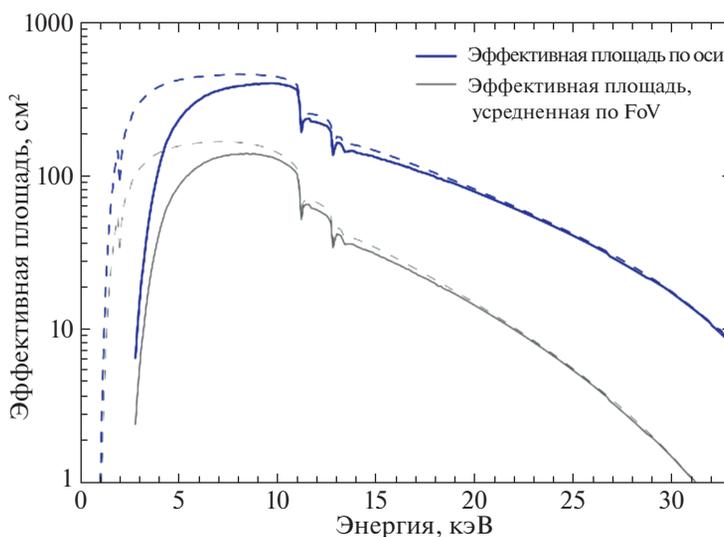


Рис. 19. Зависимость от энергии эффективной площади телескопа ART-XC для дважды отраженных событий по оси и после усреднения по полю зрения (сплошные кривые). Основано на результатах моделирования эффективной площади зеркальной системы ART-XC (пунктирные кривые) и эффективности детектора УРД-29 (рис. 18).

проверка и первичная обработка научных данных. Эти операции выполняются ежедневно во время сеансов связи миссии с Землей. Типичный список ежедневных операций включает следующие этапы:

- мониторинг оборудования телескопа, в том числе показаний разных датчиков температуры, тока и напряжения, состояния бортового оборудования, объема доступных данных и т.д.;
- сброс данных из массовой памяти. Объем данных при работе в режиме обзора составляет в среднем ~ 100 МВ день⁻¹. Вся телеметрическая информация передается на наземные станции приема данных, затем в Центр управления миссией и далее в Научный центр управления;
- распаковка, проверка целостности и обработка данных (в том числе создание отчетов быстрого просмотра);

Таблица 6. Основные события, происходившие с телескопом ART-XC с момента запуска и до начала обзора

Дата	Время	Событие
2019.07.13	15:31	Запуск
2019.07.13	17:31	Окончание разгона космического аппарата и отделение от него разгонного блока ДМ-03
2019.07.13	18:43	Включение подсистем телескопа и сохранение ими бортовой информации
2019.07.13	18:58	Включение системы терморегулирования телескопа
2019.07.18	18:42	Получение первой телеметрической информации с первой рентгеновской камеры
2019.07.21		Включение всех камер и подтверждение их работоспособности
2019.07.22		Первая коррекция орбиты
2019.07.23	18:31	Открытие крышки телескопа
2019.07.27		Открытие первого калибровочного источника рентгеновского излучения и проведение первой калибровки первой камеры, начало ввода камер в эксплуатацию
2019.07.30	17:29	“Первый свет” (изображение пульсара Сеп X-3 во всех камерах)
2019.08.06		Вторая коррекция орбиты
2019.08.25		Завершение ввода в эксплуатацию семи камер, успешное перепрограммирование EEPROM первой камеры в рабочую конфигурацию, начало фазы калибровки и проверки работоспособности телескопа ART-XC
2019.10.05		Завершение фазы калибровки и проверки работоспособности ART-XC
2019.10.21		Третья коррекция орбиты
2019.12.12		Начало обзора всего неба

— детальный анализ состояния научного оборудования;

— анализ отчета быстрого просмотра на наличие аномалий в данных;

— проведение сеансов с подачей команд управления в реальном времени (только в аварийных случаях, чтобы иметь возможность быстро перенастроить оборудование во время сеансов связи с Землей);

— составление программы управления на следующий день.

Операции наземного сегмента телескопа ART-XC занимают в среднем $\sim 20\%$ от общего времени контакта с Землей.

4.4. Центр научных данных

Весь научный анализ данных телескопа ART-XC обсерватории СРГ и архивирование данных осуществляются в Центре научных данных ИКИ РАН. Сюда входят: обработка данных, их анализ в почти реальном времени, обработка обзора неба, оптическая наземная поддержка и архивирование данных. Дополнительно, Центр научных данных ИКИ РАН отвечает за выполнение таких же задач

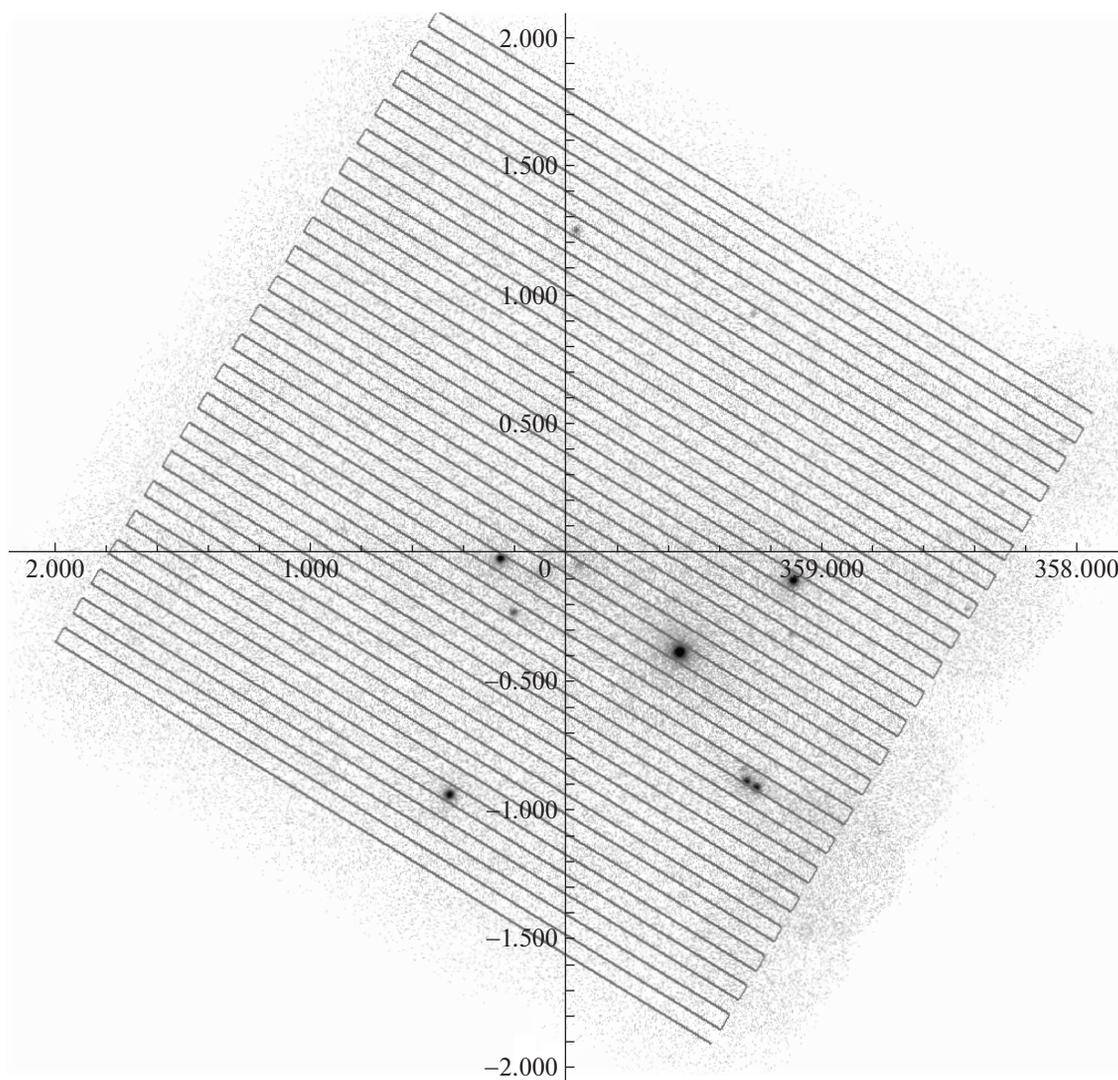


Рис. 20. Пример наблюдения в режиме сканирования: скан области галактического центра 10 сентября 2019 г. (в галактических координатах).

для телескопа eROSITA в отношении российской квоты научных данных (Сюняев и др., 2021, 2022).

4.4.1. Обработка данных. Программное обеспечение для обработки данных телескопа ART-XC предоставляет средства для создания чистых откалиброванных научных продуктов.

Программное обеспечение организовано в виде ряда независимых заданий, запускаемых из командной строки (рис. 22). Эти задания могут быть связаны в последовательности (с помощью управляющего задания или вручную) для производства научных данных разных уровней и извлечения различных научных продуктов. Схема обработки данных представлена на рис. 22.

Имеются следующие уровни обработки данных:

- RAW: необработанные данные телеметрии (двоичные форматы);
- L0: данные телеметрии (FITS);
- L1: калиброванные научные данные (FITS);
- L2: очищенные научные данные (FITS);
- L3: научные продукты (изображения, кривые блеска, спектры и т.д.);
- SKYMAP: данные обзора всего неба уровней L2 и L3 в отдельных участках неба, включая изображения, карты экспозиции и фона, каталоги рентгеновских источников и др.

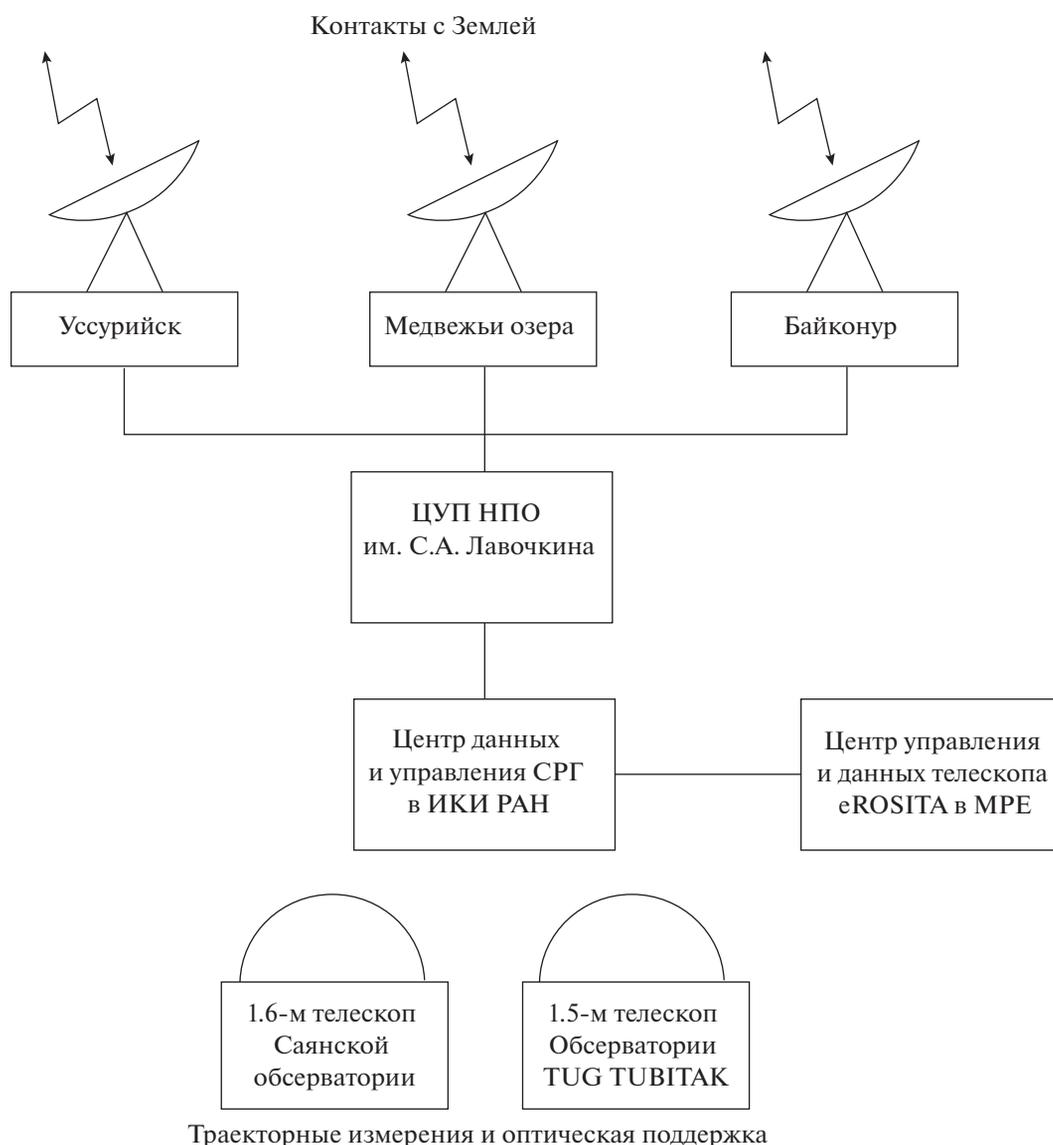


Рис. 21. Наземный научный сегмент.

Поток телеметрической информации, получаемый во время ежедневных сеансов связи, проверяется на наличие ошибок передачи и разделяется на данные детекторов и звездных датчиков с использованием средств и заданий пакета ARTDAC. Эти сырые (RAW) данные затем обрабатываются предпроцессором ARTPREPROC, который считывает телеметрию телескопа ART-XC, проверяет ее целостность и выполняет преобразование в стандартный FITS формат. Данные уровня L0 обрабатываются программным обеспечением конвейера ARTPIPELINE, который сначала производит откалиброванные данные (уровня L1), а затем очищенные научные данные (уровня L2). Откалиброванные данные включают списки событий для

каждого из телескопов и данные об ориентации космического аппарата. Для каждого события в списке вычисляются истинная энергия фотона и небесные координаты, применяются поправки ко времени его регистрации и, наконец, присваивается ранг события. По имеющимся данным ориентации (звездных датчиков БОКЗ-МФ и SED-26, а также инерциальной навигационной системы ГИВУС) выполняется реконструкция ориентации космического аппарата. Очищенные научные данные используются в научном анализе. Данные получают путем проверки и коррекции файлов событий на основе разных критериев отбора с учетом ориентации и орбиты аппарата, параметров состояния приборов, свойств самих событий.

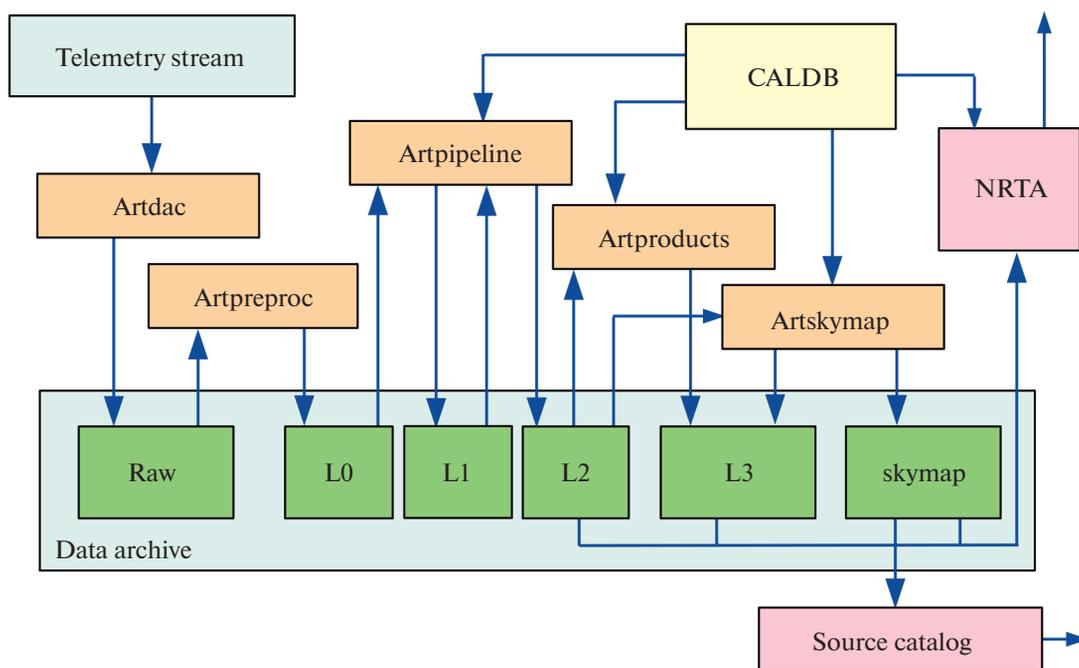


Рис. 22. Схема обработки данных телескопа ART-XC.

Очищенные научные данные обрабатываются заданиями пакета ARTPRODUCTS для получения научных продуктов уровня L3, в том числе изображений, кривых блеска, энергетических спектров и прочих. Данные обзора всего неба организованы в виде 4700 перекрывающихся фрагментов неба размером $3^{\circ}6 \times 3^{\circ}6$ (ARTSKYMAP), которые ежедневно обновляются для создания соответствующих продуктов данных уровня L3, таких как каталоги источников рентгеновского излучения (см. ниже). Большинство научных продуктов уровня L3 представлены в виде файлов стандарта FITS и могут быть использованы в стандартных пакетах программного обеспечения для рентгеновского анализа (например, HEASOFT).

Появление продуктов, относящихся к обзору неба, запускает процедуру регистрации источников, которая формирует каталог кандидатов в реальные источники. Обнаружение источника и определение его характеристик осуществляются путем вейвлет-разложения (wvdecomp, Гребенев и др., 1995; Вихлинин и др., 1998), алгоритмов подгонки согласованного фильтра и функции максимального правдоподобия. Они используют совершенную модель функции PSF размытия точечного источника (с учетом зависимости от угла смещения источника от оси), построенную по результатам калибровки зеркальных систем телескопа ART-XC в MSFC (см. раздел 3). Списки источников подвергаются процедурам

кросс-корреляции и идентификации источников с использованием различных существующих каталогов рентгеновских источников и астрономических баз данных. Полученные данные обзора неба, каталоги источников и изображения участков неба доступны для авторизованных пользователей через специальный веб-интерфейс.

Программное обеспечение, предназначенное для конечных пользователей, будет сделано общедоступным одновременно с данными телескопа ART-XC. Подробная информация о процессе обработки данных и программном обеспечении будет обсуждаться в последующих публикациях.

4.4.2. Система быстрого анализа данных. Научные данные высокого уровня, полученные в процессе обработки сырых данных, анализируются автоматической системой быстрого анализа данных (NRTA). Система выполняет вычисление скорости счета (в диапазоне энергий 4–12 кэВ), создает карты фона и экспозиции сегмента неба, наблюдавшегося в течение предыдущего дня. Затем к научным данным применяется простой метод скользящего окна для поиска источников на рентгеновском изображении. Наконец, выполняется кросс-корреляция итогового ежедневного каталога кандидатов в источники телескопа ART-XC с каталогом рентгеновских источников и общим каталогом источников, имеющимися в системе. Результаты этого анализа на масштабе одного часа сообща-

ются группе по анализу транзитных событий, зарегистрированных телескопом ART-XC.

4.4.3. Наземная поддержка на оптических телескопах. Оптические телескопы, входящие в наземный сегмент, решают две важные задачи. Первая — траекторные измерения космического аппарата СРГ, позволяющие лучше узнать его положение, что особенно важно непосредственно до и после коррекций его орбиты. Вторая задача — наблюдение потенциально интересных астрофизических объектов, обнаруженных в рентгеновских лучах телескопом ART-XC, с целью определения их природы, измерения их красного смещения и т.д. Такие наблюдения, в частности, проводятся на двух специально предназначенных для этой цели оптических телескопах, являющихся частью наземного сегмента миссии СРГ: 1.6-м телескопе Саянской обсерватории (АЗТ-33ИК, Буренин и др., 2016), управляемом Институтом солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), и Русско-Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150), совместно управляемом Казанским федеральным университетом, Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН, Москва) и Национальной обсерваторией ТУБИТАК (TUG, Турция).

5. НАУЧНЫЕ ЦЕЛИ И ОЖИДАНИЯ

Основная цель телескопа ART-XC — обзор всего неба в диапазоне рентгеновских энергий 4–12 кэВ с рекордно высокой чувствительностью $\sim 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ ($\sim 10^{-13}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ вблизи полюсов эклиптики) и угловым разрешением менее минуты дуги. Относительно жесткий энергетический диапазон телескопа ART-XC особенно хорошо подходит для изучения популяций астрофизических объектов, рентгеновское излучение которых сильно искажено внутренним поглощением, таких как активные ядра галактик (AGN), массивные рентгеновские двойные системы (НМХВ) и катаклизмические переменные (CV).

За последние два десятилетия был проведен ряд обзоров всего неба (незапланированных, сопутствующих обычным наблюдениям) в диапазонах энергий, близких к диапазону телескопа ART-XC. Обзор XSS во время перенаведений спутника RXTE (RXTE Slew Survey) достиг чувствительности $\sim 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ при угловом разрешении $\sim 1^\circ$ в диапазоне энергий 3–20 кэВ во внегалактическом ($|b| > 10^\circ$) небе (Ревнивцев и др., 2004). Несколько лучшая чувствительность ($\sim 5 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$) была достигнута в диапазоне энергий 4–10 кэВ в обзоре всего неба прибора MAXI/GSC (Хори и др., 2018; Кавамура и

др., 2018), который оснащен коллиматором подобно XSS. Аналогичная средняя глубина в диапазоне энергий 2–12 кэВ, но при отличном угловом разрешении (благодаря использованию зеркальной рентгеновской оптики), характеризует обзор XMMSL, выполненный во время перенаведений обсерватории XMM-Newton (XMM-Newton Slew Survey, Сакстон и др., 2008). Обзор XMMSL, однако, покрыл небо очень неравномерно и далеко неполностью (84%). Отметим обзор центральных ($< 20^\circ$) областей Галактики, выполненный в диапазонах 5–10 и 10–20 кэВ телескопом с кодирующей апертурой JEM-X обсерватории INTEGRAL с чувствительностью 8×10^{-12} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ и разрешением лучше минуты дуги (Гребенев, Мереминский, 2015). Кроме этого, были выполнены обзоры всего неба (также незапланированные) в жестком рентгеновском диапазоне (выше 15 кэВ) с помощью телескопов с кодирующими масками INTEGRAL/IBIS и Swift/BAT, достигшие глубины $\sim 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ при угловом разрешении ~ 5 –10 мин. дуги (например, Кривонос и др., 2007, 2012, 2021; Кусумано и др., 2010; Берд и др., 2007, 2016; Мереминский и др., 2016; Ох и др., 2018).

Обзор всего неба телескопом ART-XC значительно улучшит и превзойдет эти обзоры в плане углового разрешения, чувствительности и однородности покрытия и обеспечит богатую астрофизическую базу данных для исследований галактических и внегалактических объектов, как кратко описано ниже.

5.1. Внегалактические объекты

5.1.1. Активные галактические ядра. Поскольку регистрация рентгеновского источника в диапазоне энергий 4–12 кэВ намного меньше подвержена влиянию фотопоглощения в газе на луче зрения по сравнению с более мягкими диапазонами, обзор телескопа ART-XC предоставит уникальные данные для изучения популяции AGN на $z \lesssim 0.3$. Ожидается, что примерно 50% всех AGN, найденных ART-XC, будут объектами с поглощением, включая $\lesssim 10^3$ сильно поглощенных (видимых сквозь слой вещества в самом источнике с поверхностной плотностью водорода $N_{\text{H}} \gtrsim 10^{23} \text{см}^{-2}$). Многие из этих объектов не будут обнаружены в более мягких рентгеновских лучах телескопом eROSITA, и поэтому телескоп ART-XC внесет решающий вклад в перепись AGN телескопами обсерватории СРГ.

В рамках подготовки к миссии СРГ была проведена серия симуляций сканирующих наблюдений телескопом ART-XC, основанных на наших предполетных знаниях характеристик прибора. Было продемонстрировано (Мереминский и др.,

2018), что чувствительность наблюдений телескопом ART-XC должна существенно зависеть от интенсивности фона заряженных частиц на орбите космического аппарата СРГ, предполетные оценки которой варьировались почти на порядок величины. Соответственно, было предсказано, что в ходе обзора всего неба может быть обнаружено до $\sim 10\,000$ AGN. Как будет обсуждено ниже (п. 6.3), действительная интенсивность фона, измеренная в полете, оказалась относительно высокой (хотя и ниже наиболее пессимистичных ожиданий), что вместе с предварительным подсчетом источников, обнаруженных во время первых двух сканирований неба в декабре 2019 г. — декабре 2020 г. (см. п. 6.4 ниже), предполагает, что после завершения 4-летнего обзора телескопом ART-XC будет обнаружено ~ 3000 AGN.

Полученная в итоге выборка должна значительно улучшить наше понимание свойств популяции AGN. На пределе чувствительности $\sim 10^{-12}$ эрг с^{-1} см^{-2} телескоп ART-XC сможет обнаруживать сейфертовские галактики (с типичными рентгеновскими светимостями $\lesssim 10^{44}$ эрг с^{-1}) вплоть до $z \sim 0.3$ — заметно более далекие по сравнению с галактиками с $z \lesssim 0.1$, доступными в уже имеющихся жестких рентгеновских обзорах, выполненных обсерваториями INTEGRAL (Мализия и др., 2020) и Swift (Косс и др., 2017). Это позволит проследить эволюцию AGN (в том числе поглощенных) в течение последних ~ 3 млрд лет.

Самые интересные AGN, найденные телескопом ART-XC, будут детально изучены в ходе последующих наблюдений в других диапазонах длин волн и, возможно, целенаправленных наблюдений обсерватории СРГ после завершения обзора всего неба. Важно отметить, что eROSITA и ART-XC вместе обеспечивают широкое спектральное покрытие от 0.2 до 30 кэВ для ярких AGN. Еще одна уникальная способность миссии СРГ — частый и квазирегулярный мониторинг (во время обзора всего неба) слабых источников рентгеновского излучения, расположенных вблизи полюсов эклиптики. Телескоп ART-XC сможет исследовать AGN в этих областях (общей площадью несколько сотен квадратных градусов) вплоть до красных смещений $z \sim 1$ в диапазоне энергий ~ 8 –24 кэВ системы покоя объекта.

5.1.2. Скопления галактик. Ожидается, что во время обзора всего неба ART-XC достоверно обнаружит в диапазоне энергий 4–12 кэВ приблизительно 500 наиболее массивных и горячих близких (с небольшим красным смещением) скоплений галактик. Для приблизительно 100 ярчайших скоплений можно будет измерить потоки в диапазоне энергий 6–12 кэВ с точностью $\approx 10\%$. В сочетании с наблюдениями этих скоплений в более мягком

рентгеновском диапазоне эти измерения в жестком диапазоне значительно улучшат определение температуры газа внутри скоплений. Более того, телескоп ART-XC должен обеспечить обнаружение на уровне нескольких σ или получение надежных верхних пределов на поток жесткого рентгеновского излучения от приблизительно 1000 скоплений и раскрыть возможное присутствие AGN в их центральных галактиках. Это приведет к более надежным и жестким ограничениям на космологические параметры, выводимые из данных обзора всего неба обсерватории СРГ.

Глубокие наблюдения избранных скоплений и групп галактик телескопом ART-XC позволят картографировать их жесткое рентгеновское излучение в гораздо больших угловых масштабах, чем это возможно по данным телескопа NuSTAR, и выполнить поиск нетеплового излучения в скоплениях на этих угловых масштабах. Это может быть достигнуто благодаря большому полю зрения ($36'$ в диаметре) телескопа ART-XC по сравнению с полем телескопа NuSTAR ($13' \times 13'$), а также благодаря более однородному фону².

5.2. Галактические объекты

5.2.1. Рентгеновские двойные и катаклизмические переменные. Ожидается, что после завершения обзора всего неба, телескопом ART-XC будут обнаружены все источники с рентгеновской светимостью $L_X \gtrsim 10^{34}$ эрг с^{-1} в пределах 10 кпк от Солнца, т.е. внутри галактического балджа и примерно половины галактического диска. Это будет скачком вперед по сравнению с предыдущими рентгеновскими обзорами, в которых исследовался тот же объем, но лишь до $L_X \sim 10^{35}$ эрг с^{-1} . Может существовать весьма представительная галактическая популяция маломассивных и массивных рентгеновских двойных систем со светимостью $L_X \sim 10^{34}$ – 10^{35} эрг с^{-1} . Несмотря на значительный прогресс в изучении таких систем в последние десятилетия (см., например, Ревнивцев и др., 2008; Лутовинов и др., 2013; Гребенев, Мереминский, 2015; Хонг и др., 2016; Кречмар и др., 2019; Сазонов и др., 2020; Папитто и др., 2020), их физические и статистические свойства все еще известны намного хуже, чем свойства более ярких

²Известно, что телескопы NuSTAR страдают от боковой засветки детектора (светом, несфокусированным оптикой), что приводит к сильной неоднородности фона. Этот эффект был учтен во время проектирования телескопа ART-XC, что помогло в значительной степени подавить боковую засветку (п. 2.1). Кроме того, наблюдения телескопом ART-XC в режиме сканирования (п. 4.2) приводят к очень однородной экспозиции неба по сравнению с мозаичными обзорами телескопа NuSTAR.

рентгеновских двойных с $L_X \sim 10^{35} - 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$. Телескоп ART-XC впервые сделает перепись таких рентгеновских двойных с низкой светимостью. Используя эту уникальную выборку, мы надеемся значительно улучшить наше понимание различных режимов аккреции на нейтронные звезды и черные дыры. Дополнительно мы ожидаем найти ряд новых значительных поглощенных галактических источников, аналогичных тем, которые были обнаружены обсерваторией INTEGRAL (Уолтер и др., 2015).

Ожидается также, что обзор всего неба телескопом ART-XC обеспечит большой вклад в изучение катаклизмических переменных (CVs). Такие объекты (аккрецирующие белые карлики) могут быть более многочисленными, чем рентгеновские двойные с нейтронными звездами и черными дырами, но статистические исследования этих объектов были серьезно ограничены недостаточной чувствительностью предыдущих рентгеновских обзоров. Мы ожидаем, что при помощи телескопа ART-XC будет найдено до $\sim 10^3$ CVs, тогда как в существующих рентгеновских каталогах (например, Сазонов, Ревнивцев, 2004; Преториус и др., 2013; де Мартино и др., 2020; Лутовинов и др., 2020) присутствуют несколько десятков таких объектов. Это, вместе с наличием точных измерений расстояний до многих из этих объектов миссией Gaia (Браун и др., 2018), впервые обеспечит точное измерение функции рентгеновской светимости катаклизмических переменных (Мереминский и др., 2019).

5.2.2. Остатки сверхновых. Остатки вспышек сверхновых (SNRs) являются источниками теплового рентгеновского излучения газа, разогретого ударной волной, и нетеплового (синхротронного) излучения, вызванного высокоэнергичными электронами, движущимися в магнитных полях. Нетепловое рентгеновское излучение дает важную информацию об особенностях ускорения частиц, силе магнитного поля и турбулентности вблизи ударных фронтов SNRs. Наблюдения телескопом ART-XC позволят провести высококачественные морфологические исследования галактических SNRs, чтобы лучше ограничить компоненты их теплового и нетеплового излучения.

5.3. Галактический рентгеновский фон

Благодаря регулярному многократно повторенному сканированию всего неба и стабильному фону заряженных частиц на гало-орбите точки L2, телескоп ART-XC получит уникальную высококачественную карту неба в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Эта карта будет полезна не только для регистрации отдельных источников разных типов, как обсуждалось выше, но также должна выявить с беспрецедентной детализацией крупномасштабное жесткое рентгеновское излучение Галактики. Это

так называемое рентгеновское излучение галактического хребта (GRXE) в основном представляет собой наложение многочисленных неразрешенных слабых рентгеновских источников, таких как катаклизмические переменные и звезды с активными коронами (Ревнивцев и др., 2006, 2009). Остается еще ряд открытых вопросов, касающихся происхождения GRXE. В частности, мы до сих пор плохо понимаем его состав, и как он меняется по Галактике (см., например, Кояма и др., 2018; Перез и др., 2019). Другой важный вопрос — действительно ли в GRXE вносит значительный вклад истинное диффузное рентгеновское излучение, связанное с горячей фазой межзвездной среды.

Карта телескопа ART-XC значительно улучшит карту распределения GRXE, полученную ранее обсерваторией RXTE (Ревнивцев и др., 2006). Последняя обсерватория имела весьма скромное угловое разрешение ($\sim 1^\circ$), что сильно осложняло разделение GRXE и индивидуальных умеренно ярких ($\sim 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$) компактных рентгеновских источников. Благодаря превосходному угловому разрешению телескопа ART-XC ($\lesssim 1$ мин. дуги), можно будет удалить из карты индивидуальные источники с потоком выше $\sim 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ для получения более чистой и четкой карты распределения GRXE.

5.4. Транзиенты

Телескоп ART-XC идеально подходит для обнаружения и мониторинга транзитных и сильно переменных источников разных типов, от коротких (секунды — тысячи секунд) рентгеновских всплесков и вспышек, а также гамма-всплесков (GRBs), до долгоживущих (часы — годы) галактических рентгеновских транзиентов и сильно переменных AGN.

Для мониторинга ярких транзитных источников можно использовать тот факт, что однократно отраженные фотоны могут падать на детектор со смещением вплоть до $\sim 50'$ от оси телескопа. Для событий такого типа поле зрения телескопа ART-XC достигает ~ 2 град². Конечно, истинные изображения источников здесь не могут быть получены, но можно использовать телескоп ART-XC как “концентратор” и измерять рентгеновские потоки без построения изображений. В режиме обзора космический аппарат CPF вращается с периодом в 4 ч вокруг оси Z, которая направлена в сторону Солнца и сдвигается приблизительно на 1° градус в день, следуя за Солнцем. Любой небесный источник пересекает поле зрения телескопа ART-XC диаметром $1^\circ 6'$ примерно 10 раз. Таким образом, в режиме концентратора яркие транзитные источники могут наблюдаться по крайней мере 28–32 ч (см. подробнее Павлинский и др., 2019б).

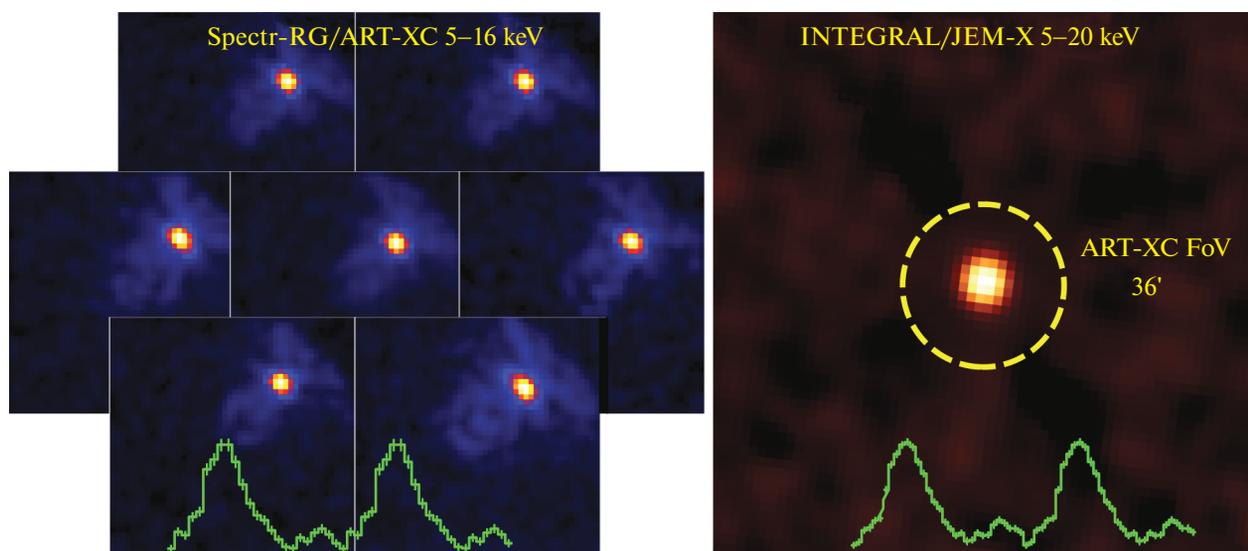


Рис. 23. Изображения рентгеновского пульсара Сеп X-3, полученные семью модулями телескопа ART-XC в диапазоне энергий 5–16 кэВ (слева) и телескопом JEM-X обсерватории INTEGRAL (5–20 кэВ, справа) в ходе одновременных наблюдений. Фазовые кривые пульсирующего сигнала с периодом 4.8 с (зеленые гистограммы на панелях), измеренные этими телескопами, хорошо согласуются между собой.

Хотя вероятность захватить GRBs в поле зрения телескопа ART-XC невысока, яркие гамма-всплески могут проникать сквозь материал защиты телескопа и вызывать срабатывание детекторов. Поэтому ожидается, что телескоп ART-XC будет регистрировать несколько GRBs в год и предоставлять точную информацию о времени регистрации для их локализации посредством триангуляции с другими космическими обсерваториями.

5.5. Поиск следов темной материи

Высокая эффективность телескопа ART-XC для проведения рентгеновских обзоров, в частности, его способность равномерно исследовать все небо, открывает новую возможность для поиска рентгеновских линий от стерильных нейтрино, потенциально составляющих темную материю. Перспективы миссии СРГ в поисках стерильной нейтринной темной материи с массой порядка нескольких кэВ, радиационно распадающейся в активные нейтрино и фотоны, недавно были исследованы Баринным и др. (2021). Было продемонстрировано, что данные телескопа ART-XC, полученные в диапазоне энергий от 5 до 20 кэВ, могут обеспечить более жесткие ограничения по сравнению с данными, полученными ранее с помощью обсерватории NuSTAR (Неронов и др., 2016; Перез и др., 2017; Нг и др., 2019; Рох и др., 2020). Поэтому телескоп ART-XC обладает большим потенциалом для проверки гипотезы темной материи, состоящей из стерильных нейтрино.

6. ЛЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ART-XC

6.1. “Первый свет”

Всего через 17 дней после запуска, 30 июля 2019 г., телескоп ART-XC был направлен на свою первую мишень на небе, известную рентгеновскую двойную систему Сеп X-3, состоящую из быстро вращающейся нейтронной звезды и массивной нормальной звезды. Изображения, полученные всеми семью модулями телескопа ART-XC в диапазоне энергии 5–16 кэВ (рис. 23), подтвердили высокую чувствительность и способность телескопа к построению изображений.

Эти наблюдения использовались также для проверки способности телескопа ART-XC к анализу временной переменности и точности бортовой шкалы времени. Для этих целей были организованы одновременные наблюдения источника Сеп X-3 обсерваторией INTEGRAL (Винклер и др., 2003). Анализ данных показал превосходную работу всех модулей телескопа ART-XC, четко зарегистрировавших пульсирующее излучение с периодом $\simeq 4.8$ с. Было показано, что измеренный период пульсаций и профиль импульса в диапазоне энергий 5–16 кэВ находятся в хорошем согласии со значениями, измеренными телескопом JEM-X на борту обсерватории INTEGRAL в диапазоне энергий 5–20 кэВ.

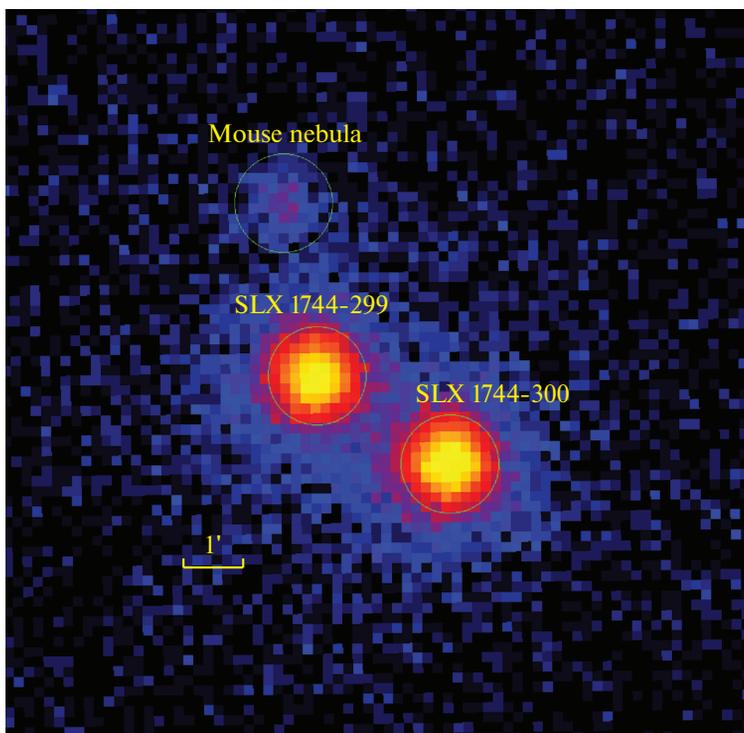


Рис. 24. Изображение, содержащее рентгеновские барстеры SLX 1744-299 и SLX 1744-300 и пульсарную туманность Мышка. Оно было получено телескопом ART-XC во время обзора галактического балджа (этап наблюдений CalPV) в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Угловое расстояние между барстерами составляет приблизительно $2'.7$.

6.2. Этап калибровок и проверки работоспособности приборов

Настройка и ввод в эксплуатацию всех семи рентгеновских камер (детекторов) телескопа ART-XC завершились 25 августа 2019 г., после чего началась программа калибровочных наблюдений и проверки соответствия характеристик телескопа ART-XC изначально заданным. Этот этап (фаза CalPV) длился примерно полтора месяца, после чего начался аналогичный этап CalPV телескопа eROSITA, телескоп ART-XC в это время тоже оставался включенным.

Во время этапа CalPV для калибровки функции PSF, виньетирования, эффективной площади, временных характеристик и т.д. телескопом ART-XC были проведены наблюдения ряда ярких рентгеновских источников. Все полетные характеристики телескопа ART-XC, измеренные в этих наблюдениях, оказались близкими к ожидаемым до запуска (подробности см. ниже). Более того, телескоп ART-XC выявил транзитный рентгеновский пульсар GRO J1008-57 в состоянии с наиболее низкой наблюдавшейся светимостью и впервые значимо зарегистрировал в этом состоянии пульсации излучения (Лутовинов и др., 2021).

Дополнительно значительная часть программы наблюдений во время этапа CalPV состояла из обзоров конкретных областей неба (галактических и внегалактических). По плану большинство из этих обзоров должны были быть намного более глубокими, чем ожидаемый четырехлетний обзор всего неба телескопом ART-XC, и таким образом должны значительно повысить его научную ценность.

6.2.1. Юстировка оптической оси и точность наведения. Было обнаружено, что направления осмотра неба отдельными зеркальными системами, как и ожидалось, отличаются друг от друга на величину порядка минуты дуги или меньше. Для измерения соответствующих корректирующих матриц, используемых для согласования данных разных модулей при их последующей обработке, была разработана специальная процедура калибровки. Для начальных расчетов матриц коррекции направлений осмотра были использованы около 20 различных целенаправленных наблюдений ярких рентгеновских источников во время этапа CalPV. Точность текущей версии поправок к направлениям осмотра составляет около $6''$. Это означает, что, основываясь на данных звездного датчика, мы всегда знаем с $6''$ -точностью положение источника в поле зрения в любом из семи детекторов телескопа

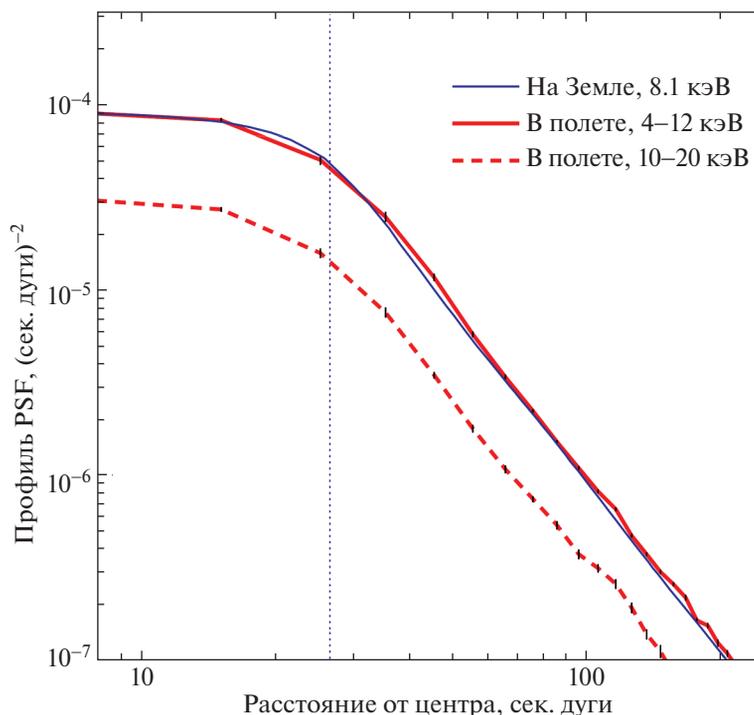


Рис. 25. Радиальные профили функции PSF, усредненные по полю зрения телескопа ART-XC в режиме сканирования: красные сплошная и штриховая линии показывают профили в диапазонах 4–12 и 10–20 кэВ соответственно, полученные во время наблюдений яркого рентгеновского источника на этапе CalPV, синяя линия — профиль, полученный в результате наземных калибровок (на 8.1 кэВ, см. выше). Пунктирная линия соответствует угловому разрешению телескопа ART-XC (табл. 1). Неопределенности показаны тонкими черными отрезками.

ART-XC и можем спроецировать с этой точностью изображение источника на детекторе телескопа ART-XC на небо. Поправки направлений осмотра будут отслеживаться и в будущем должны улучшиться.

Дальнейший анализ данных этапа CalPV показал, что центры функций виньетирования семи зеркальных систем не совпадают с центрами соответствующих детекторов. Это подразумевает существование некоторого расхождения между оптическими осями зеркальных систем и осью самого телескопа. Чтобы измерить фактическое положение оптической оси телескопа на детекторах, использовалась серия целенаправленных наблюдений Крабовидной туманности. Они показали, что положение оптической оси, усредненное по семи зеркальным системам, отстоит на 2 мин. дуги от центра детектора. Сейчас наблюдения в режиме наведения обычно планируются таким образом, чтобы объект наблюдений проецировался именно на это положение, а не на центр детектора.

6.2.2. Функция размытия точечного источника. Наблюдения ярких рентгеновских источников во время этапа CalPV показали, что полетная функция размытия точечного источника (PSF)

очень близка к ожидаемой. Чтобы проиллюстрировать это, на рис. 24 показано поле, содержащее рентгеновские барстеры SLX 1744-299 и SLX 1744-300, расположенные на угловом расстоянии $\sim 2.7'$, и пульсарная туманность (плерион) Мышка по наблюдениям телескопа ART-XC во время “Обзора галактического балджа” в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Эти наблюдения проводились в режиме сканирования, поэтому PSF на этом изображении эффективно усреднена по всему полю зрения (FoV) телескопа ART-XC. Аналогичное усреднение PSF имеет место во время обзора всего неба этим телескопом.

На рис. 25 показан радиальный профиль PSF, измеренный при наблюдении в режиме сканирования яркого рентгеновского источника (GX 3+1) вблизи галактического центра, в сравнении с радиальным профилем PSF, измеренным во время калибровки зеркальных систем на Испытательной установке рассеянного света MSFC (Кривонос и др., 2017). С этой целью функция PSF, измеренная в MSFC, была свернута с помощью “скользящего окна” размером с пиксель детектора ($45''$), а затем усреднена по полю зрения с учетом предполагаемой на основе моделирования трассировки лучей

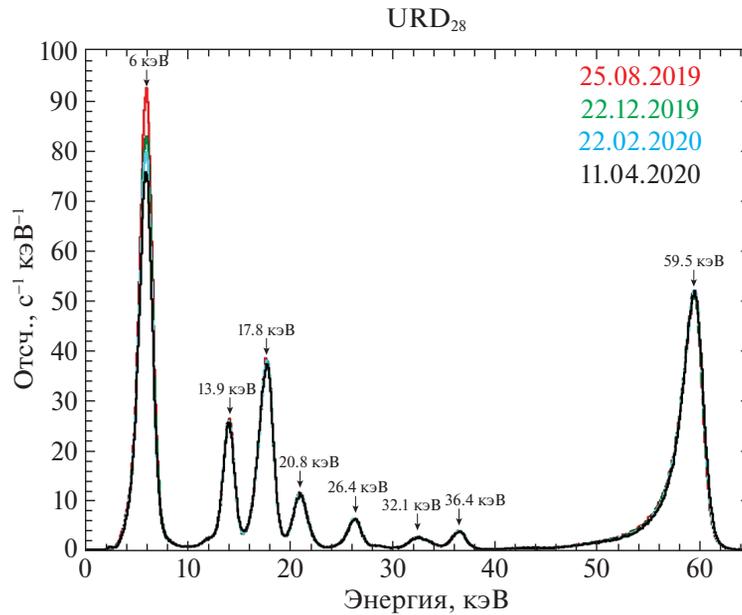


Рис. 26. Калибровочный спектр источника $^{241}\text{Am} + ^{55}\text{Fe}$, измеренный в разные эпохи. Обозначены основные калибровочные линии. Наблюдаемое уменьшение интенсивности линии 5.9 кэВ связано с коротким временем полураспада изотопа ^{55}Fe .

функции виньетирования. В обоих случаях часть потока источника на радиусах больших $5'$ была включена в фон, что имитирует реальную ситуацию, соответствующую обнаружению слабых точечных источников.

Профиль PSF, измеренный в полете во время этапа наблюдений CalPV, и профиль, полученный на основе наземных калибровок и моделирования согласуются друг с другом в пределах 10%, как показано на рис. 25. Ширина (FWHM) функции PSF телескопа ART-XC для наблюдений в режимах сканирования и обзора по данным наземных калибровок и моделирования составляет $\approx 53''$. Фактически измеренная в полете FWHM функции PSF оказывается практически такой же.

6.2.3. Эффективная площадь. Эффективная площадь телескопа ART-XC и функция виньетирования были измерены, используя результаты наземной калибровки зеркал и детекторного блока и интенсивное моделирование телескопа методом трассировки лучей (см. п. 3 выше). Чтобы проверить эти измерения, во время этапа CalPV была выполнена серия наблюдений Крабовидной туманности. Было показано, что реальное значение эффективной площади очень близко к оценке площади, полученной при моделировании и в ходе наземных калибровок. Анализ данных полетных калибровок продолжается.

6.2.4. Спектральное разрешение и шкала энергии. Для того чтобы отслеживать исправ-

ность детекторов и калибровать их энергетическую шкалу и спектральное разрешение во время полета, телескоп ART-XC использует свои внутренние калибровочные источники (см. подробнее в п. 2.6). Калибровка проводится регулярно, каждые несколько месяцев.

На рис. 26 показаны энергетические спектры, полученные с помощью одного из детекторов в четырех таких калибровках, проведенных 25 августа 2019 г., 22 декабря 2019 г., 22 февраля 2020 г. и 11 апреля 2020 г. И энергетическое разрешение, и эффективность детектора хорошо согласуются с предполетными измерениями и не изменяются значительно со временем и накопленной дозой. Наблюдаемое уменьшение интенсивности линии 5.9 кэВ связано с коротким периодом полураспада радиоактивного ^{55}Fe (2.737 года).

Как уже отмечалось, зеркальные системы телескопа ART-XC обеспечивают ненулевую эффективную площадь на энергиях до ≈ 35 кэВ. Чтобы проиллюстрировать это, на рис. 27 представлена сумма семи детекторных спектров яркой галактической НМХВ ОАО 1657-415, накопленных за более чем 20 кс наблюдений, а также фоновый спектр, полученный при наблюдении пустого поля. Хорошо видно, что телескоп ART-XC регистрирует излучение источника вплоть до 30 кэВ. Хотя общая форма спектра определяется откликом зеркальной системы, широкий пик на ≈ 6.5 кэВ свидетельствует о присутствии линии K_{α} Fe в спектре источника.

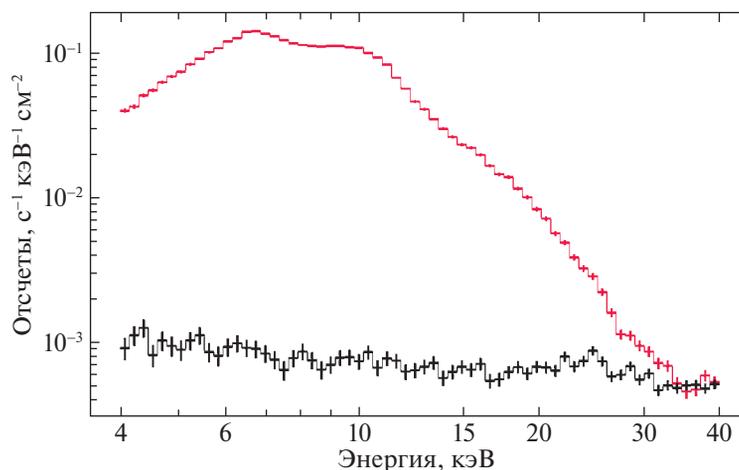


Рис. 27. Суммарный детекторный спектр, зарегистрированный телескопом ART-XC за 20 кс во время наблюдения яркой галактической НМХВ OAO 1657-415 (красная гистограмма), и фоновый спектр, полученный при наблюдении пустого поля (черная гистограмма).

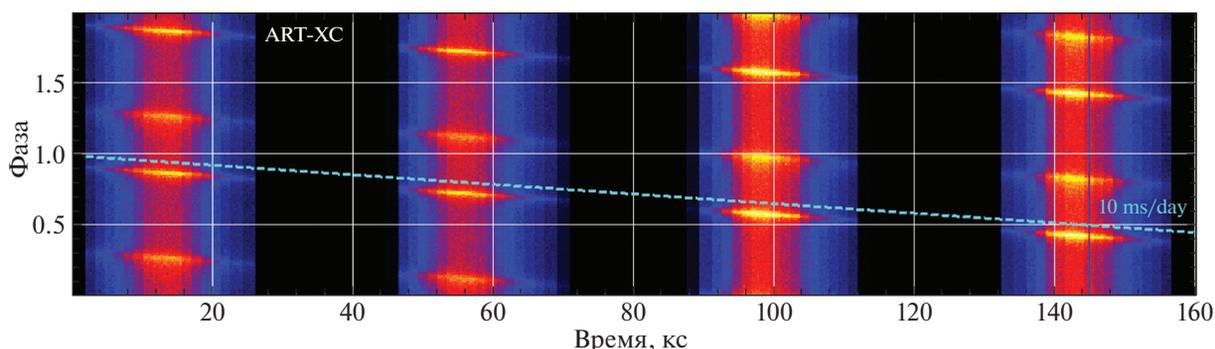


Рис. 28. Динамически свернутая кривая блеска пульсара в Крабовидной туманности. Наблюдаемый фазовый дрейф вызван отклонением частоты бортовых часов от номинального значения.

6.2.5. Способность к временному анализу. ART-XC имеет высокое временное разрешение (см. табл. 1). Мы воспользовались серией наблюдений пульсара в Крабовидной туманности, чтобы проверить способность телескопа к проведению временного анализа. Используя радиоэфemerиды обсерватории Джодрелл Бэнк (Jodrell Bank), мы уверенно зарегистрировали пульсации с периодом ~ 33 мс рентгеновского потока от источника на энергиях вплоть до 30 кэВ. Дальнейший фазовый анализ выявил, что частота бортовых часов слегка занижена по сравнению с номинальным значением, что ведет к отставанию бортовых часов относительно всемирного времени на приблизительно 10 мс в день (см. рис. 28). Этот результат также был подтвержден на основании измерений с наземных контрольных станций. Принимая этот систематический эффект во внимание, телескоп

ART-XC может использоваться для выполнения фазово-разрешенной спектроскопии пульсаров с периодами вплоть до нескольких миллисекунд.

Одна из уникальных особенностей телескопа ART-XC — это способность его CdTe детекторов и бортовой электроники к обработке мощных потоков фотонов. Например, во время наблюдения в режиме сканирования очень яркого рентгеновского источника Скорпион X-1 в сентябре 2019 г. зарегистрированная детекторами ART-XC скорость счета составила ~ 500 отсч. с^{-1} без каких-либо значительных следов переполнения. Однако оценка потери скорости счета из-за “мертвого времени” детекторов телескопа ART-XC (0.77 мс) в этом наблюдении составила около 37%.

Скорость счета, передаваемая от каждого детектора в телеметрию, обычно составляет 10–15 отсч. с^{-1} . Если в поле зрения телескопа нет

ярких источников рентгеновского излучения, средняя скорость счета в диапазоне энергий 4–100 кэВ составляет 5.5 ± 0.5 отсч. s^{-1} на детектор.

6.3. Фон детекторов на гало-орбите вокруг точки L2

СРГ — первая рентгеновская обсерватория вблизи точки L2, поэтому данных о фоновых условиях в этом месте ранее не существовало. Два основных неизвестных фактора могут сильно влиять на работу рентгеновских телескопов, таких как ART-XC: (i) средний уровень фона, ограничивающий чувствительность обзора всего неба, и (ii) нестабильность фона на коротких временных масштабах, т.е. наличие вспышек, наблюдаемых многими рентгеновскими миссиями. Вспышки могут испортить целенаправленные наблюдения и усилить шум на определенных участках обзора всего неба, делая его менее однородным.

Детекторы телескопа ART-XC работают до энергий ~ 100 кэВ, тогда как зеркала выше 35 кэВ имеют практически нулевую эффективную площадь. Это дает возможность использовать скорость счета выше ~ 40 кэВ как меру потока космических лучей. Рисунок 29 показывает усредненную по неделям скорость счета детекторов в диапазоне 40–100 кэВ в период с сентября 2019 г. по сентябрь 2020 г. для двух модулей телескопа T5 и T7. Фон чрезвычайно стабилен с вариациями от недели к неделе всего в несколько процентов. Есть указание на постепенное увеличение скорости счета в течение года, но для его детального анализа необходимы дополнительные данные.

Предварительный анализ всех имеющихся данных выявил отсутствие ярких вспышек на коротких временных масштабах. Однако в течение первого года работы миссии СРГ серьезных солнечных событий не было. С наступлением 25 солнечного цикла в следующие несколько лет ситуация может кардинально измениться.

6.4. Обзор всего неба

По завершении этапа CalPV 12 декабря 2019 г. обсерватория СРГ начала свой 4-летний рентгеновский обзор всего неба. К 10 июня 2020 г. небо было впервые полностью покрыто наблюдениями телескопа ART-XC и покрыто повторно к 15 декабря 2020 г.

Наш предварительный анализ карт всего неба, созданных по данным телескопа ART-XC первого года обзора, выявил приблизительно 700 источников, зарегистрированных в диапазоне энергий 4–12 кэВ, и около 400 источников, зарегистрированных в диапазоне энергий 7–12 кэВ (из которых

около 100 источников не были зарегистрированы в более мягком диапазоне 4–7 кэВ). Отметим, что на энергиях выше 6–7 кэВ телескоп ART-XC более чувствителен (в режиме обзора), чем eROSITA (Сюняев и др., 2021, 2022). Основываясь на нашем текущем знании телескопа и фоновых условий в полете, можно предсказать, что после завершения четырехлетнего обзора всего неба телескоп ART-XC зарегистрирует приблизительно 5000 источников в диапазоне 4–12 кэВ.

На рис. 30 показан фрагмент карты всего неба вдоль галактической плоскости площадью ~ 1000 кв. град., полученной телескопом ART-XC в диапазоне энергий 4–12 кэВ во время первого скана неба. Он прекрасно демонстрирует уникальные характеристики (жесткий рентгеновский диапазон, равномерный охват больших участков неба, хорошее угловое разрешение, высокий динамический диапазон и однородность) продолжающегося обзора неба телескопом ART-XC.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Телескоп ART-XC на борту обсерватории СРГ на момент написания данной статьи работает в космосе более полутора лет, его характеристики и возможности полностью оправдывают ожидания. Все системы телескопа исправны и работают номинально. Серия наблюдений, выполненных на раннем (CalPV) этапе миссии, показала, что характеристики зеркальных систем и детекторов телескопа ART-XC во время полета оказались очень близкими к ожидаемым по результатам наземных калибровок.

Обзор всего неба, начатый 12 декабря 2019 г., проходит гладко, без перерывов, с ежедневными сбросами научных данных в Центр научных данных телескопа ART-XC в ИКИ РАН в Москве. Первые две карты всего неба, полученные телескопом ART-XC в диапазоне энергий 4–12 кэВ по данным первого и второго шестимесячных обзоров всего неба, так же как суммарная карта, уже построены, ведется работа над первым каталогом рентгеновских источников, зарегистрированных телескопом ART-XC. ART-XC уже обнаружил несколько десятков новых рентгеновских источников (см., например, Семена и др., 2020, 2021; Мереминский и др., 2020; Зазнобин и др., 2021), предпринимаются усилия по их оптической идентификации с помощью оптических телескопов, принадлежащих к наземному сегменту миссии СРГ.

Обзор всего неба обсерватории СРГ планируется завершить в декабре 2023 г. Есть веские основания считать, что телескоп ART-XC предоставит уникально глубокую и четкую карту всего неба в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Однако на этом миссия не завершится, поскольку текущий

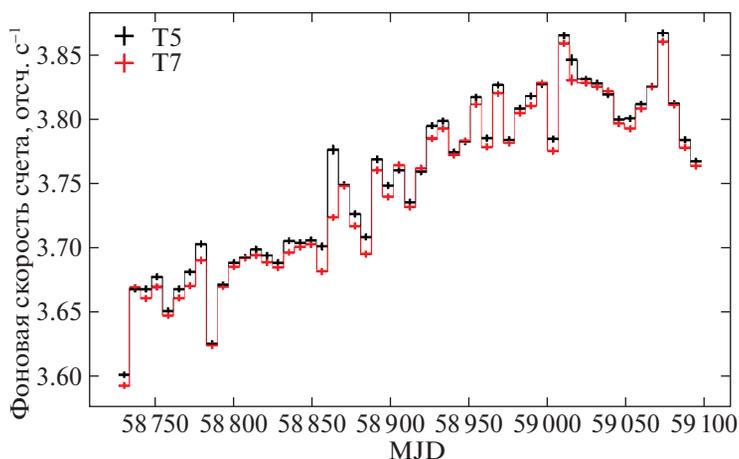


Рис. 29. Эволюция усредненного по неделям темпа счета событий в диапазоне 40–100 кэВ, в котором доминируют заряженные частицы. Показаны темпы счета для двух модулей телескопа.

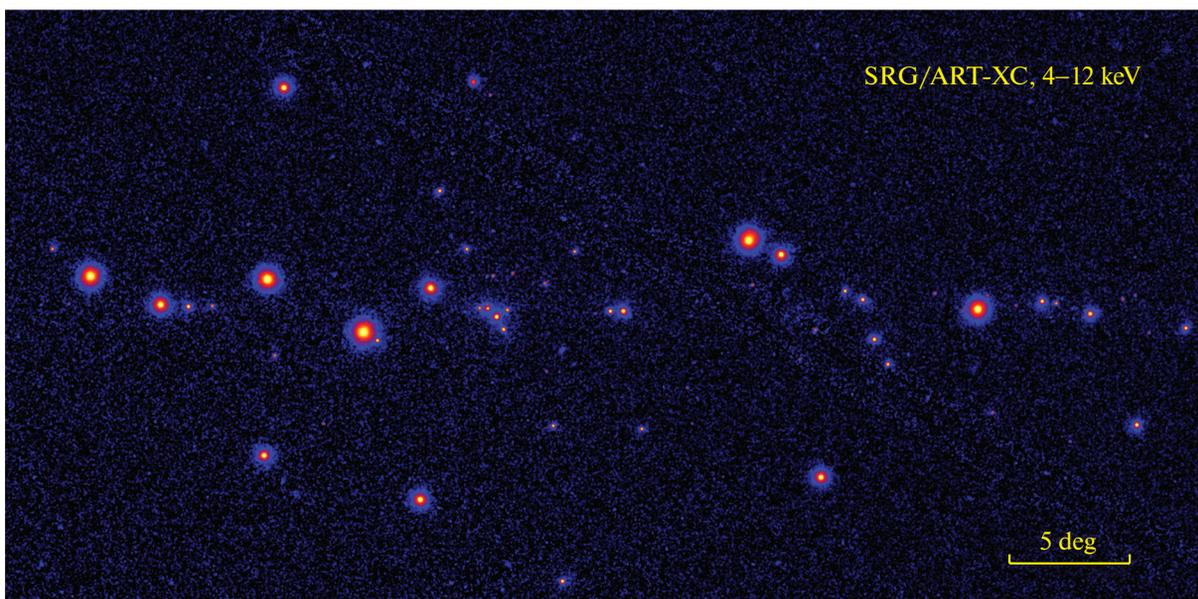


Рис. 30. Карта области Галактической плоскости, полученная в течение первого года обзора всего неба телескопом SRG/ART-XC в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Показана область размером $\approx 50^\circ \times 25^\circ$ с центром в точке с галактическими координатами $l = 355^\circ$, $b = 0^\circ$, проекция Айтоффа. Поправленная на виньетирование экспозиция варьируется примерно от 30 до 60 с в разных частях изображения из-за специфики выбранной стратегии обзора.

план миссии SRG предусматривает, что следующие несколько лет ее работы будут посвящены обширной программе целенаправленных наблюдений выбранных астрофизических объектов. Во время этого послеобзорного этапа весь энергетический диапазон телескопа ART-XC (4–30 кэВ) будет полностью использован для спектроскопии рентгеновских источников. Данные обзора всего неба телескопа ART-XC со временем станут общедоступ-

ными. Дата первого открытия данных в настоящее время обсуждается.

Телескоп ART-XC им. Михаила Павлинского — жесткий рентгеновский прибор на борту обсерватории SRG, флагманского астрофизического проекта Российской федеральной космической программы, реализуемой Российским космическим агентством в интересах Российской академии наук. Команда телескопа ART-XC благодарит Россий-

ское космическое агентство, Российскую академию наук и государственную корпорацию “Росатом” за поддержку всего проекта СРГ и телескопа ART-XC в частности. Мы благодарим НПО им. С.А. Лавочкина (НПОЛ) и его партнеров за создание и эксплуатацию космического аппарата СРГ (платформы “Навигатор”), особенно — Е. Филиппову, А. Погодина и П. Меркулова. Мы благодарим компанию Asrograd Co., Ltd. (Япония), которая изготовила кристаллы CdTe, и компанию Integrated Detector Electronics AS — IDEAS (Норвегия), которая изготовила специализированные микросхемы (ASICs) для детекторов рентгеновского излучения. Благодарим наших коллег, внесших критически важный вклад в создание телескопа ART-XC, но, к нашему великому сожалению, безвременно ушедших: Валерия Акимова (ИКИ РАН) — научного сотрудника, специалиста по рентгеновским детекторам, Олега Козлова (ИКИ РАН) — разработчика механической конструкции рентгеновских детекторов, и Михаила Губарева (MSFC) — разработчика рентгеновских зеркал.

Статья является переводом работы М. Павлинского и др., опубликованной в журнале *Astronomy & Astrophysics*, v. 650, A42 (2021). Мы благодарны главному редактору журнала *Astronomy & Astrophysics*, профессору Тьерри Форвейли (Thierry Forveille) за любезное разрешение воспроизвести ее в публикации на русском языке в специальном выпуске журнала “Письма в Астрономический журнал”, посвященном астрофизической обсерватории СРГ. Просим читателей журнала, решивших упомянуть данную статью в своих будущих публикациях, ссылаться также на англоязычную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баринов и др. (V.V. Barinov, R.A. Burenin, D.S. Gorbunov, R.A. Krivonos), *Phys. Rev. D* **103**, 063512 (2021).
2. Берд и др. (A.J. Bird, A. Malizia, A. Bazzano, E.J. Barlow, L. Bassani, A.B. Hill, G. Bélanger, F. Capitanio, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170**, 175 (2007).
3. Берд и др. (A.J. Bird, A. Bazzano, A. Malizia, M. Focchi, V. Sguera, L. Bassani, A.B. Hill, P. Ubertini, C. Winkler), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **223**, 15 (2016).
4. Браун и др. (Gaia Collaboration: A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A1 (2018).
5. Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С., Лутовинов А.А., Ревнивцев М.Г. и др., Письма в Астрон. журн. **42** 333 (2016) [R.A. Burenin, et al., *Astron. Lett.* **42**, 295 (2016)].
6. Винклер и др. (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Gimenez, S. Grebenev, W. Hermsen, J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
7. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, B.R. McNamara, W. Forman, C. Jones, H. Quintana, A. Hornstrup), *Astrophys. J.* **502**, 558 (1998).
8. Борс и др. (W. Voges, B. Aschenbach, Th. Boller, H. Bräuninger, U. Briel, W. Burkert, K. Dennerl, J. Englhauser, et al.) *Astron. Astrophys.* **349**, 389 (1999).
9. Вуд и др. (K.S. Wood, J.F. Meekins, D.J. Yentis, H.W. Smathers, D.P. McNutt, R.D. Bleach, E.T. Byram, T.A. Chupp, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **56**, 507 (1984).
10. Гребенев и др. (S.A. Grebenev, W. Forman, C. Jones, S. Murray), *Astrophys. J.* **445**, 607 (1995).
11. Гребенев С.А., Мереминский И.А., Письма в Астрон. журн. **41**, 826 (2015) [S.A. Grebenev, I.A. Mereminskiy, *Astron. Lett.* **41**, 765 (2015)].
12. Губарев и др. (M. Gubarev, B. Ramsey, S.L. O’Dell, R. Elsner, K. Kilaru, J. McCracken, M. Pavlinsky, A. Tkachenko, I. Lapshov), *SPIE Conf. Ser.* **8443**, 84431U (2012).
13. Губарев и др. (M. Gubarev, B. Ramsey, J.J. Kolodziejczak, S.L. O’Dell, R. Elsner, V. Zavlin, D. Swartz, M. Pavlinsky, A. Tkachenko, I. Lapshov), *SPIE Conf. Ser.* **9144**, 91444U (2014).
14. Зазнобин И.А., Усков Г.С., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., Медведев П.С., Хорунжев Г.А., Ляпин А.Р., Кривонос Р.А. и др. Письма в Астрон. журн. **47**, 89 (2021) [I.A. Zaznobin, et al., *Astron. Lett.* **47**, 89 (2021)].
15. Кавамуро и др. (T. Kawamuro, Y. Ueda, M. Shidatsu, T. Hori, M. Morii, S. Nakahira, N. Isobe, N. Kawai, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **238**, 32 (2018).
16. Киши и др. (N. Kishi, Y. Mito, W. Inui, R. Ohno), “IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record”, 969 (2008).
17. Косс и др. (M. Koss, B. Trakhtenbrot, C. Ricci, I. Lamperti, K. Oh, S. Berney, K. Schawinski, M. Baloković, et al.), *Astrophys. J.* **850**, 74 (2017).
18. Кояма (K. Koyama), *Publ. Astron. Soc. Japan* **70**, R1 (2018).
19. Кретчмар и др. (P. Kretschmar, F. Fürst, L. Sidoli, E. Bozzo, J. Alfonso-Garzón, A. Bodaghee, S. Chaty, M. Chernyakova, et al.), *New Astron. Rev.* **86**, 101546 (2019).
20. Кривонос и др. (R. Krivonos, M. Revnivtsev, A. Lutovinov, S. Sazonov, E. Churazov, R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **475**, 775 (2007).
21. Кривонос и др. (R. Krivonos, S. Tsygankov, A. Lutovinov, M. Revnivtsev, E. Churazov, R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **545**, A27 (2012).

22. Кривонос и др. (R. Krivonos, A. Tkachenko, R. Burenin, E. Filippova, I. Lapshov, I. Mereminskiy, S. Molkov, M. Pavlinsky, et al.), *Exp. Astron.* **44**, 147 (2017).
23. Кривонос и др. (R.A. Krivonos, A.J. Bird, E.M. Churazov, J.A. Tomsick, A. Bazzano, V. Beckmann, G. Bélanger, A. Bodaghee, et al.), *New Astron. Rev.* **92**, 101612 (2021).
24. Кусумано и др. (G. Cusumano, V. La Parola, A. Segreto, C. Ferrigno, A. Maselli, B. Sbarufatti, P. Romano, G. Chincarini, et al.), *Astron. Astrophys.* **524**, A64 (2010).
25. Левин и др. (V. Levin, M. Pavlinsky, V. Akimov, M. Kuznetsova, A. Rotin, A. Krivchenko, I. Lapshov, V. Oleinikov), *SPIE Conf. Ser.* **9144**, 914413 (2014).
26. Левин и др. (V. Levin, M. Pavlinsky, V. Akimov, M. Kuznetsova, A. Rotin, A. Krivchenko, I. Lapshov, V. Oleinikov), *SPIE Conf. Ser.* **9905**, 990551 (2016).
27. Лутовинов и др. (A.A. Lutovinov, M.G. Revnivtsev, S.S. Tsygankov, R.A. Krivonos), *MNRAS* **431**, 327 (2013).
28. Лутовинов и др. (A.A. Lutovinov, V. Suleimanov, G.J. Manuel Luna, S. Sazonov, D. de Martino, L. Ducci, V. Doroshenko, M. Falanga), *New Astron. Rev.* **91**, 101547 (2020).
29. Лутовинов и др. (A. Lutovinov, S. Tsygankov, S. Molkov, V. Doroshenko, M. Mushtukov, V. Arefiev, I. Lapshov, A. Tkachenko, M. Pavlinsky), *Astrophys. J.* **912**, 17 (2021).
30. Мадсен и др. (K.K. Madsen, F.E. Christensen, W.W. Craig, K.W. Forster, B.W. Grefenstette, F.A. Harrison, H. Miyasaka, V. Rana), *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* **3**, 044003 (2017).
31. Мализия и др. (A. Malizia, S. Sazonov, L. Bassani, E. Pian, V. Beckmann, M. Molina, I. Mereminskiy, G. Belanger), *New Astron. Rev.* **90**, 101545 (2020).
32. де Мартино и др. (D. de Martino, F. Bernardini, K. Mukai, M. Falanga, N. Masetti), *Adv. Space Res.* **66**, 1209 (2020).
33. Мереминский и др. (I.A. Mereminskiy, R.A. Krivonos, A.A. Lutovinov, S.Yu. Sazonov, M.G. Revnivtsev, R.A. Sunyaev), *MNRAS* **459**, 140 (2016).
34. Мереминский И.А., Филиппова Е.В., Буренин Р.А., Сазонов С.Ю., Павлинский М.Н., Ткаченко А.Ю., Лапшов И.Ю., Штыковский А.Е., Кривонос Р.А., Письма в Астрон. журн. **44**, 87 (2018) [I.A. Mereminskiy, et al. *Astron. Lett.* **44**, 67 (2018)].
35. Мереминский И.А., Буренин Р.А., Кривонос Р.А., Лапшов И.Ю., Павлинский М.Н., Сазонов С.Ю., Ткаченко А.Ю., Филиппова Е.В., Штыковский А.Е., Письма в Астрон. журн. **45**, 91 (2019) [I.A. Mereminskiy, et al., *Astron. Lett.* **45**, 62 (2019)].
36. Мереминский и др. (I. Mereminskiy, P. Medvedev, A. Semena, M. Pavlinsky, S. Molkov, A. Lutovinov, R. Burenin, S. Sazonov, et al.), *Astron. Tel.* **13571**, 1 (2020).
37. Нг и др. (K.C.Y. Ng, B.M. Roach, K. Perez, J.F. Beacom, S. Horiuchi, R. Krivonos, D.R. Wik), *Phys. Rev. D* **99**, 083005 (2019).
38. Неронов и др. (A. Neronov, B. Malyshev, D. Eckert), *Phys. Rev. D* **94**, 123504 (2016).
39. Ох и др. (K. Oh, M. Koss, C.B. Markwardt, K. Schawinski, W.H. Baumgartner, S.D. Barthelmy, S.B. Cenko, N. Gehrels, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235**, 4 (2018).
40. Павлинский и др. (M.N. Pavlinsky, S.A. Grebenev, R.A. Sunyaev), *Astrophys. J.* **425**, 110 (1994).
41. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, V. Arefiev, A. Glushenko, et al.), *SPIE Conf. Ser.* **8147**, 814706 (2011).
42. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, M. Buntov, A. Glushenko, et al.), *SPIE Conf. Ser.* **8443**, 84431T (2012).
43. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, A. Krivchenko, A. Rotin, M. Kuznetsova, I. Lapshov, A. Tkachenko, et al.), *SPIE Conf. Ser.* **9905**, 99051J (2016).
44. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, A. Krivchenko, A. Rotin, M. Kuznetsova, I. Lapshov, R. Krivonos, et al.), *Exp. Astron.* **45**, 315 (2018).
45. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, A. Krivchenko, A. Rotin, M. Kuznetsova, I. Lapshov, R. Krivonos, et al.), *Exp. Astron.* **47**, 1 (2019a).
46. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, A. Krivchenko, A. Rotin, M. Kuznetsova, I. Lapshov, R. Krivonos, et al.), *Exp. Astron.* **48**, 233 (2019b).
47. Папитто и др. (A. Papitto, M. Falanga, W. Hermsen, S. Mereghetti, L. Kuiper, J. Poutanen, E. Bozzo, F. Ambrosino, et al.), *New Astron. Rev.* **91**, 101544 (2020).
48. Перез и др. (K. Perez, K.C.Y. Ng, J.F. Beacom, C. Hersh, S. Horiuchi, R. Krivonos), *Phys. Rev. D*, **95**, 123002 (2017).
49. Перез и др. (K. Perez, R. Krivonos, D.R. Wik), *Astrophys. J.* **884**, 153 (2019).
50. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, H. Böhringer, A. Bogomolov, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
51. Преториус и др. (M.L. Pretorius, C. Knigge, A.D. Schwobe), *MNRAS* **432**, 570 (2013).
52. Ревнивцев и др. (M. Revnivtsev, S. Sazonov, K. Jahoda, M. Gilfanov), *Astron. Astrophys.* **418**, 927 (2004).
53. Ревнивцев и др. (M. Revnivtsev, S. Sazonov, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **452**, 169 (2006).

54. Ревнивцев и др. (M. Revnivtsev, A. Lutovinov, E. Churazov, S. Sazonov, M. Gilfanov, S. Grebenev, R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **491**, 209 (2008).
55. Ревнивцев и др. (M. Revnivtsev, S. Sazonov, E. Churazov, W. Forman, A. Vikhlinin, R. Sunyaev), *Nature* **458**, 1142 (2009).
56. Рош (B.M. Roach, K.C.Y. Ng, K. Perez, J.F. Beacom, S. Horiuchi, R. Krivonos, D.R. Wik), *Phys. Rev. D* **101**, 103011 (2020).
57. Сазонов, Ревнивцев (S.Y. Sazonov, M.G. Revnivtsev), *Astron. Astrophys.* **423**, 469 (2004).
58. Сазонов и др. (S. Sazonov, A. Paizis, A. Bazzano, I. Chelovekov, I. Khabibullin, K. Postnov, I. Mereminskiy, M. Flocchi, et al.), *New Astron. Rev.* **88**, 101536 (2020).
59. Сакстон и др. (R.D. Saxton, A.M. Read, P. Esquej, M.J. Freyberg, B. Altieri, D. Bermejo), *Astron. Astrophys.* **480**, 611 (2008).
60. Семена и др. (N. Semena, M. Pavlinsky, M. Buntov, D. Serbinov, E. Gurova, V. Tambov, I. Roiz, M. Garin, et al.), *SPIE Conf. Ser.* **9144**, 91444T (2014).
61. Семена и др. (A. Semena, I. Mereminskiy, A. Lutovinov, S. Molkov, M. Pavlinsky), *Astron. Tel.* **13415**, 1 (2020).
62. Семена и др. (A. Semena, V. Doroshenko, V. Arefiev, A. Lutovinov, C. Maitra, I. Mereminskiy, S. Molkov, A. Rau, et al.), *Astron. Tel.* **14357**, 1 (2021).
63. Сюняев Р.А., Арефьев В.А., Бороздин К.Н., Гильфанов М.Р., Ефремов В.В., Каниовский А.С., Чуразов Е.М., Кендзиора Е. и др., *Письма в Астрон. журн.* **17** 975 (1991) [R.A. Sunyaev, et al., *Sov. Astron. Lett.* **17**, 409 (1991)].
64. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, M. Markevitch, M. Pavlinsky), *Astrophys. J.* **407**, 606 (1993).
65. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, H. Brunner, R. Burenin, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021) [arXiv:2104.13267].
66. Сюняев Р.А., Арефьев В.А., Бабышкин В.Н., Богомолов А.Н., Борисов К.В., Бунтов М.В., Брюнер Х., Буренин Р.А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **48**, 301 (2022).
67. Танака и др. (T. Tanaka, S. Watanabe, S. Takeda, K. Oonuki, T. Mitani, K. Nakazawa, T. Takashima, T. Takahashi, et al.), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **568**, 375 (2006).
68. Тояма и др. (H. Toyama, A. Nishihira, M. Yamazato, A. Higa, T. Maehama, R. Ohno, M. Toguchi), *Japanese J. Appl. Phys.* **43**, 6371 (2004).
69. Уолтер и др. (R. Walter, A.A. Lutovinov, E. Bozzo, S.S. Tsygankov), *Astron. Astrophys. Rev.* **23**, 2 (2015).
70. Форман и др. (W. Forman, C. Jones, L. Cominsky, P. Julien, S. Murray, G. Peters, H. Tananbaum, R. Giacconi, R.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **38**, 357 (1978).
71. Харрисон и др. (F.A. Harrison, W.W. Craig, F.E. Christensen, C.J. Hailey, W.W. Zhang, S.E. Boggs, D. Stern, W.R. Cook, et al.), *Astrophys. J.* **770**, 103 (2013).
72. Хонг и др. (J. Hong, K. Mori, C.J. Hailey, M. Nynka, S. Zhang, E. Gotthelf, F.M. Fornasini, R. Krivonos, et al.), *Astrophys. J.* **825**, 132 (2016).
73. Хори и др. (T. Hori, M. Shidatsu, Y. Ueda, T. Kawamuro, M. Morii, S. Nakahira, N. Isobe, N. Kawai, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235**, 7 (2018).