

СОДЕРЖАНИЕ

Том 48, номер 5, 2022

Космическая обсерватория Спектр-РГ: ее телескопы и первые научные результаты

*Р. Сюняев, В. Арефьев, В. Бабышкин, А. Богомолов, К. Борисов, Г. Бруннер,
М. Бунтов, Р. Буренин, В. Ворон, М. Гильфанов, П. Гуреев, Й. Едер, В. Колмыков,
С. Комовкин, Д. Коутиньо, Р. Кривонос, И. Лапшов, В. Левин, И. Ломакин,
А. Лутовинов, П. Медведев, А. Мерлони, Т. Мерник, П. Мжельский,
Е. Михайлов, В. Молодцов, З. Мюллер, К. Нандра, В. Назаров,
М. Павлинский, А. Погодин, П. Предель, Я. Робраде, С. Сазонов,
А. Ткаченко, М. Фрейберг, И. Хабибуллин, Г. Хазингер, Е. Чуразов,
А. Ширшаков, Х. Шойерле, Н. Эйсмонт*

301

Телескоп ART-XC на борту обсерватории СРГ

*М. Павлинский, А. Ткаченко, В. Левин, Н. Александрович, В. Арефьев,
В. Бабышкин, О. Батанов, Ю. Боднар, А. Богомолов, А. Бубнов, М. Бунтов,
Р. Буренин, И. Человеков, К.-Т. Чен, Т. Дроздова, С. Элерт, Е. Филиппова,
С. Фролов, Д. Гамков, С. Гаранин, М. Гарин, А. Глушенко, А. Горелов, С. Гребенев,
С. Григорович, П. Гуреев, Е. Гурова, Р. Илькаев, И. Катасонов, А. Кривченко,
Р. Кривонос, Ф. Коротков, М. Куделин, М. Кузнецова, В. Лазарчук, И. Лапшов,
В. Липилин, И. Ломакин, А. Лутовинов, И. Мереминский, С. Мольков, В. Назаров,
В. Олейников, Е. Пикалов, Б. Д. Рэмси, И. Ройз, А. Ротин, А. Рядов, Е. Санкин,
С. Сазонов, Д. Седов, А. Семена, Н. Семена, Д. Сербинов, А. Ширшаков,
А. Штыковский, А. Швецов, Р. Сюняев, Д. А. Шварц, В. Тамбов, В. Ворон, А. Яскович*

357

КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ СПЕКТР-РГ: ЕЕ ТЕЛЕСКОПЫ И ПЕРВЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2022 г. Р. Сюняев^{1,2}, В. Арефьев¹, В. Бабышкин³, А. Богомолов¹, К. Борисов⁴, Г. Бруннер⁵, М. Бунтов¹, Р. Буренин¹, В. Ворон⁴, М. Гильфанов^{1,2}, П. Гуреев³, Й. Едер⁵, В. Колмыков³, С. Комовкин³, Д. Коутиньо⁵, Р. Кривонос¹, И. Лапшов¹, В. Левин¹, И. Ломакин³, А. Лутовинов¹, П. Медведев¹, А. Мерлони⁵, Т. Мерник⁶, П. Мжельский³, Е. Михайлов³, В. Молодцов³, З. Мюллер⁵, К. Нандра⁵, В. Назаров¹, М. Павлинский¹, А. Погодин³, П. Предель⁵, Я. Робраде⁷, С. Сазонов¹, А. Ткаченко¹, М. Фрейберг⁵, И. Хабибуллин^{1,2}, Г. Хазингер⁸, Е. Чуразов^{1,2}, А. Ширшаков³, Х. Шойерле⁶, Н. Эйсмонт¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Астрофизический институт Общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

³Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Химки, Россия

⁴Госкорпорация Роскосмос, Москва, Россия

⁵Институт внеземной физики Общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

⁶Германский центр авиации и космонавтики, Бонн, Германия

⁷Гамбургский университет, Гамбург, Германия

⁸Европейское космическое агентство, Мадрид, Испания

(Перевод статьи R. Sunyaev, et al., *Astronomy & Astrophysics*, 2021, v. 656, A132, воспроизведенный с разрешения © ESO)

Поступила в редакцию 05.09.2021 г.

После доработки 07.09.2021 г.; принята к публикации 07.09.2021 г.

Космическая обсерватория Спектр-РГ (СПГ), оснащенная рентгеновскими телескопами с оптикой косоугольного падения ART-XC им. М.Н. Павлинского и eROSITA, была запущена Роскосмосом к точке Лагранжа L2 системы Солнце–Земля 13 июля 2019 г. Запуск был осуществлен с космодрома Байконур ракетой-носителем “Протон-М” с разгонным блоком ДМ-03. Немецкий телескоп eROSITA был установлен на обсерватории СПГ в соответствии с соглашением между Роскосмосом и Германским космическим агентством DLR. В декабре 2019 г. СПГ приступила к выполнению своей основной научной задачи — сканированию небесной сферы для получения рентгеновских карт всего неба в нескольких диапазонах энергий (от 0.2 до 8 кэВ для eROSITA и от 4 до 30 кэВ для ART-XC). В середине июня 2021 г. был завершен третий 6-месячный обзор всего неба. В течение четырех лет планируется получить восемь независимых карт всего неба в каждом из энергетических диапазонов. В сумме эти карты обеспечат высокую чувствительность, позволят открыть более трех миллионов квазаров и более ста тысяч массивных скоплений галактик и групп галактик. Наличие восьми карт неба даст возможность осуществить мониторинг долговременной переменности (каждые шесть месяцев) огромного числа внегалактических и галактических источников рентгеновского излучения, включая сотни тысяч звезд с горячими коронами. Кроме того, вращение спутника с периодом 4 ч вокруг оси, направленной на Солнце, позволяет отслеживать более быструю переменность ярких рентгеновских источников в течение одного дня каждые полгода. Выбранная стратегия сканирования неба приводит к наличию глубоких областей обзора вблизи обоих полюсов эклиптики. В статье представлены рентгеновские карты, полученные телескопами на борту СПГ во время первого обзора всего неба, а также результаты глубоких наблюдений, выполненных во время перелета к точке L2 в рамках программы проверки работоспособности и характеристик обсерватории, касающихся построения изображений, спектроскопии и тайминга источников рентгеновского излучения. Предполагается, что в декабре 2023 г. обсерватория приступит к наблюдениям наиболее интересных источников в режиме

трехосной ориентации и глубокого сканирования выбранных площадок на небе площадью до 150 кв. град. В таком режиме СРГ будет функционировать по меньшей мере два года. Эти режимы наблюдений были опробованы на этапе проверки научных параметров обсерватории. Каждый день данные обсерватории СРГ принимаются крупнейшими антеннами Российской сети дальнего космоса, расположенными в Медвежьих Озерах и близ Уссурийска.

Ключевые слова: рентгеновская астрономия, телескоп с зеркалами косоугольного падения, высокочувствительный полупроводниковый рентгеновский детектор, обзор всего неба, сканирующие наблюдения.

DOI: 10.31857/S0320010822050023

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	302
2. Орбита и режимы работы обсерватории СРГ	306
3. Чувствительность телескопов обсерватории СРГ	313
4. Научные цели и первые результаты обсерватории СРГ	314
5. Космический аппарат СРГ	332
6. Телескоп ART-XC им. М. Н. Павлинского	338
7. Телескоп eROSITA	344
8. История проекта СРГ в России	348
9. Заключение	353

1. ВВЕДЕНИЕ

Космическая обсерватория Спектр-РГ (“Спектр–Рентген–Гамма” или СРГ) была запущена на гало-орбиту в окрестности точки Лагранжа L2 системы Солнце–Земля 13 июля 2019 г. Запуск был осуществлен с космодрома Байконур ракетой-носителем “Протон-М” с разгонным блоком ДМ-03 (рис. 1). Базовый модуль служебных систем “Навигатор” (общей массой 2712 кг), разработанный АО “НПО Лавочкина” (НПОЛ, г. Химки) несет комплекс научной аппаратуры (общей массой 1170 кг), который состоит из двух рентгеновских телескопов с оптикой косоугольного падения (рис. 2 и 3): eROSITA (extended Roentgen Survey with an Imaging Telescope Array, Предель и др., 2021), разработанного в Институте внеземной физики Общества им. Макса Планка (МФЕ, Германия), и ART-XC (Astronomical Roentgen Telescope—X-ray Concentrator) им. М.Н. Павлин-

ского, разработанного в России (Павлинский и др., 2021). Обсерватория создана в соответствии с меморандумом, подписанным в 2008 г. между Российским космическим агентством (ныне Роскосмос) и Германским аэрокосмическим агентством (DLR). Телескоп eROSITA регистрирует рентгеновское излучение в диапазоне энергий от 200 эВ до 8 кэВ, а телескоп ART-XC работает в диапазоне 4–30 кэВ.

Базовый модуль служебных систем “Навигатор” разрабатывался как универсальная космическая платформа среднего класса для научных и метеорологических спутников, запускаемых на различные орбиты. С января 2011 г. платформа “Навигатор” используется в трех метеорологических спутниках “Электро-Л” и в научном спутнике “Спектр-Р” (“Радиоастрон”, Кардашев и др., 2013), который был запущен в 2011 г. и работал до 2018 г.



Рис. 1. Пусковая площадка на космодроме Байконур (Казахстан); ракета-носитель “Протон” и разгонный блок ДМ-03 с космическим аппаратом СРГ.



Рис. 2. Орбитальная обсерватория СРГ со сложенными солнечными панелями в сборочном цехе НПО Лавочкина перед отправкой на Байконур.



Рис. 3. Обсерватория СРГ в полете (художественное представление). Видны оба рентгеновских телескопа, каждый из которых состоит из семи независимых рентгеновских модулей.

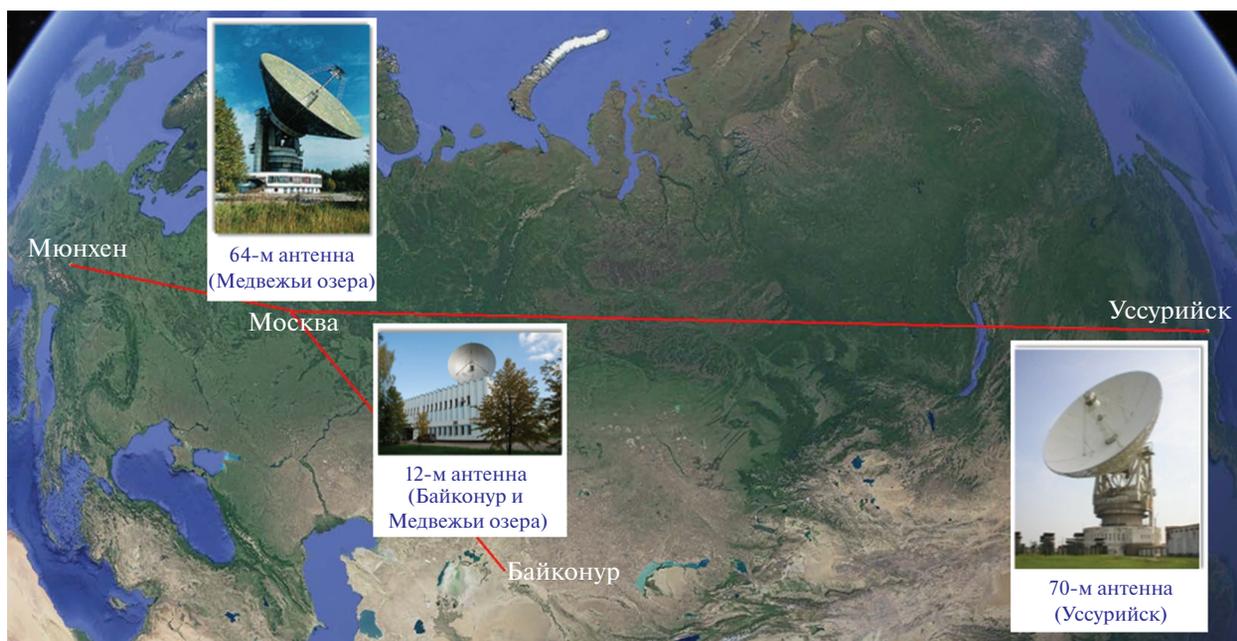


Рис. 4. Антенны Наземного комплекса управления, использующиеся для работ с обсерваторией СРГ.

Управление космическим аппаратом СРГ осуществляется АО “НПО Лавочкина” и ЦУП АО “ЦНИИмаш”, а ответственность за работу рентгеновских телескопов лежит на Институте вне-

земной физики Общества им. Макса Планка в Гархинге под Мюнхеном (eROSITA) и Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в Москве (ART-XC). Прием

научных данных и телеметрии, а также передача команд управления КА осуществляется центрами дальней космической связи в Медвежьих Озерах недалеко от Москвы (антенна диаметром 64 м) и под Уссурийском на Дальнем Востоке России (антенна диаметром 70 м, рис. 4).

Ежедневная передача команд на борт КА и сброс научных данных занимает около одного часа для ART-XC и от 2.5 до 4 ч для eROSITA (включая проверку работоспособности детекторов и подсистем телескопа). Передача команд на КА и телескопы осуществляется с помощью упомянутых выше больших антенн и антенн диаметром 12 м на Байконуре и в Медвежьих Озерах.

Орбита СРГ позволяет проводить круглосуточные наблюдения с небольшими перерывами для загрузки и исполнения команд управления КА и телескопами. Платформа “Навигатор” и оба телескопа имеют встроенную массовую память, позволяющую хранить данные, накопленные в течение суток (фактически, в течение нескольких суток), и передавать их на приемные станции во время ежедневных сеансов связи. В процессе сброса данных телескопы могут (в большинстве случаев) продолжать наблюдения и накопление данных. Во время 100-дневного полета СРГ к точке L2 были проведены настройки телескопов, калибровки детекторов и тщательная проверка подсистем КА и обоих телескопов.

Каждый телескоп имеет по семь независимых зеркальных систем и семь независимых позиционно чувствительных детекторов в фокальных плоскостях так, что зеркала из частей параболоидов и гиперболоидов (рис. 40) фокусируют рентгеновское излучение на позиционно чувствительные детекторы. Шесть таких систем образуют шестиугольник, окружающий аналогичную центральную зеркальную систему и детектор. Для фокусировки рентгеновских лучей оба телескопа используют оптику косоугольного падения (Волтер, 1952а,б).

Во время перелета к точке L2 была проведена обширная программа наблюдений известных точечных и диффузных источников рентгеновского излучения с различными спектральными и временными характеристиками, чтобы определить направление оптических осей 14 зеркальных систем телескопов (и проверить их соосность относительно осей спутника, оптических датчиков звездной ориентации и самих телескопов eROSITA и ART-XC), для калибровки параметров изображений и спектральных характеристик детекторов, а также для определения временных характеристик приборов.

Основным режимом работы орбитальной обсерватории СРГ является сканирование всего неба

в рентгеновских лучах с целью построения рентгеновских карт всего неба в нескольких энергетических диапазонах и создания подробного каталога компактных и диффузных галактических и внегалактических источников рентгеновского излучения.

За несколько лет до запуска было решено, что после прибытия спутника на рабочую орбиту вблизи L2 первые четыре года миссии СРГ будут посвящены обзору всего неба посредством восьми последовательных сканирований всего неба. Такая стратегия позволяет следить за переменностью многочисленных рентгеновских источников: с помощью телескопов обсерватории можно для каждого достаточно яркого источника построить кривую блеска, состоящую из восьми измерений с интервалом в полгода. При этом общее число таких ярких источников может достигать многих десятков тысяч на энергиях между 300 эВ и 2 кэВ и нескольких сотен на энергиях выше 4 кэВ. Среди наиболее интересных рентгеновских транзиентов, которые сможет обнаружить в большом количестве (впервые) обсерватория СРГ, — приливные разрушения звезд сверхмассивными черными дырами и черными дырами промежуточной массы (Хабибуллин и др., 2014; Малаяли и др., 2019; Йонкер и др., 2020).

Кроме того, телескопы обсерватории СРГ могут отслеживать “быструю” переменность рентгеновских источников во время обзора всего неба, поскольку каждая из вышеупомянутых восьми точек на долгосрочных кривых блеска на самом деле будет состоять из шести измерений, разделенных четырьмя часами. Эта возможность должна быть полезна для наблюдения за послесвечениями гамма-всплесков (Хабибуллин и др., 2012; Гирланда и др., 2015; Ашензи и др., 2020), даже если гамма-всплеск направлен в сторону от Солнца или закрыт Землей для околосолнечных космических аппаратов (в частности, обсерватории Ферми).

Планируется, что после четырех лет непрерывного сканирования неба и создания 8 независимых рентгеновских карт всего неба обсерватория СРГ перейдет как минимум на два года в режим детальных наблюдений наиболее интересных рентгеновских источников в трехосной стабилизации. На этом этапе также будет проводиться долгосрочное сканирование протяженных источников рентгеновского излучения и отдельных областей неба площадью до 150 кв. град. В табл. 1 приведены основные параметры обсерватории СРГ и ее телескопов. Дополнительные характеристики телескопов ART-XC и eROSITA приведены в разделах 6 и 7.

Таблица 1. Основные параметры обсерватории СРГ и ее рентгеновских телескопов

Параметры	Обсерватория	
Орбита	Гало-орбита вокруг точки L2 системы Солнце–Земля	
Полная масса	2712 кг	
Энергопотребление	1700 Вт	
Телеметрия	512 кбит с ⁻¹	
Точность наведения	4 угл. сек	
Режимы наведения	а) обзор всего неба б) сканирование (вплоть до 150 кв. град) в) трехосная стабилизация	
Планируемая продолжительность миссии	4 года — обзор всего неба, как минимум 2 года наблюдений в режимах наведения и сканирования	
Телескопы	eROSITA	ART-XC
Энергетический диапазон	0.2–8 кэВ	4–30 кэВ
Энергетическое разрешение	~80 эВ на 1.5 кэВ	9% на 13.9 кэВ
Полное поле зрения	Ø = 62 угл. мин	Ø = 36 угл. мин
Угловое разрешение (во время обзора)	30 угл. сек — диаметр области сбора половины энергии	53 угл. сек — ширина на полувысоте
Угловой размер пиксела	9.6 угл. сек	45 угл. сек
Чувствительность (4-летнего обзора)	< мкрКраб	~100 мкрКраб

Статья организована следующим образом: в разделе 2 описываются орбита и режимы работы обсерватории СРГ; в разделе 3 демонстрируются особенности и возможности телескопов ART-XC и eROSITA и обсуждаются неоднородности рентгеновской карты, полученной в течение первых двух сканирований всего неба; в разделе 4 описаны научные цели и первые результаты миссии; в разделах 5–7 описаны основные свойства платформы Навигатор и телескопов ART-XC и eROSITA; в разделе 8 кратко описана история проекта СРГ в России и задачи германского и российского консорциумов ученых по обработке и научному анализу данных СРГ/eROSITA, поступающих из двух взаимодополняющих полушарий неба. В конце статьи приводятся выводы.

2. ОРБИТА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ

На рис. 5 показаны проекция орбиты СРГ на плоскость эклиптики и схема полета к точке L2 (Эйсмонт и др., 2020). Также указаны коррекции орбиты, сделанные до и после выхода на гало-орбиту вокруг L2.

Во время обзора всего неба спутник вращается вокруг оси, близкой к направлению на Солнце, с периодом 4 ч, при этом ось вращения смещается примерно на один градус в день вслед за движением Солнца (рис. 6). В результате телескоп eROSITA (с диаметром поля зрения 1 градус) наблюдает за каждым точечным источником на небе 6 раз по 30–40 с в течение дня, но, как правило, только однажды за 6 мес. Полное поле зрения ART-XC составляет 36 мин. дуги, поэтому каждый источник на небе наблюдается, как правило, 4 раза по 20 с в течение дня раз в 6 мес. Переменность источников вблизи полюсов эклиптики может отслеживаться гораздо дольше. Обсерватория СРГ просматривает все небо и получает новую карту неба каждые 6 мес (рис. 7).

Звездные датчики используются для точного определения ориентации обсерватории СРГ. Оба телескопа используют данные звездных датчиков для уточнения параметров наведения. На рис. 8 показаны положения основных звездных датчиков, установленных на обоих телескопах обсерватории, а также положение радиоантенн на платформе Навигатор.

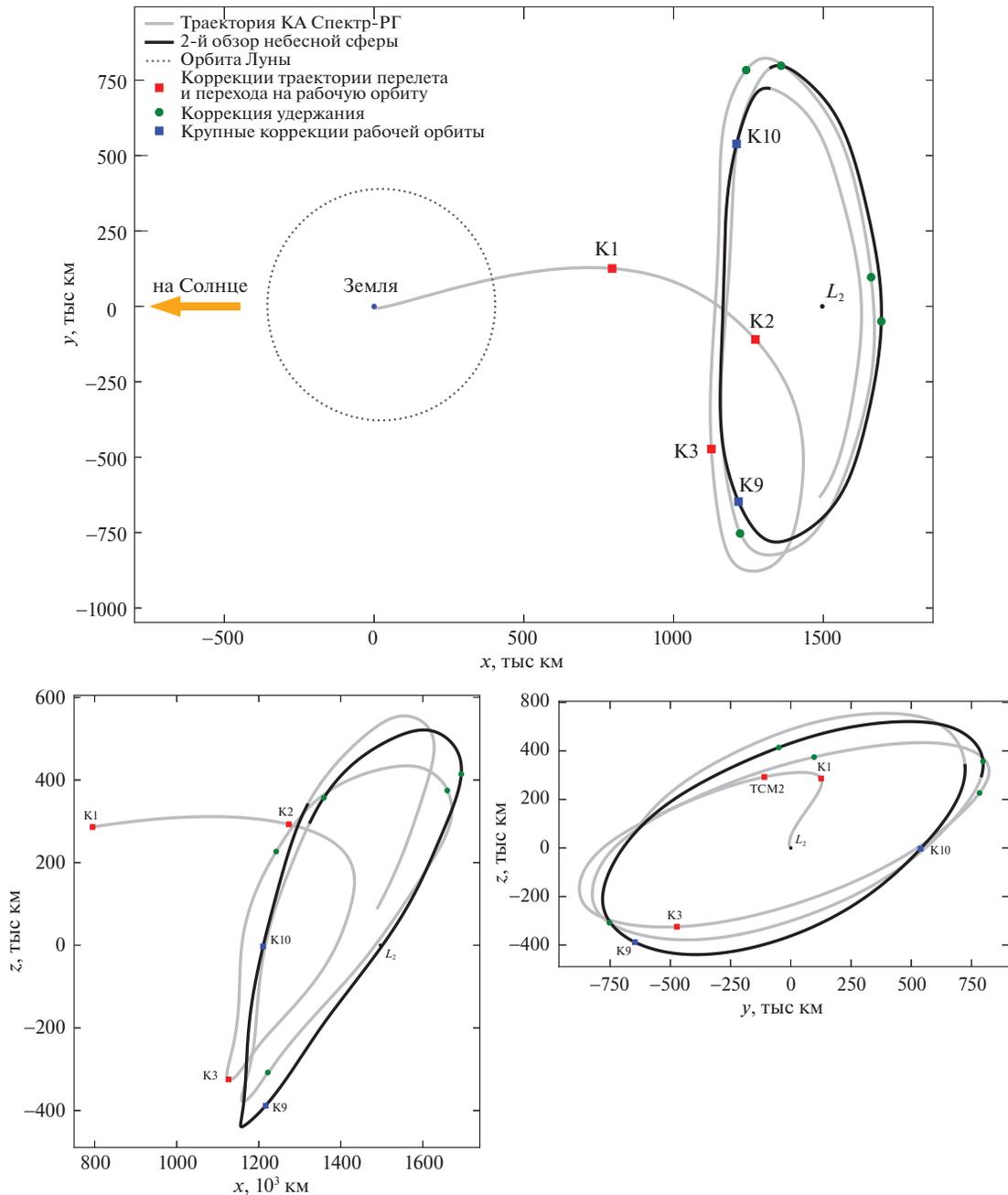


Рис. 5. Три проекции траектории КА СРГ, включая схему перелета к точке L_2 , на плоскость эклиптики (XY) и плоскости, ортогональные ей. Пунктирная линия показывает орбиту Луны. Точками K_1 и K_2 обозначены основные коррекции траектории орбиты (см. п. 5.4). Точка K_3 обозначает маневр перехода на квазипериодическую орбиту вокруг L_2 . Зелеными и синими точками показаны последующие коррекции орбиты. Любезно предоставлено ИПМ РАН им. М.В. Келдыша.

2.1. Неоднородность покрытия неба во время обзора

Принятая стратегия обзора СРГ приводит к появлению на карте неба “глубоких полей” вокруг северного и южного полюсов эклиптики (рис. 7), где пересекаются большие круги всех сканирований. В результате время экспозиции зависит от эк-

липтической широты θ как $1/\cos \theta$, т.е. экспозиция минимальна на экваторе эклиптики и максимальна на полюсах.

Во время первых двух обзоров всего неба возникла дополнительная неоднородность в экспозиции неба из-за вытянутости (в плоскости эклиптики) гало-орбиты СРГ около точки L_2 . Расстояние

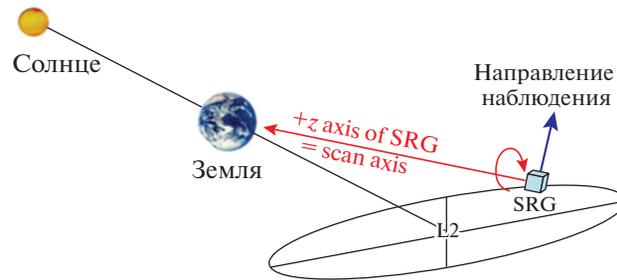


Рис. 6. Вращение СРГ с периодом 4 ч вокруг оси, направленной на Солнце, позволят провести сканирование в узкой полосе на небесной сфере. Плоскость обзора медленно движется вслед за Солнцем со скоростью примерно 1 град. в день.

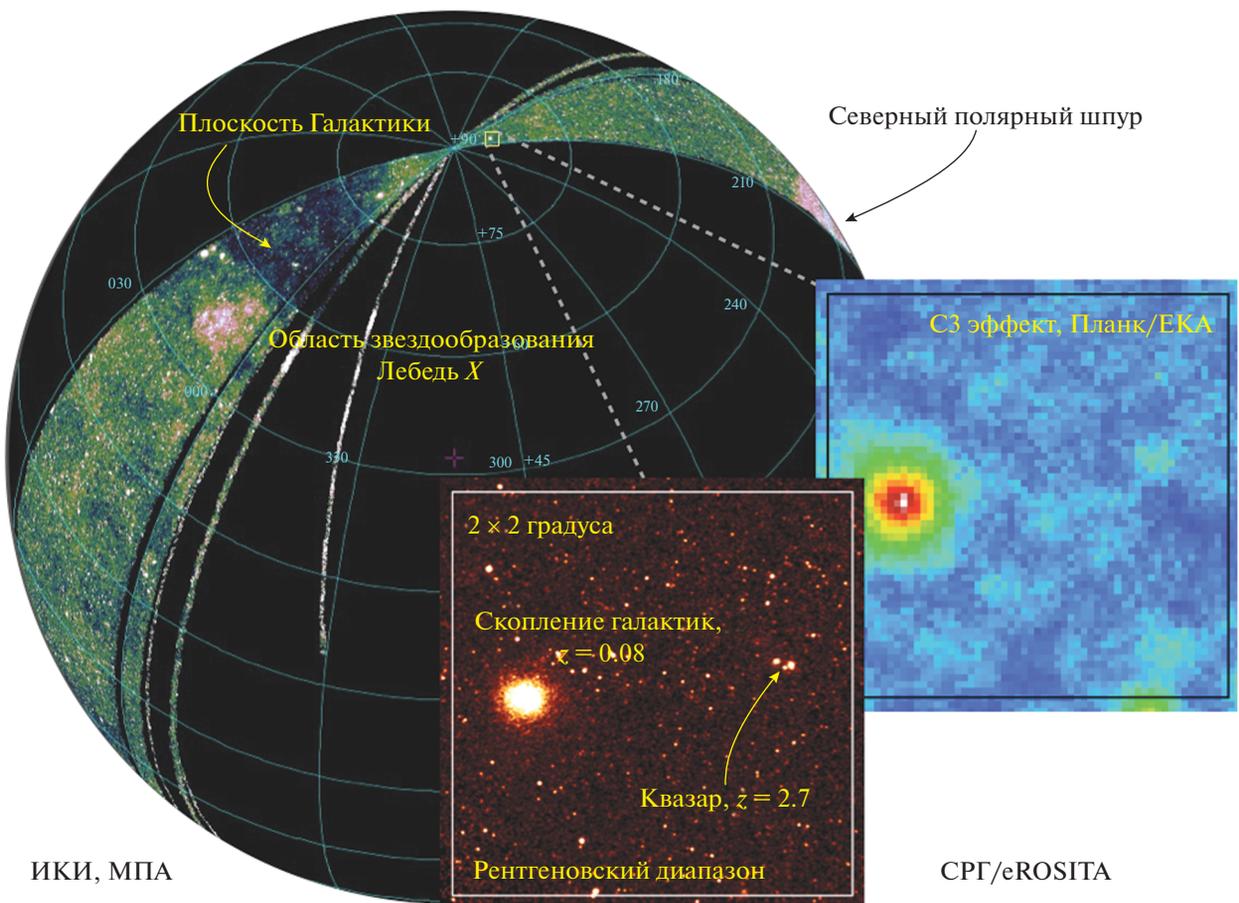


Рис. 7. Начало обзора всего неба телескопом eROSITA. Можно увидеть начальные пробные сканы и темные полосы, когда не было наблюдений. Отдельные сканы пересекаются на северном и южном полюсах эклиптики. На вставках показано увеличенное изображение области $2^\circ \times 2^\circ$ в “глубоком поле” вблизи северного полюса эклиптики, на котором видны скопление галактик А 2255 и яркий квазар.

до Солнца значительно меняется в течение 6 мес (см. рис. 5). Спутник движется впереди Земли, а затем отстает от Земли следующие 3 мес, что приводит к значительному изменению скорости дрейфа плоскости сканирования: от 0.7 град/сутки на бли-

жайшем к Земле участке орбиты до 1.6 град/сутки на самом дальнем ее участке (рис. 9). На рис. 10 показана фактическая карта экспозиции первого обзора всего неба СРГ, основанная на данных ART-XC.

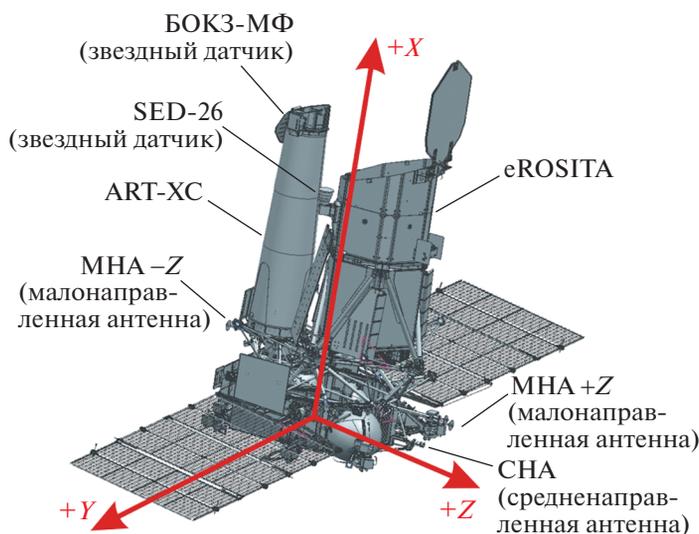


Рис. 8. Космический аппарат СРГ. Расположение основных звездных датчиков, двух всенаправленных радиоантенн и средненаправленной антенны для передачи научных данных.

На рис. 11 (верхняя панель) показана площадь покрытия неба наблюдениями телескопа eROSITA в зависимости от экспозиции. После первых трех обзоров всего неба половина неба была осмотрена с экспозицией не менее 600 с, а области вокруг полюсов эклиптики с суммарной площадью около 3 кв. град были покрыты с экспозицией, превышающей 50 кс, так что в этих площадках уже становится важным эффект путаницы источников. На нижней панели рис. 11 показана соответствующая чувствительность, достигнутая телескопом eROSITA в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ после первых трех обзоров всего неба.

2.2. Глубокое сканирование областей неба площадью до 150 кв. градусов

На заключительных этапах перелета к точке L2 были проведены длительные наблюдения большого числа точечных и протяженных галактических и внегалактических источников для калибровки (Cal) и проверки характеристик (PV) телескопов обсерватории СРГ. Кроме того, были проведены сканирующие наблюдения (глубокие обзоры) ряда протяженных внегалактических полей, области рентгеновского “хребта” Галактики и полей в направлении близлежащих молекулярных облаков (для выявления диффузного рентгеновского излучения на пути между облаками и нами). Мишени для этапа PV были выбраны научной группой ART-ХС и научными рабочими группами немецкого и российского консорциумов eROSITA (см. примеры карт, полученных во время этих наблюдений, в пп. 4.1, 4.2).

Для проведения глубоких обзоров протяженных (до 150 кв. град) областей НПО Лавочкина и ИКИ РАН предложили и реализовали новаторский метод сканирующих наблюдений, описанный в разделе 5 и проиллюстрированный на рис. 12. При построении изображений протяженных астрофизических объектов этот подход обеспечивает гораздо более равномерное покрытие наблюдаемого поля по сравнению со стандартным методом, основанным на проведении серии наблюдений в трехосной стабилизации.

2.3. Наблюдения в трехосной стабилизации

Платформа “Навигатор” позволяет также проводить наблюдения выбранных целей в трехосной ориентации КА. Этот режим был успешно протестирован во время летных калибровок в фазе проверки характеристик телескопов. Точность наведения в трехосной стабилизации описана в разделе 5.

2.4. Приборный фон в районе L2

Фон частиц, регистрируемый обоими приборами в районе точки L2, оказался удивительно стабильным в течение первых 1.5 лет работы, когда солнечная активность была невелика. Это следует из рис. 13, где показан темп счета eROSITA в диапазоне 7–9 кэВ. В этом диапазоне энергий внутренний фон детектора преобладает над астрофизическим фоном. Горизонтальная пунктирная красная линия показывает типичный фон в спокойном состоянии. Изредка наблюдающиеся всплески отсчетов малой амплитуды, скорее всего, вызваны

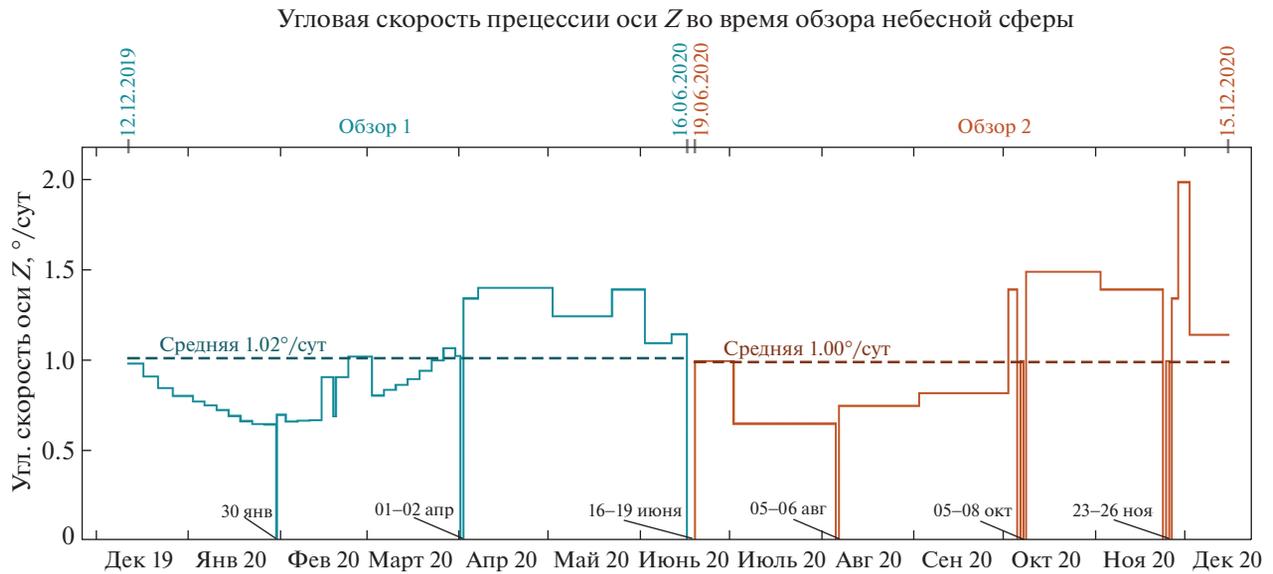


Рис. 9. Скорость вращения оси Z космического аппарата SRG в плоскости эклиптики во время первых двух обзоров неба. Космический аппарат вращается вокруг оси Z с периодом 4 ч, таким образом выполняя обзор всего неба. Из-за ограничений на ориентацию космического аппарата угол между направлением оси Z и направлениями на Солнце и Землю не должен превышать 13 и 24 градусов соответственно. Это условие определяет скорость, с которой ось Z должна следовать как за Солнцем, так и за Землей в любой точке гало-орбиты вокруг L2. Изменение скорости оси Z приводит к изменению экспозиции обзора; более высокая скорость приводит к снижению экспозиции, а более низкая позволяет увеличить экспозицию соответствующих областей неба. Вертикальными полосами отмечены даты прерывов в обзоре всего неба, связанные с коррекцией орбиты и калибровкой телескопов.

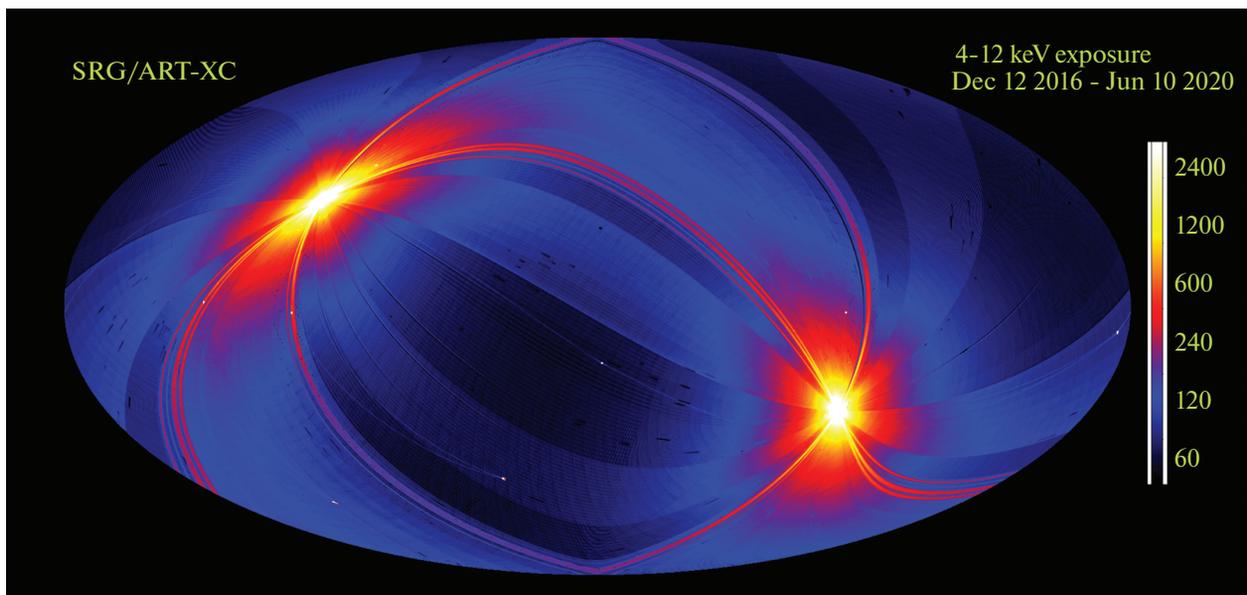


Рис. 10. Карта экспозиции первого обзора всего неба (в галактических координатах) телескопа ART-XC. Время экспозиции указано в секундах (см. цветовую шкалу, показанную справа). Белые пятна на карте соответствуют полюсам эклиптики. Время экспозиции для телескопа eROSITA примерно в 3 раза больше, чем для ART-XC из-за большего поля зрения (1.03° и 36 угл. мин соответственно).

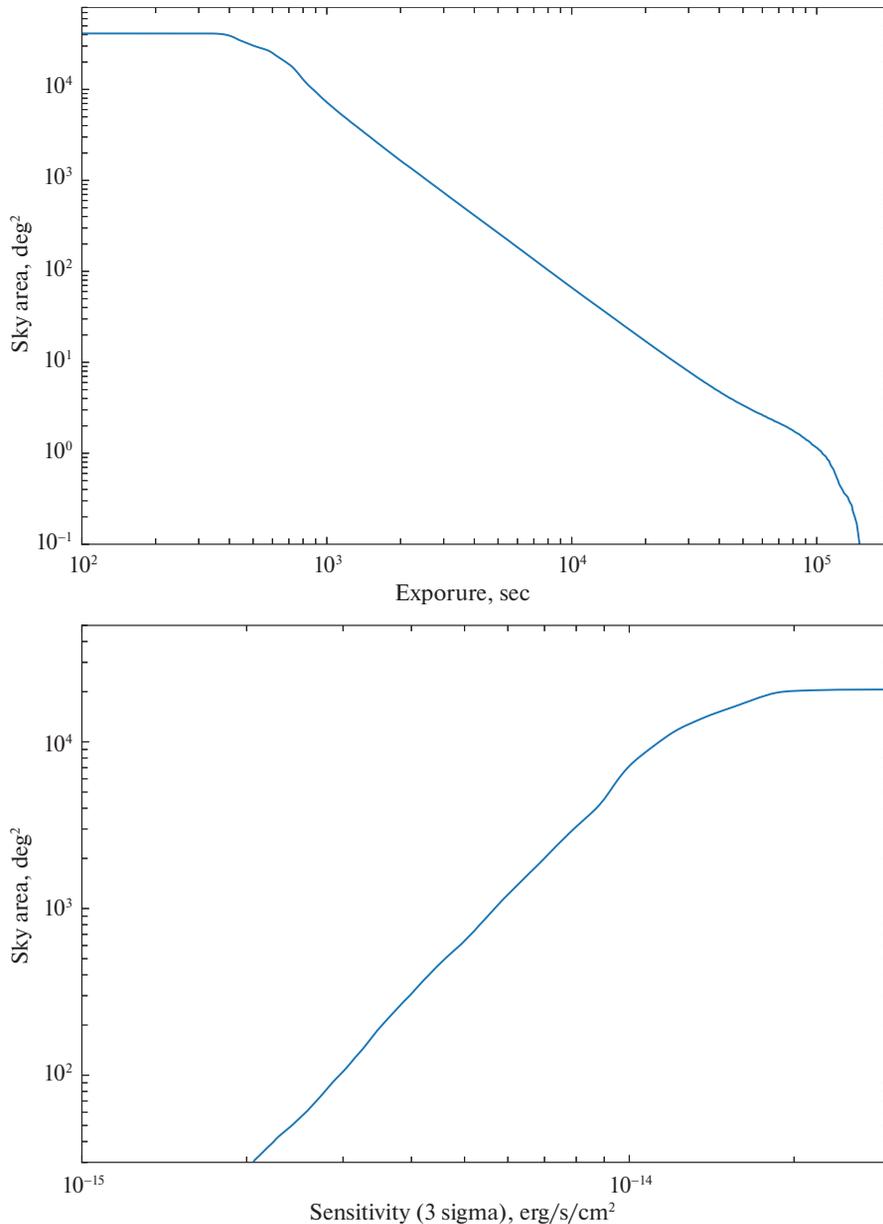


Рис. 11. Распределение экспозиции (верхняя панель) и чувствительности в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ (нижняя панель) телескопа eROSITA после первых трех обзоров всего неба. Сплошная кривая на верхней панели показывает область неба с экспозицией, превышающей заданное значение. Сплошная кривая на нижней панели показывает область неба в полушарии, анализируемом российским консорциумом, в которой чувствительность на уровне 3σ оказывается лучше заданного значения.

низкоэнергичными заряженными частицами, попадающими на ПЗС-матрицы через тонкий входной фильтр.

Спектр фона детектора eROSITA описан в (Пределъ и др., 2021). На рис. 14 показана упрощенная версия модели фона для обоих телескопов: синие линии показывают (слегка модифицированную) модель астрофизического фона неба (Грубер и др., 1999; Ламб и др., 2002), свернутую с от-

кликами телескопов, для сравнения красные линии показывают уровень внутреннего фона детекторов (исключая флуоресцентные линии). В случае eROSITA астрофизический фон преобладает ниже ~ 2 кэВ, а чувствительность телескопа на более высоких энергиях в основном определяется фоном детектора. Как следует из рис. 14, фон частиц в обоих приборах сопоставим.

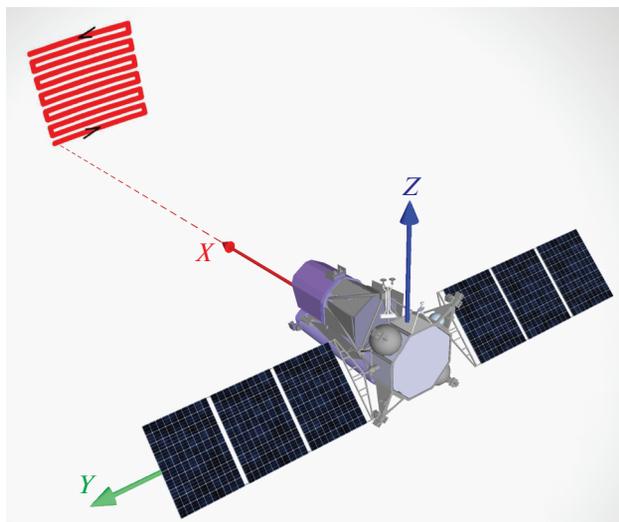


Рис. 12. Визуализация типичного движения по небу оси X в режиме сканирования.

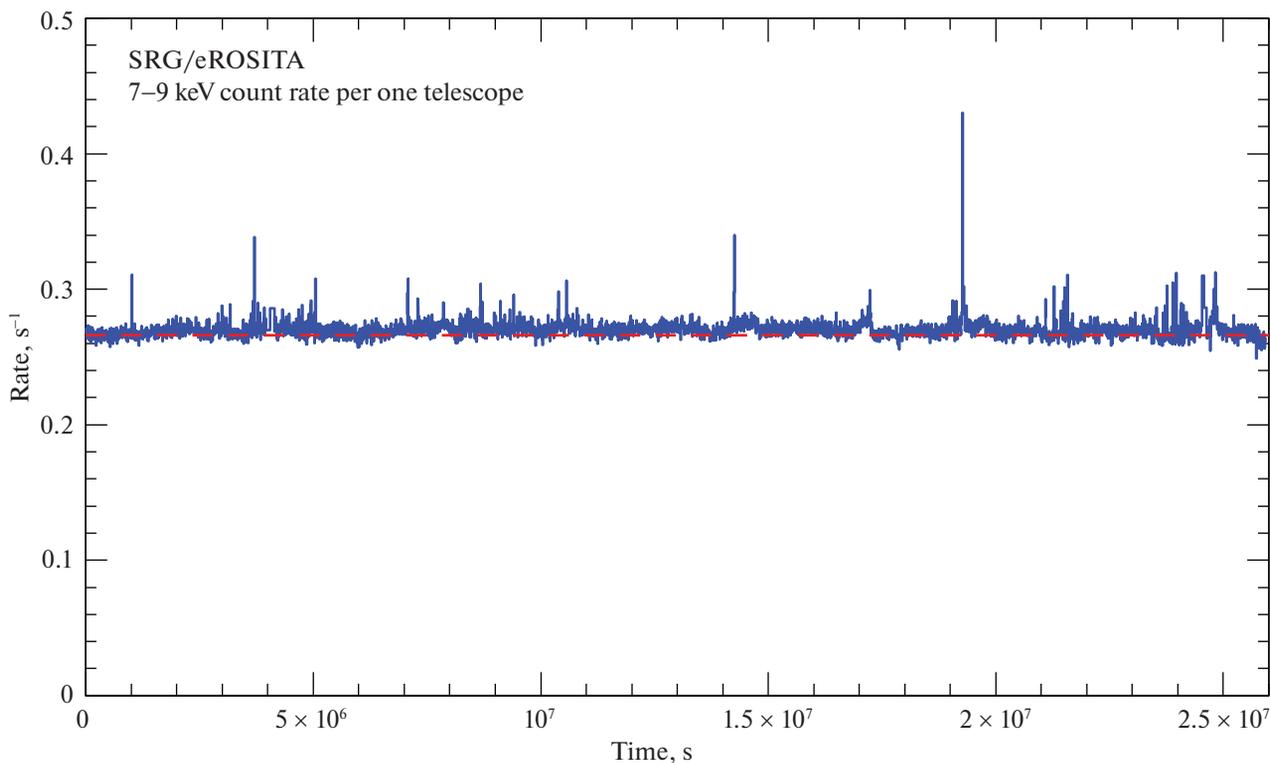


Рис. 13. Скорость счета eROSITA (на один детектор) в диапазоне энергий 7–9 кэВ в течение первых десяти месяцев обзора всего неба в интервалах длительностью по 6000 с. В этом энергетическом диапазоне фон детектора преобладает над астрофизическими источниками. Горизонтальная пунктирная красная линия показывает типичный спокойный фон, который, в основном, очень стабилен. Короткие всплески, амплитуда которых редко превышает 10–20%, вероятно, связаны с заряженными частицами низких энергий, которые достигают ПЗС через тонкие входные фильтры.

2.5. Роль рассеянного света

Оптика телескопа eROSITA (схема Wolter I) фокусирует фотоны, рассеянные два раза, сначала

параболическими оболочками, а затем гиперболическими. Однако некоторые фотоны могут попасть на детектор уже после одного рассеяния или после

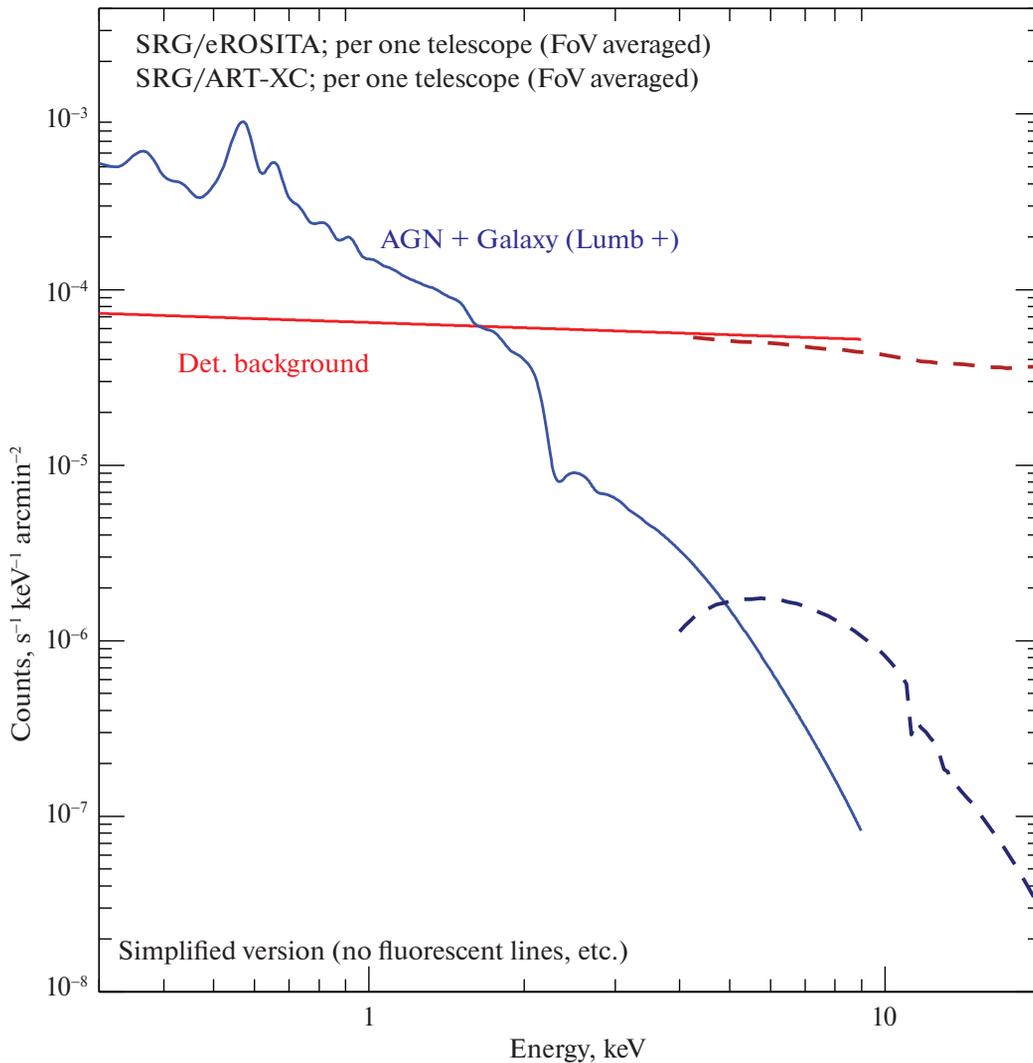


Рис. 14. Оценки астрофизического и внутреннего фонов детекторов ART-XC (пунктирные линии) и eROSITA (сплошные линии). Синими линиями показан ожидаемый фон неба на основе моделей Ламба и др. (2002) и Грубера и др. (1999), свернутых с откликами телескопов, усредненными по полю зрения. Красные линии показывают уровень внутреннего фона детектора (флуоресцентные линии не показаны). В случае eROSITA астрофизический фон доминирует на энергиях ниже ~ 2 кэВ, а при более высоких энергиях внутренний фон детектора на порядок превышает фон неба.

двух рассеяний, включающих “неправильные” рассеяния, например, при рассеянии на внешней поверхности оболочки. Такие фотоны в совокупности называются “рассеянным светом”. Чтобы подавить поток рассеянного света на порядок, была применена специальная бленда (Фридрих и др., 2014; Предель и др., 2021). Тем не менее при наблюдении чрезвычайно ярких источников, таких как рентгеновская двойная Лебедь X-1, можно увидеть слабое и протяженное гало, вызванное рассеянным светом (рис. 15). Рассеянный свет играет более заметную роль для телескопа ART-XC (подробнее см. п. 6.2 ниже и Павлинский и др., 2021).

3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕЛЕСКОПОВ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ

На рис. 16 сравниваются эффективные площади телескопов eROSITA и ART-XC в зависимости от энергии зарегистрированных фотонов, при расположении рентгеновского источника по оси телескопов. Графики эффективных площадей телескопов пересекаются на энергии около 5 кэВ. Телескопы прекрасно дополняют друг друга, детектируя рентгеновские фотоны в смежных энергетических диапазонах. Результаты первого обзора всего неба подтвердили предполетные оценки эффективной площади телескопов обсерватории СРГ.

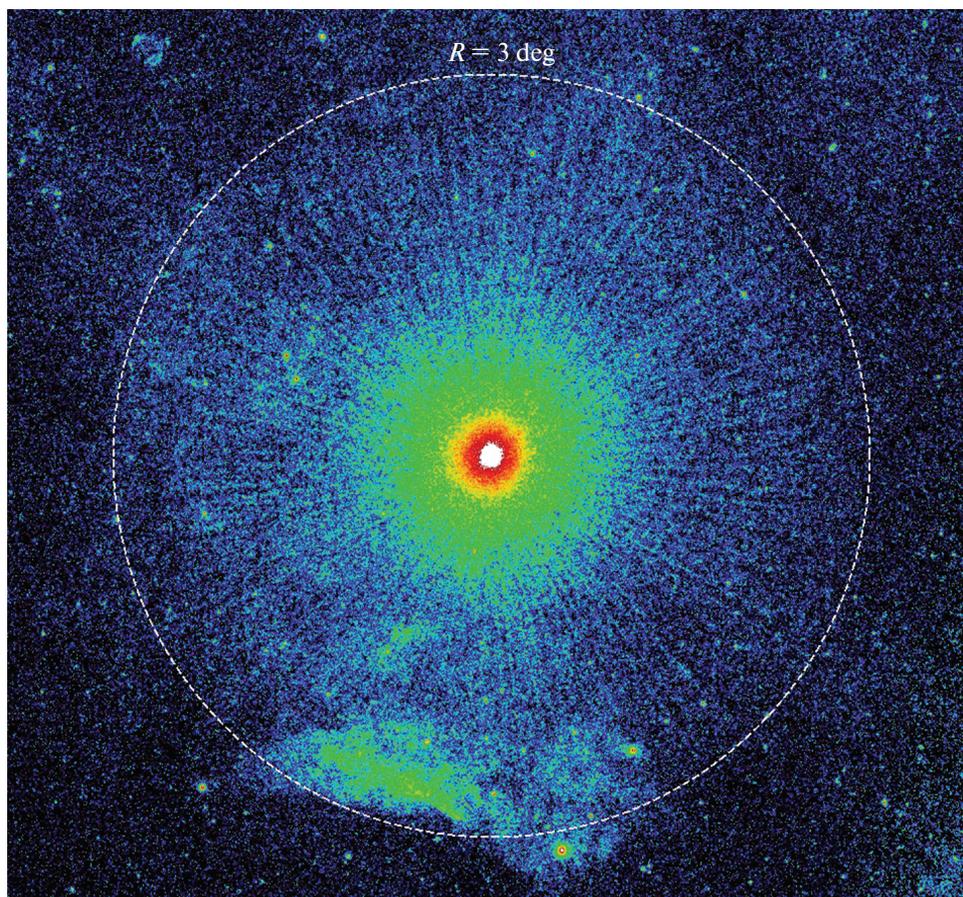


Рис. 15. Изображение области вокруг чрезвычайно яркой галактической двойной системы с черной дырой Лебедь X-1, полученное телескопом eROSITA в диапазоне энергий 0.4–4 кэВ. Изображение было перенасыщено в центре, чтобы выделить очень слабые диффузные структуры. В частности, протяженное “гало”, видимое на расстоянии до ~ 3 градусов от источника, связано с рентгеновскими фотонами, которые отразились от зеркал только один раз (“рассеянный свет”). Этот же эффект в значительной степени отвечает за ореол вокруг Sco X-1, который виден на карте всего неба. Установленная поверх зеркал eROSITA специальная бленда сильно ослабляет рассеянный свет, так что он виден только вокруг очень ярких объектов. Радиальные “лучи”, отчетливо видимые на изображении, обусловлены конструкцией опоры зеркал.

На рис. 17 показана зависимость от энергии чувствительности телескопов eROSITA и ART-XC, достигнутой в ходе первого полугодичного обзора. Эти оценки сделаны для непрерывного непоглощенного степенного спектра с фотонным индексом 1.8 и интервала энергий шириной $\Delta E \sim E$. А именно, спектр фона на орбите (как собственный фон детектора, так и неразрешенное астрофизическое излучение неба, см. подробности в Фрейберг и др. 2020) интегрируется по этому энергетическому интервалу для расчета ожидаемой поверхностной яркости изображения. Используя это значение, можно предсказать ожидаемое распределение потоков (из-за пуассоновских флуктуаций числа отсчетов) в заданном месте изображения, свернутого с функцией размытия точки телескопа. Затем чувствительность оценивается как поток, свя-

занный с пиками, которые для гауссовского распределения соответствовали бы отклонению в 5σ . Соответствующие кривые обозначены как “S1”. В обзоре экспозиция минимальна вблизи экватора эклиптики, где она составляет 200 с для eROSITA и 60 с для ART-XC. Разница в экспозиции связана с разными телесными углами охвата телескопов (в любой момент времени). Горизонтальные полосы показывают широкополосную чувствительность в первом обзоре, которая была приближенно преобразована в единицы плотности потока.

4. НАУЧНЫЕ ЦЕЛИ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ

Основной научной задачей обсерватории СРГ является построение подробных рентгеновских карт неба и каталогов точечных и протяженных

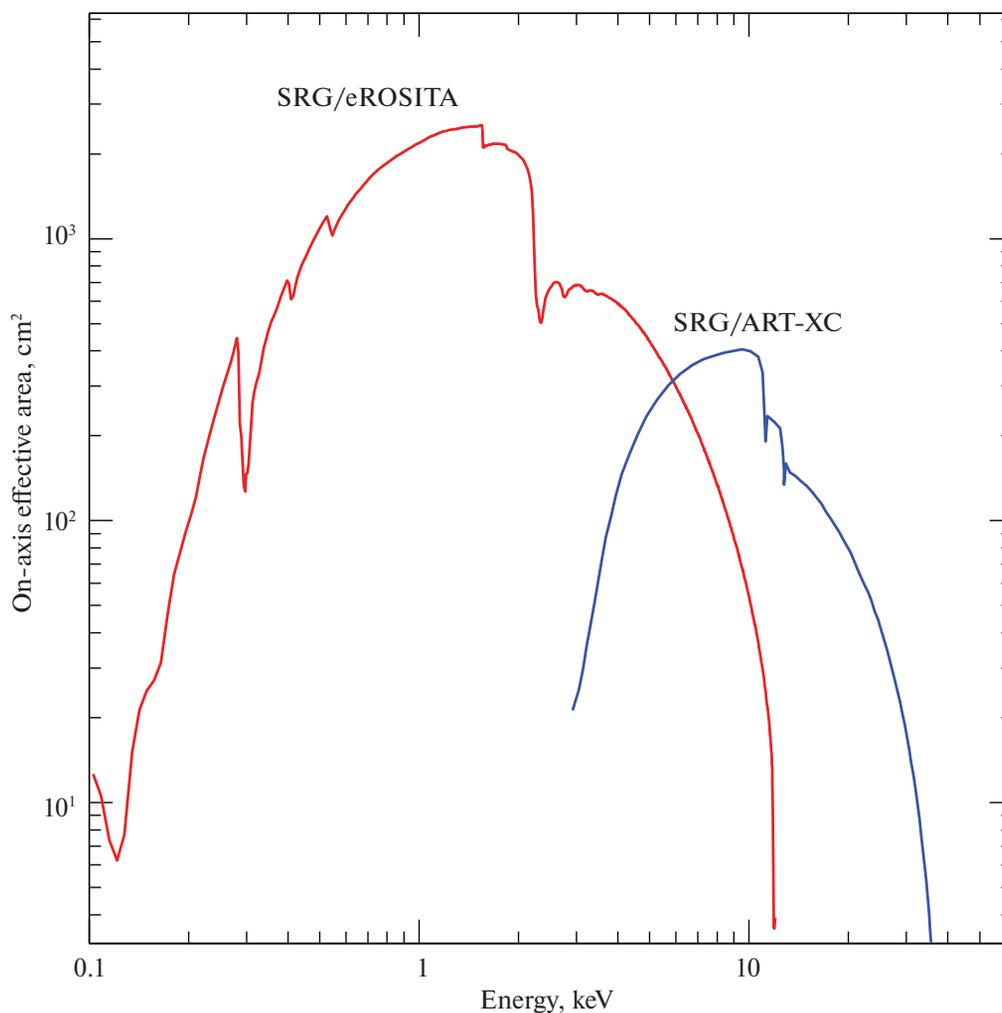


Рис. 16. Эффективная площадь на оси телескопов eROSITA (красный) и ART-XC (синий) обсерватории СРГ. Эти кривые основаны на предполетных калибровках и моделях, которые в целом соответствуют результатам летных калибровок.

источников рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 0.3 до 12 кэВ. Телескопы ART-XC и eROSITA были разработаны специально для выполнения этих задач.

Ожидается, что в течение восьми обзоров всего неба, охватывающих период в 4 года, будет обнаружено до 4–5 миллионов компактных источников рентгеновского излучения: около трех миллионов активных ядер галактик (АЯГ), около 100 тысяч богатых скоплений галактик, до миллиона звезд с яркими коронами (в основном М-карликов) и десятки тысяч других галактических объектов, включая остывающие нейтронные звезды и радиопульсары, аккрецирующие нейтронные звезды (в частности, рентгеновские пульсары и барстеры), черные дыры и многочисленные белые карлики в двойных звездных системах.

Также представляет интерес исследование протяженных источников рентгеновского излучения, таких как остатки сверхновых, ветровые пульсарные туманности (плерионы), горячий газ, заполняющий большую часть межзвездного объема вблизи плоскости Галактики, разреженный газ в гало Галактики и газовые “фонтаны” в близлежащих галактиках. Кроме того, имеется интерес к Местному пузырю, кометам в Солнечной системе и к поиску следов ударной волны на границе гелиосферы, где солнечный ветер останавливается межзвездным газом, окружающим Солнечную систему. Также возможно продолжение исследования, начатого спутником ROSAT (Сноуден и др., 1997), о происхождении мягкого рентгеновского фона Галактики, зависящего от распределения молекулярного и атомарного газа и пыли в Галактике, которые поглощают мягкое рентгеновское излучение.

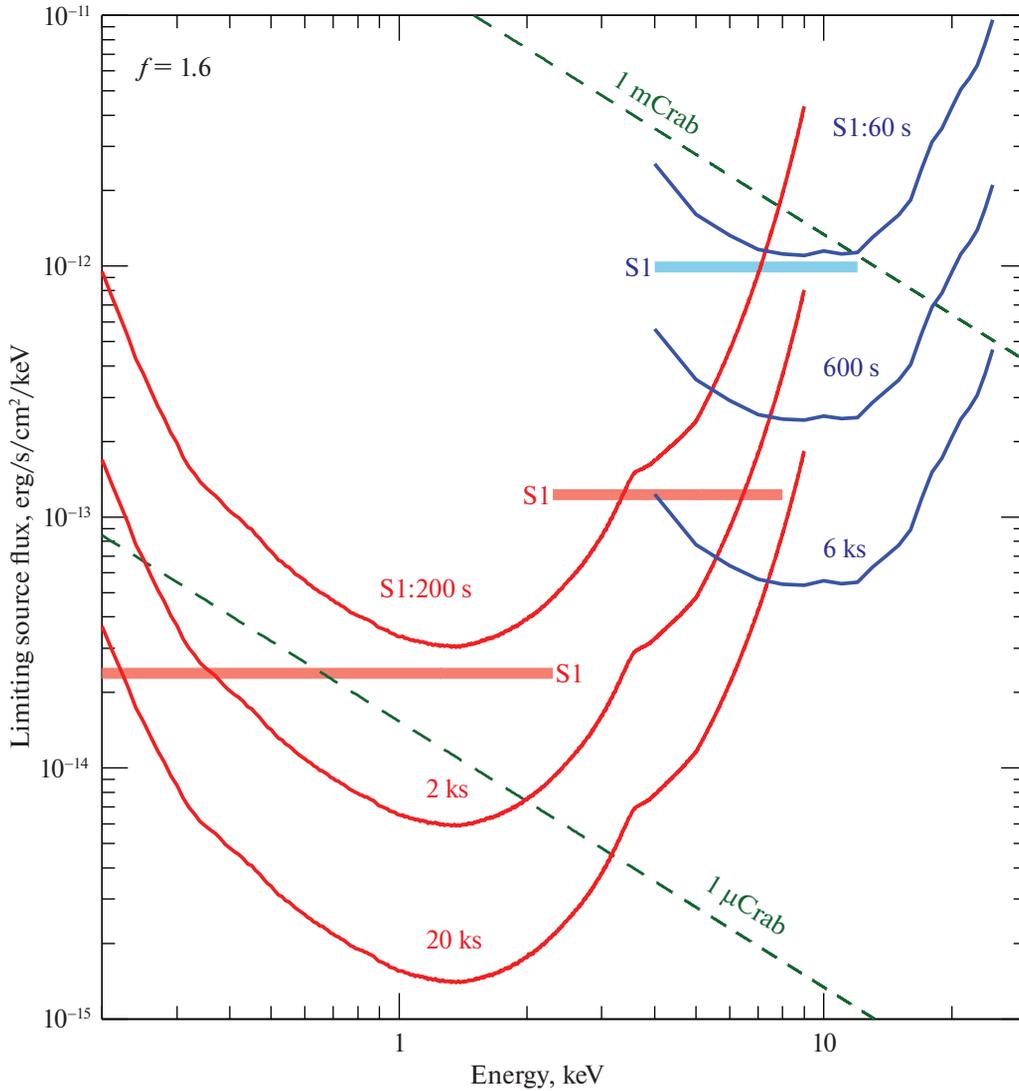


Рис. 17. Оценки чувствительности телескопов eROSITA (красный) и ART-XC (синий) для непрерывного спектра в интервале энергий $\Delta E \sim E$, в зависимости от энергии. Кривые показывают чувствительность в единицах плотности потока энергии (т.е. эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$), рассчитанного для интервала энергий между $E_1 = E/f$ и $E_2 = E \times f$, где $f = 1.6$. Верхние кривые, обозначенные “S1”, соответствуют чувствительности, достигнутой во время первого обзора всего неба вблизи экватора эклиптики, где время экспозиции наименьшее. Разница в эффективном времени (200 с против 60 с для eROSITA и ART-XC соответственно) отражает разницу в полях зрения двух телескопов. Также показаны кривые чувствительности для 10-кратно и 100-кратно увеличенных экспозиций. Горизонтальные полосы показывают широкополосную (0.2–2.3 кэВ и 2.3–8 кэВ для eROSITA и 4–12 кэВ для ART-XC) чувствительность в первом обзоре, приблизительно преобразованную в единицы плотности потока. Для сравнения показан спектр Крабовидной туманности, масштабированный к потоку 1 мКраб и 1 мкКраб.

Как продемонстрировал весьма успешный космический аппарат ROSAT (рентгеновский обзор всего неба в 1990 г., Voges и др., 1999), такие данные с нетерпением ожидаются и широко используются мировым астрономическим сообществом. Кроме того, благодаря наличию восьми обзоров всего неба, каждый продолжительностью 6 мес, обсерватория СРГ может обнаружить огромное количество переменных компактных источников

галактического и внегалактического происхождения.

4.1. Рентгеновские карты, полученные во время первого обзора и во время калибровок и проверок характеристик телескопов

На рис. 18 показано распределение по небу примерно 600 источников, обнаруженных телескопом

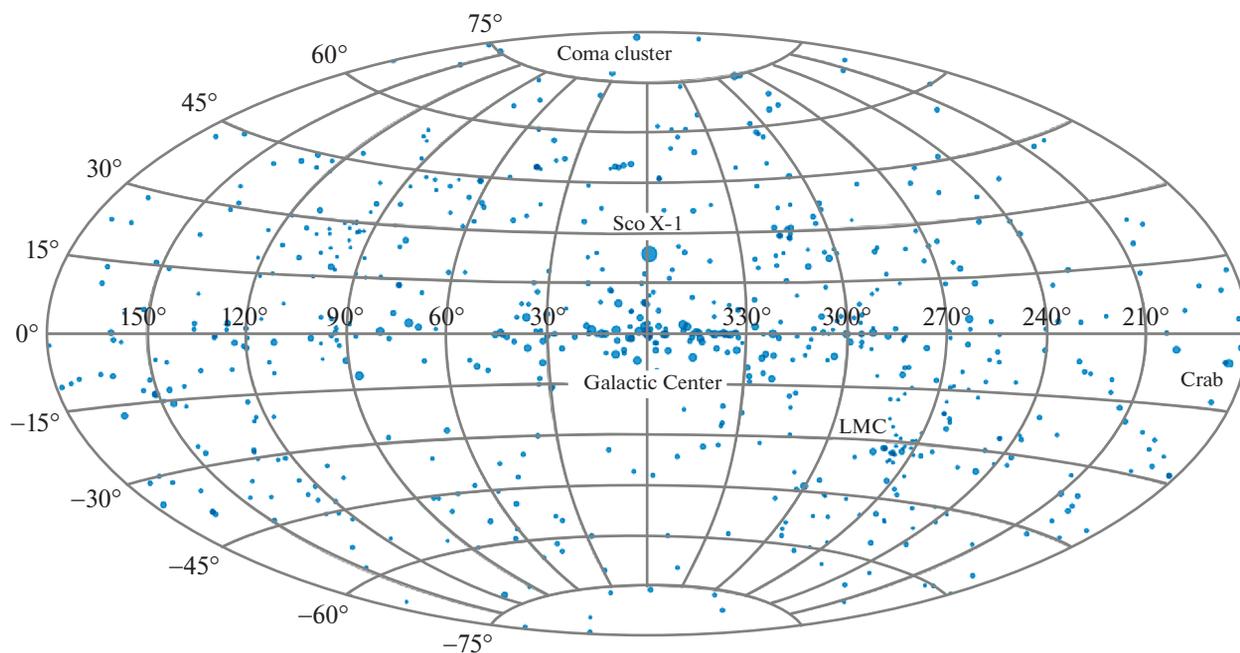


Рис. 18. Положение (в галактических координатах) источников рентгеновского излучения, обнаруженных телескопом ART-XC обсерватории СРГ во время первого обзора всего неба (типичная экспозиция на точку составляет всего 60 с). В диапазоне энергий 4–12 кэВ было обнаружено около 600 источников, из которых ~60% являются галактическими (черные дыры, нейтронные звезды, белые карлики, коронально активные звезды, остатки сверхновых и т.д.) и ~40% — внегалактическими (АЯГ и несколько десятков массивных скоплений галактик), часть источников являются новыми. Размер символа отражает яркость рентгеновского излучения источников.

ART-XC в энергетическом диапазоне 4–12 кэВ во время первого обзора неба (12 декабря 2019 г.—10 июня 2020 г.). Недавно обновленная версия этой карты, основанная на сумме первых двух обзоров неба (декабрь 2019 г.—декабрь 2020 г.) была представлена в (Павлинский и др., 2021б). В общей сложности ART-XC обнаружил 867 источников (821 точечных и 46 протяженных). Среди 750 источников известного или предполагаемого происхождения в этом каталоге 56% являются внегалактическими (в основном АЯГ, а также 52 скопления галактик на малых красных смещениях), а остальные — галактическими (рентгеновские двойные, катаклизмические переменные (КП), остатки вспышек сверхновых и т.д.). У 114 источников ART-XC впервые обнаружил рентгеновское излучение. Хотя большинство из них (около 80), вероятно, являются ложными, учитывая выбранный порог регистрации, ожидается, что среди них есть около 35 новых астрофизических объектов. В ходе продолжающейся программы оптических наблюдений этих источников уже удалось выявить нескольких новых АЯГ и КП (Зазнобин и др., 2021а,б).

Достигнутая чувствительность к точечным источникам после первого года обзора всего неба

ART-XC варьируется от $\sim 4 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ вблизи плоскости эклиптики до $\sim 8 \times 10^{-13}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ (4–12 кэВ) вблизи полюсов эклиптики. Характерная глубина обзора ART-XC уже сопоставима с той, которая была достигнута в аналогичном энергетическом диапазоне (4–10 кэВ) в недавнем обзоре всего неба рентгеновского монитора MAXI (Кавамура и др. 2018), и лишь немного хуже чувствительности обзора перенаведений обсерватории XMM-Newton в диапазоне 2–12 кэВ (Сакстон и др., 2008). При этом обзор ART-XC значительно лучше первого из этих обзоров с точки зрения углового разрешения, и обеспечивает полное и регулярное покрытие неба в отличие от второго. Чувствительность обзора ART-XC будет возрастать в ходе миссии по мере увеличения экспозиции и, в том числе, из-за уменьшения потока галактических космических лучей при приближении к следующему солнечному максимуму. К концу 4-летнего обзора всего неба ART-XC может найти до 5000 рентгеновских источников.

Как отмечалось выше, телескоп eROSITA заметно уступает по чувствительности телескопу ART-XC на энергиях выше 5–6 кэВ, но в диапазоне между 4 и 5 кэВ eROSITA более чувствителен. Как показано на рис. 19, во время

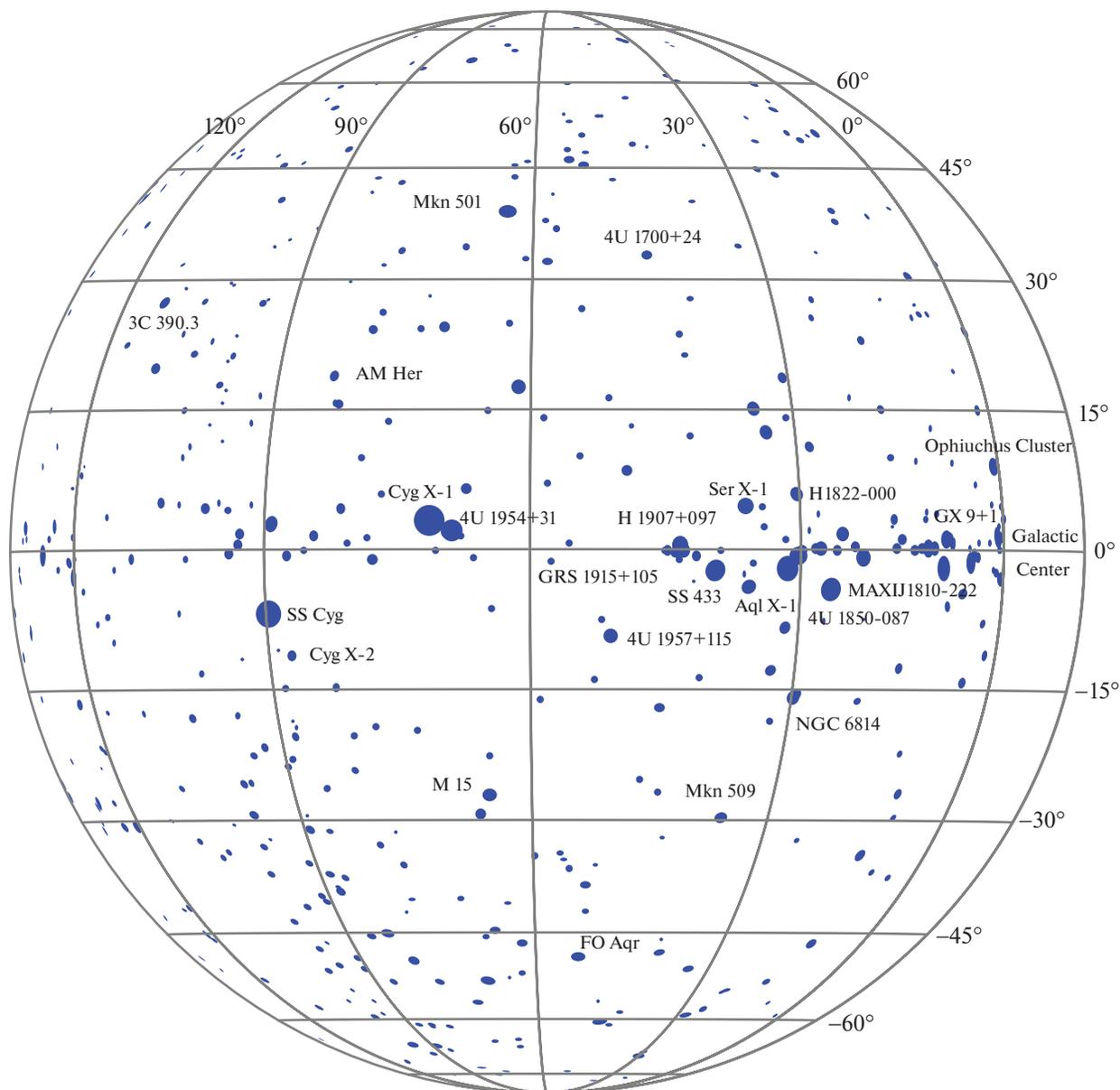


Рис. 19. Положения (в галактических координатах) источников рентгеновского излучения, обнаруженных телескопом eROSITA обсерватории СРГ в диапазоне энергий 4–8 кэВ во время первых двух обзоров всего неба на половине неба, где Российский консорциум отвечает за анализ данных (центр Галактики находится на правой стороне изображения). На этом изображении показаны около 600 источников, некоторые из самых ярких помечены.

первых двух обзоров неба eROSITA обнаружил более 600 источников рентгеновского излучения в одном полушарии в диапазоне энергий от 4 до 8 кэВ. Это сопоставимо с количеством источников, обнаруженных ART-XC на всем небе во время одного обзора в диапазоне 4–12 кэВ.

Телескоп eROSITA получил наилучшую карту неба в истории рентгеновской астрономии в энергетическом диапазоне 0.3–2.3 кэВ (рис. 20) уже после первого обзора всего неба. Хорошее угловое разрешение и высокая чувствительность телескопа

eROSITA позволили обнаружить более миллиона компактных источников и картографировать около 20 тысяч протяженных источников. Такое огромное количество источников не может быть отображено на одной карте, поэтому только самые яркие из них показаны как точки. После сканирования неба всего лишь в течение шести месяцев eROSITA построил карту, примерно в 4 раза более чувствительную и содержащую почти в 8 раз больше источников, чем лучшая предыдущая карта всего неба, полученная в 1990 г. спутником ROSAT. С помощью телескопа

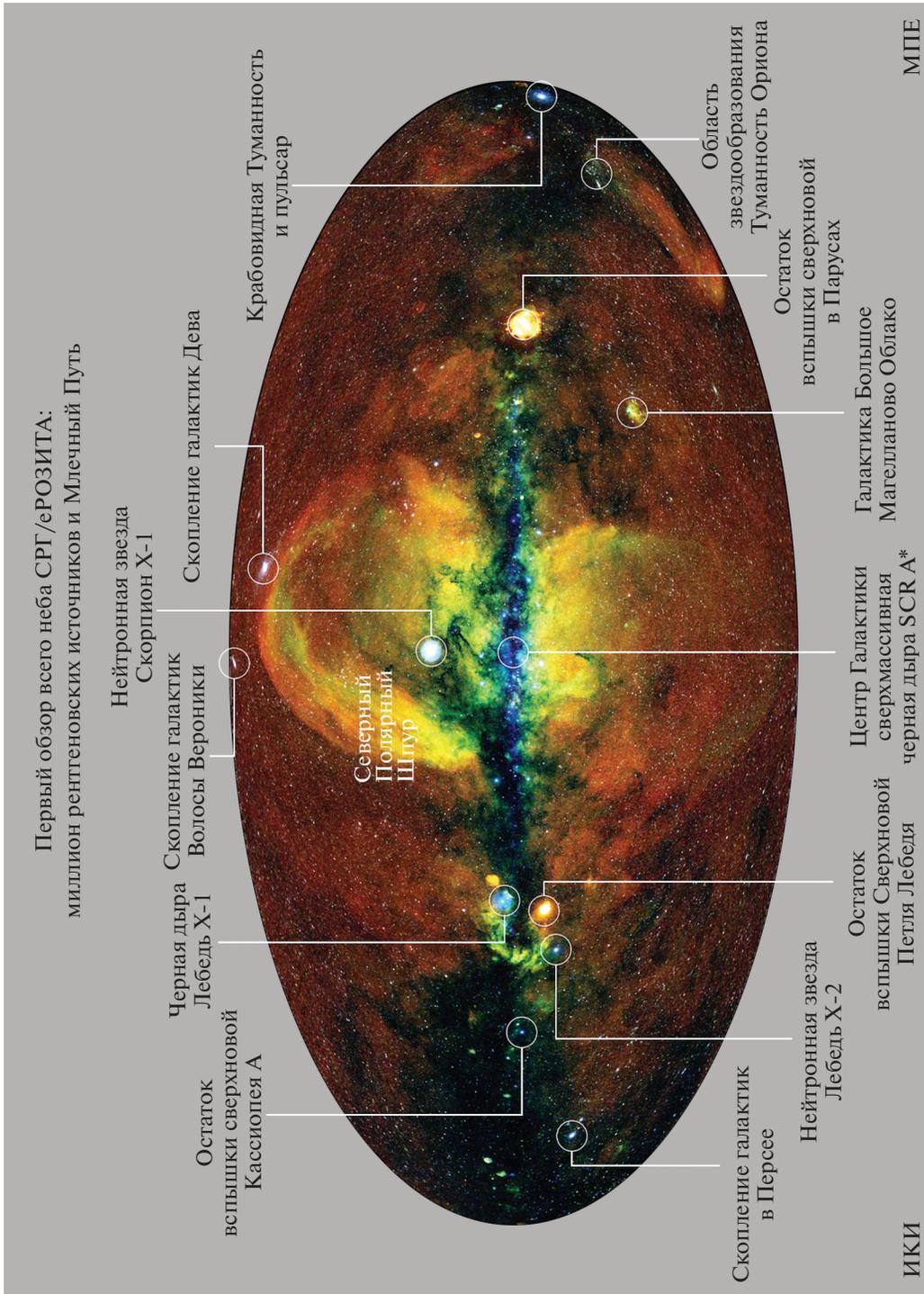


Рис. 20. Аннотированная версия первого изображения всего неба СРГ/eROSITA. Отмечены несколько примечательных источников рентгеновского излучения, начиная от удаленных скоплений галактик (Волосы Вероники, Дева, Персей) до протяженных источников, таких как остатки сверхновых и туманности, и заканчивая яркими точечными источниками, например Скорпион X-1 (первый известный внесолнечный источник рентгеновского излучения). Карта всего неба составлена двумя научными консорциумами СРГ/eROSITA Германии и России. Каждый консорциум создал изображение для своей половины неба. Карта приведена в виде RGB, где фотоны разных энергий показаны разными цветами: от 300 до 600 эВ — красным, от 600 эВ до 1.0 кэВ — зеленым и от 1 до 2.3 кэВ — синим. Расцветка на этой карте, представляющей примерно 400 миллионов фотонов, зарегистрированных eROSITA в течение шести месяцев обзора, позволяет судить о температуре излучающего газа в диапазоне от 3 до более чем 10 млн К. В самом центре карты расположена сверхмассивная черная дыра Sgr A* массой около 4 миллионов солнечных масс. Это довольно слабый источник рентгеновского излучения, почти невидимый на карте. В средней плоскости рисунка находится диск Млечного Пути. Он выглядит темным, потому что молекулярный газ и пыль в плоскости Галактики поглощают рентгеновские лучи. Синие точки, которые видны в этой области, связаны с большим количеством ярких и мощных источников рентгеновского излучения в Млечном Пути: рентгеновских пульсаров, аккрецирующих черных дыр, нейтронных звезд и белых карликов в двойных звездных системах и остатков взрывов сверхновых.

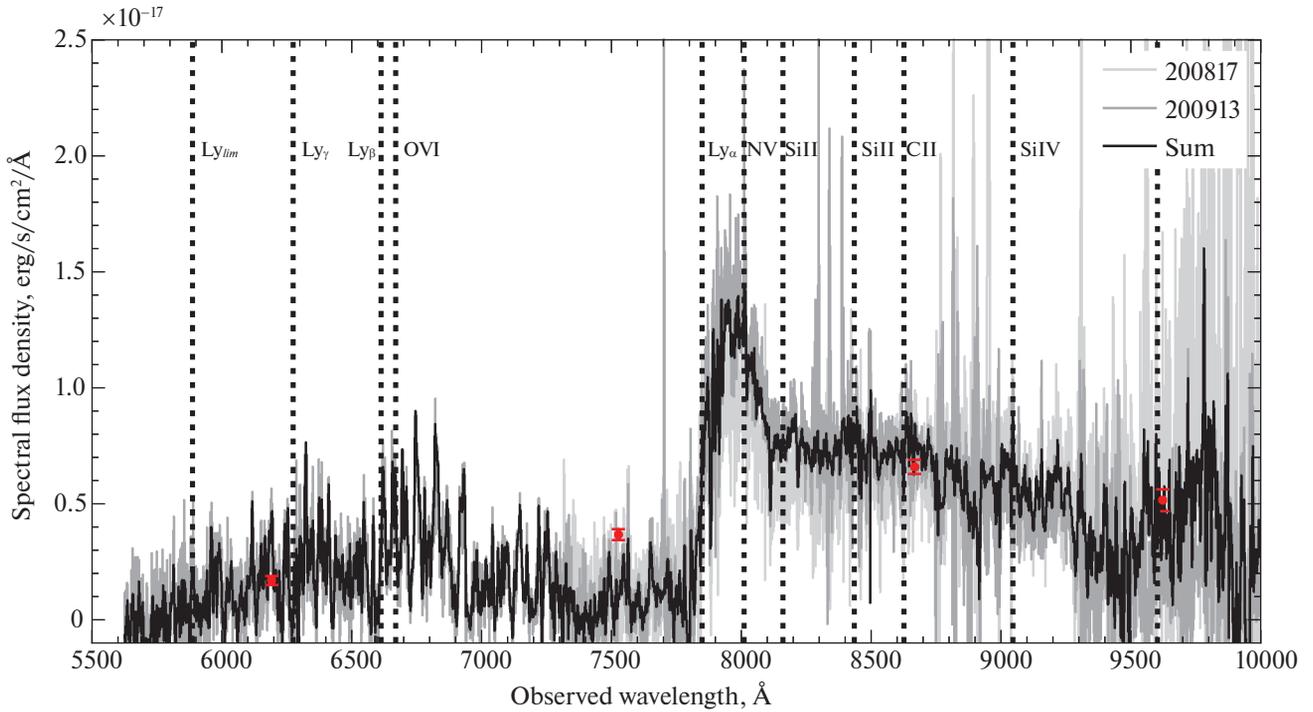


Рис. 21. Оптический спектр квазара SRGE J170245.2+130107 (обнаружен СРГ/eROSITA), полученный с помощью 6-метрового телескопа БТА. Светло-серая и темно-серая линии показывают спектры, полученные 2020/08/17 и 2020/09/13 соответственно, в то время как суммарный спектр показан черной линией. Красные точки показывают плотность потока источника в фильтрах Pan-STARRS r , i , z , y . Вертикальными пунктирными линиями показаны ожидаемые положения пиков линий излучения квазара на $z = 5.466$. На основе работы (Хорунжев и др., 2021).

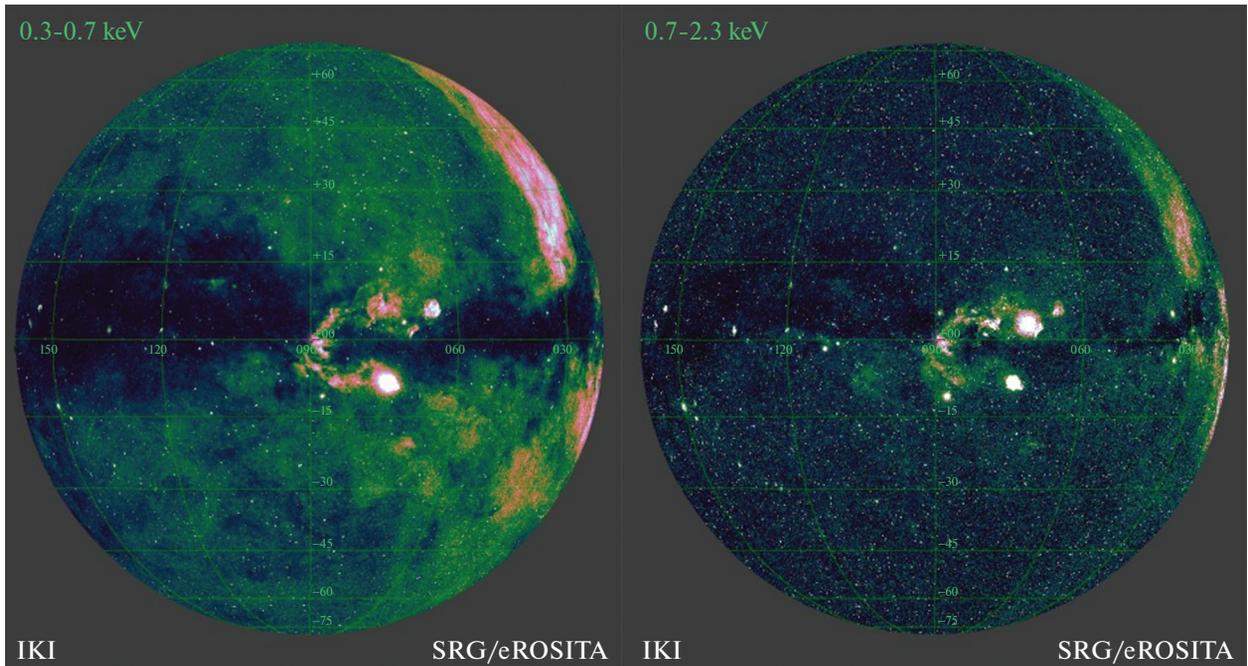


Рис. 22. Изображения половины неба по данным СРГ/eROSITA в диапазонах энергий 0.3–0.7 и 0.7–2.3 кэВ.

eROSITA уже удалось примерно удвоить полное число источников, обнаруженных всеми орбитальными обсерваториями за 60 лет рентгеновской астрономии.

На карте eROSITA видны впечатляющие гигантские пузыри горячего газа с температурой до 10 млн К, выброшенные из плоскости Галактики, — результат сотен тысяч взрывов сверхновых и/или вспышки активности сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики (Предел и др., 2020). Эти рентгеновские пузыри видны выше и ниже средней плоскости рентгеновского изображения и охватывают хорошо известные пузыри обсерватории Ферми, связанные с гамма-излучением, исследуемым в результате взаимодействия космических лучей с окружающим газом (Аккерманн и др., 2014).

Около трех четвертей объектов на карте СРГ/eROSITA — это АЯГ, питаемые аккрецией материи на сверхмассивные черные дыры, расположенные в их центрах. Они находятся далеко за пределами Млечного Пути. Особый интерес представляет квазар CFHQS J142952+544717 на $z = 6.2$ (что соответствует возрасту Вселенной 900 млн лет), который был впервые обнаружен в рентгеновском диапазоне с помощью телескопа eROSITA и оказался самым ярким в рентгене ($\sim 3 \times 10^{46}$ эрг с^{-1} или $\sim 10^{13}$ болометрических светимостей Солнца) квазаром на $z > 6$ (Медведев и др., 2020, 2021). Во время фазы проверки характеристик телескопов и в ходе сканирования всего неба СРГ/eROSITA обнаружил ряд чрезвычайно ярких квазаров на красных смещениях $z > 5$ и заметное число на $z > 4$ (Хорунжев и др., 2020; Додин и др., 2020; Бикмаев и др., 2020; Вольф и др., 2021). На рис. 21 показан спектр одного из таких квазаров, обнаруженного СРГ/eROSITA на $z = 5.5$. Спектр был получен с помощью 6-м телескопа БТА на Северном Кавказе (Хорунжев и др., 2021).

Большинство из примерно 20 000 протяженных объектов на карте eROSITA представляют собой скопления галактик, заполненные темной материей и горячим межгалактическим газом, который светится в рентгеновских лучах. Менее 50% этих скоплений были известны ранее по оптическим обзорам или по регистрации эффекта Сюняева—Зельдовича (Сюняев, Зельдович, 1980) в их направлении в обзорах космической обсерватории им. Макса Планка (Планк консорциум, 2016), Атакамского космологического телескопа (АСТ, Хилтон и др., 2021) и Телескопа на Южном Полюсе (SPT, Блим и др., 2015).

В следующие годы можно ожидать серьезной синергии и конкуренции между различными методами наблюдения скоплений галактик, благодаря

продолжению исследований неба в разных спектральных диапазонах, включая обзор СРГ в рентгеновских лучах и наземные обзоры с помощью АСТ и SPT в микроволновом диапазоне. Результаты этих обзоров будут представлять ценность в первую очередь для космологических исследований. Кроме того, можно ожидать открытия тысяч сильных гравитационных линз, связанных с глубоким гравитационным потенциалом скоплений галактик.

Около двухсот тысяч довольно близких звезд с короной, намного более мощной, чем у Солнца, также вносят заметный вклад в излучение областей с относительно низкой температурой на карте неба eROSITA (рис. 20). Интересно, что eROSITA обнаружила рентгеновское излучение от 150 звезд с известными экзопланетами. Это составляет около 10% от всех близлежащих звезд с известными планетными системами (исключая более отдаленные звезды с экзопланетами в области неба, исследованной спутником Кеплер).

Рисунок 22 демонстрирует резкое различие между изображениями неба (одно полушарие) в энергетических диапазонах 0.3–0.7 кэВ и 0.7–2.3 кэВ. В диапазоне 0.3–0.7 кэВ видно довольно однородное и яркое диффузное излучение. Это может быть фоновое излучение огромного числа источников мягкого рентгеновского излучения, расположенных на космологических расстояниях, и/или излучение горячего ($10^5 < T_e < 10^7$ К) газа в гало нашей Галактики; дополнительный значительный вклад в яркость неба на этих энергиях могут давать относительно близкие источники, такие как гипотетический Местный пузырь, созданный взрывами сверхновых в относительной близости от Солнечной системы. Примечательно также сильное поглощение мягкого рентгеновского излучения холодным атомным и молекулярным газом и пылью в плоскости Галактики. Совсем иная картина наблюдается в диапазоне энергий 0.7–2.3 кэВ. Здесь на изображении преобладают сотни тысяч внегалактических источников, а основной вклад как в число источников, так и в диффузный фон вносят АЯГ. Поглощение холодным газом и пылью в плоскости Галактики сильно уменьшается из-за быстро падающего с ростом энергии фотонов сечения фотопоглощения. Также на обеих картах хорошо видны яркие галактические источники в области активного звездообразования в созвездии Лебеда.

4.2. Примеры результатов глубоких обзоров, проведенных на этапе проверок характеристик телескопов

4.2.1. Центр Галактики. Во время фазы проверки характеристик телескопов с помощью ART-XC

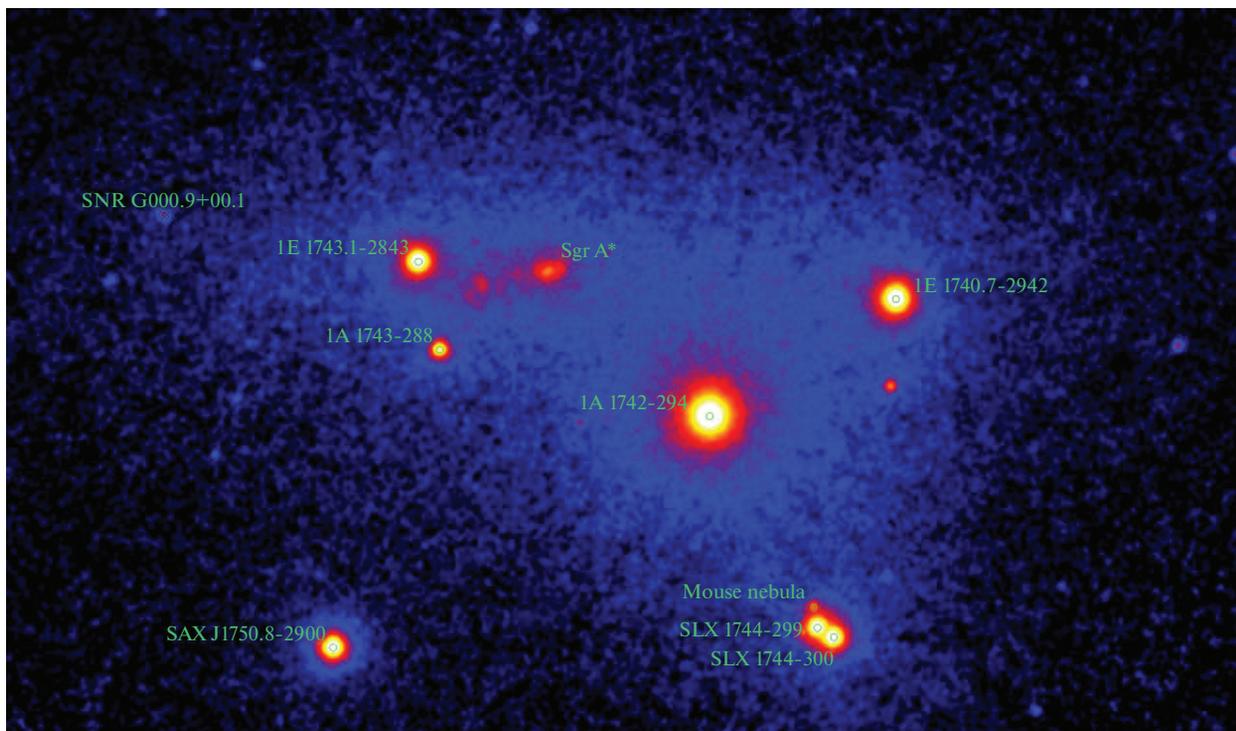


Рис. 23. Фрагмент ($\sim 3^\circ \times 2^\circ$) изображения центральной области Галактики, полученного телескопом ART-XC в энергетическом диапазоне 4–12 кэВ во время фазы CalPV.

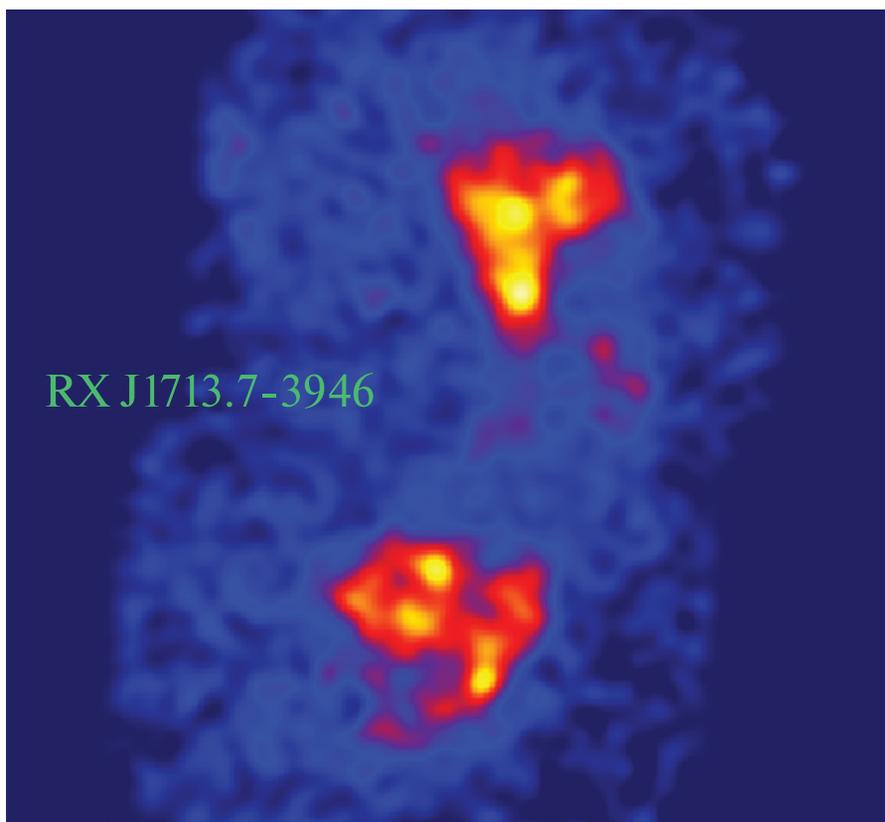


Рис. 24. Изображение (размером около 40 угл. мин вдоль каждой стороны) остатка сверхновой RX J1713.7-3946, полученное с помощью телескопа ART-XC в диапазоне энергий 4–12 кэВ во время фазы CalPV.

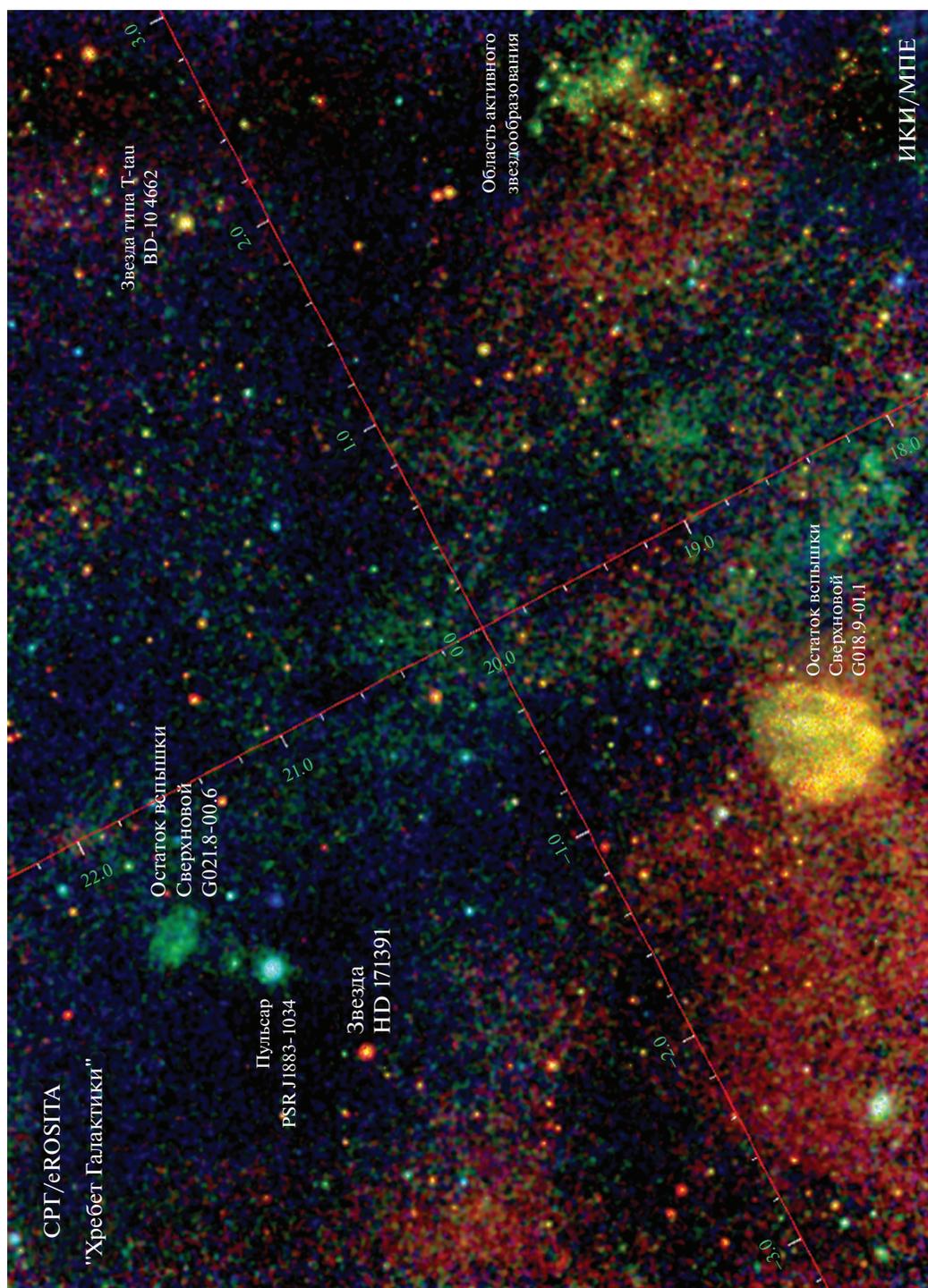


Рис. 25. Аннотированная рентгеновая RGB-карта области площадью 25 кв. град в диске Млечного Пути (так называемый хребет Галактики), полученная телескопом eROSITA в октябре 2019 г. В этой области обнаружены тысячи галактических источников рентгеновского излучения, а также ряд квазаров, наблюдаемых сквозь галактический диск. Кроме множества отдельных источников на карте видно неразрешенное рентгеновское излучение, связанное с горячим газом и большим количеством слабых неразрешенных источников. Синий и зеленый цвета соответствуют фотонам высоких энергий, испускаемых газом с температурой в десятки миллионов градусов, в то время как области красного цвета показывают более холодный газ. Поглощение в холодном межзвездном газе вблизи плоскости Галактики ослабляет мягкое рентгеновское излучение, при этом жесткие рентгеновские фотоны проходят сквозь из-за их меньшего сечения поглощения. Значительный вклад в кажущееся диффузным излучение от диска и балджа Галактики вносит совокупное излучение многочисленных аккрецирующих белых карликов, маломассивных звезд с горячими коронами и вспышек на них (Ревнивцев и др., 2009). Телескоп eROSITA не может разрешить это излучение на отдельные источники из-за их большого количества и низкой светимости.

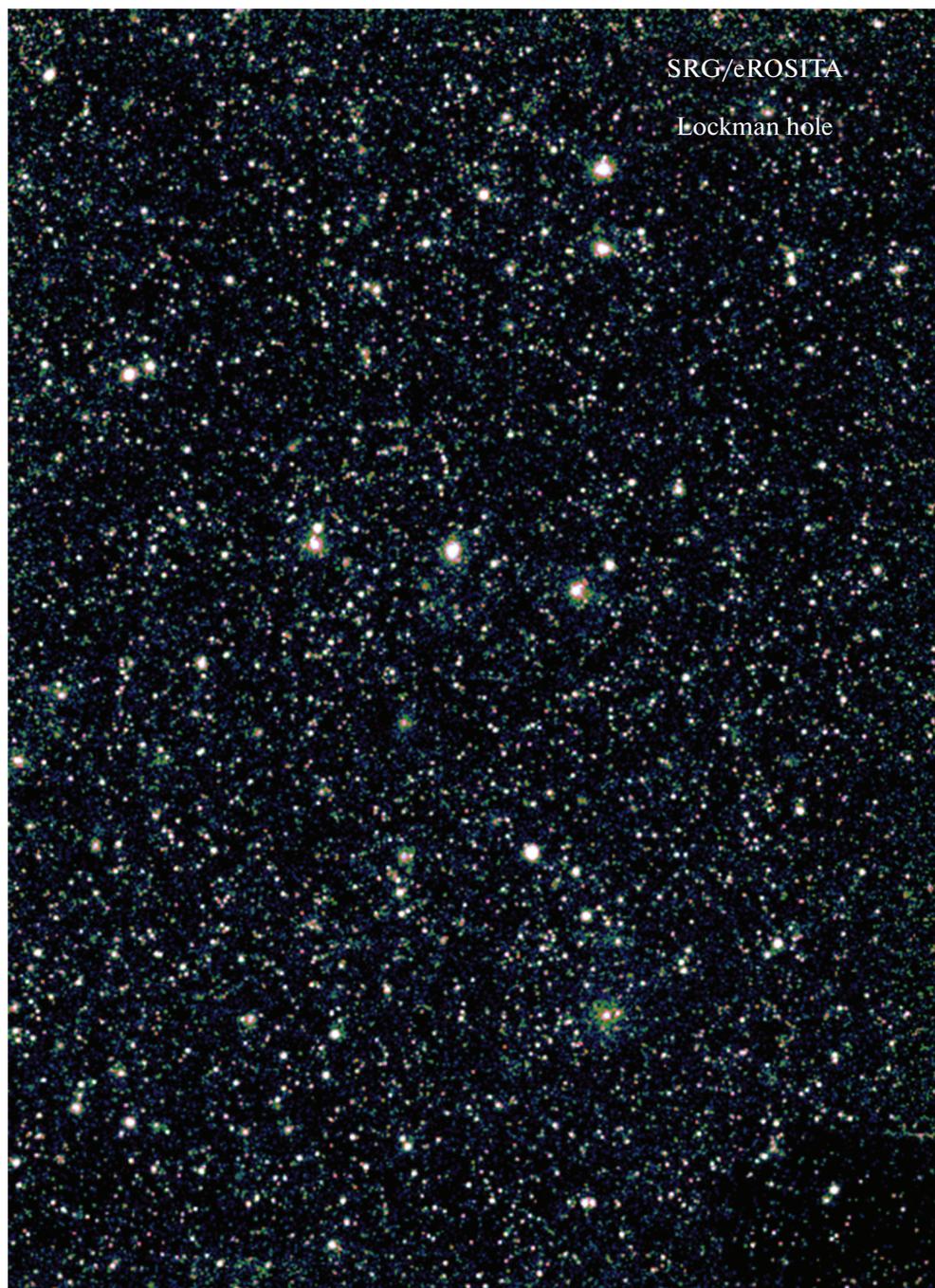


Рис. 26. Рентгеновское изображение области дыры Локмана, полученное телескопом eROSITA: более 8500 источников рентгеновского излучения на 18 кв. град.

были проведены глубокие обзоры ряда протяженных полей на небе, в частности большой (около 40 кв. град) области в центре нашей Галактики. На рис. 23 показан фрагмент изображения, полученного в энергетическом диапазоне 4–12 кэВ, который демонстрирует высокое качество и богатство данных.

Все летные характеристики ART-XC оказались близкими к ожидаемым (подробнее см. в п. 6.4). В частности, функция размытия точки, усредненная по полю зрения, оказалась лучше 1 угл. мин (диаметр сбора половины мощности) в режиме обзора. Хорошее угловое разрешение телескопа видно из изображения (рис. 24) остатка сверхновой RX J1713.7–3946, который удалось четко разрешить с помощью ART-XC.

4.2.2. Хребет Галактики. Рисунок 25 демонстрирует большое разнообразие астрофизических объектов нашей Галактики, которые можно наблюдать с помощью обсерватории СРГ. Во время сканирования хребта Галактики (в поле в ~ 20 градусах от центра Галактики) телескоп eROSITA обнаружил звезды с активными коронами, испускающими рентгеновские лучи, области звездообразования и скопления молодых звезд, рентгеновские пульсары (быстро вращающиеся замагниченные нейтронные звезды) и остатки сверхновых. В последнем случае рентгеновские фотоны испускаются газом, сжатым ударными волнами, когда материал взорвавшейся звезды сталкивается с окружающей межзвездной материей. Как хорошо известно, горячий газ занимает 80–90% объема вблизи плоскости Галактики, и только 10–20% объема заполнено плотными облаками холодного молекулярного и атомарного водорода.

4.2.3. Дыра Локмана. Рисунок 26 демонстрирует богатство внегалактического рентгеновского неба, наблюдавшегося во время длительного сканирования (около 8 кс на пиксель) зоны Дыры Локмана. В этой уникальной области поглощение рентгеновских лучей межзвездной средой Галактики близко к минимальному на всем небе. Это позволяет изучать удаленные квазары и скопления галактик с беспрецедентной детализацией. В поле площадью около 20 кв. град eROSITA обнаружил более 8500 точечных источников рентгеновского излучения, т.е. примерно 400 источников на квадратный градус. Это число соответствует 16 миллионам объектов при экстраполяции на все небо. Подавляющее большинство этих источников являются АЯГ. Согласно фотометрическим оценкам красного смещения, самый далекий из квазаров, обнаруженных телескопом eROSITA в Дыре Локмана, расположен на $z \approx 5$. Было обнаружено около 200 скоплений и богатых групп галактик, заполненных горячим газом. Кроме того, в поле

Дыры Локмана видно несколько сотен активных звезд Галактики.

4.2.4. Скопление Волос Вероники. Одной из основных целей фазы проверок характеристик телескопов было исследование скопления Волос Вероники (рис. 27). Наблюдения СРГ в режиме сканирования особенно хорошо подходят для детального картирования этого массивного и близкого скопления далеко за пределами его вириального радиуса. Полученные данные ART-XC позволяют измерить температуру горячего газа и оценить вклад космических лучей в наблюдаемое рентгеновское излучение, в то время как изображения eROSITA предоставляют подробную информацию о слиянии скопления Волос Вероники со своим менее массивным спутником — группой галактик NGC4839. На рис. 27 видна богатая подструктура, которая возникла в результате слияния, включая ударные волны и контактные разрывы, простирающиеся на несколько Мпк. Данные обсерватории Планка (распределение яркости в микроволновом диапазоне из-за эффекта Сюняева–Зельдовича) дают дополнительную информацию о распределении давления в пространстве между галактиками (консорциум обсерватории Планка, 2013). Сравнение данных с трех телескопов рисует подробную картину распределения горячего газа и темной материи в скоплении и его окрестностях.

Важно отметить, что в поле скопления Волос Вероники телескоп eROSITA открыл многие десятки массивных скоплений галактик и тысячи квазаров, расположенных на космологических расстояниях далеко позади скопления Волос Вероники. Это стало результатом проведенного глубокого сканирования поля размером $3^\circ \times 3^\circ$.

4.3. Каталог источников

Каталоги источников поддерживаются российским и германским консорциумами для соответствующих полушарий неба. Предварительный вариант распределения $\log N - \log S$ компактных источников во внегалактической части российской половины неба показан на рис. 28.

4.4. Рентгеновская спектроскопия

Во время фазы проверок характеристик телескопов с помощью ART-XC были проведены длительные наблюдения в режиме трехосной стабилизации за рядом ярких рентгеновских источников, включая хорошо известный близкий АЯГ в галактике Циркуль. На полученном спектре (рис. 29) видны сложный континуум в энергетическом диапазоне 4–20 кэВ и мощная линия излучения Fe-K α . Достигнуто энергетическое

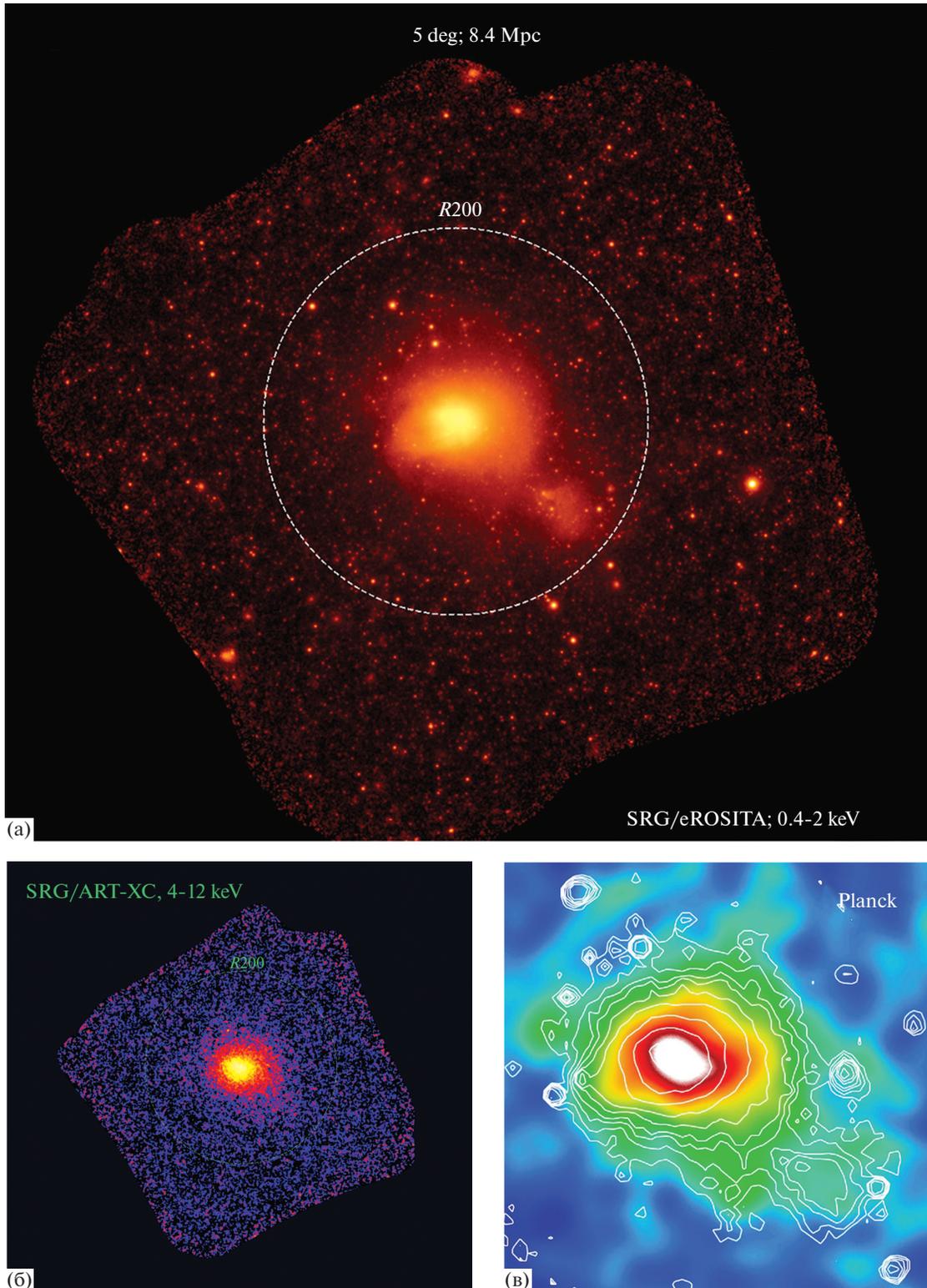


Рис. 27. (а) — Рентгеновское изображение скопления Волос Вероники (Чуразов и др., 2021) в диапазоне 0.4–2 кэВ, полученное телескопом eROSITA в ходе программы CalPV. Размер изображения составляет около 6 градусов вдоль каждой стороны, что соответствует 10 Мпк на расстоянии скопления. Использован логарифмический цветовой код, который охватывает пять порядков величины. Основное скопление находится в процессе слияния с группой NGC 4839 (яркий сгусток справа внизу от скопления Волос Вероники). (б) — Изображение скопления Волос Вероники, полученное телескопом ART-XC в энергетическом диапазоне 4–12 кэВ. (в) — Карта y -параметра скопления Волос Вероники, полученная спутником Планк на основе данных в микроволновом спектральном диапазоне. Морфология этой карты, которая отражает распределение давления горячего электронного газа, проявляющего себя вследствие эффекта Сюняева–Зельдовича, поразительно похожа на изображение в рентгеновском диапазоне, полученное телескопом eROSITA (рис. 27а).

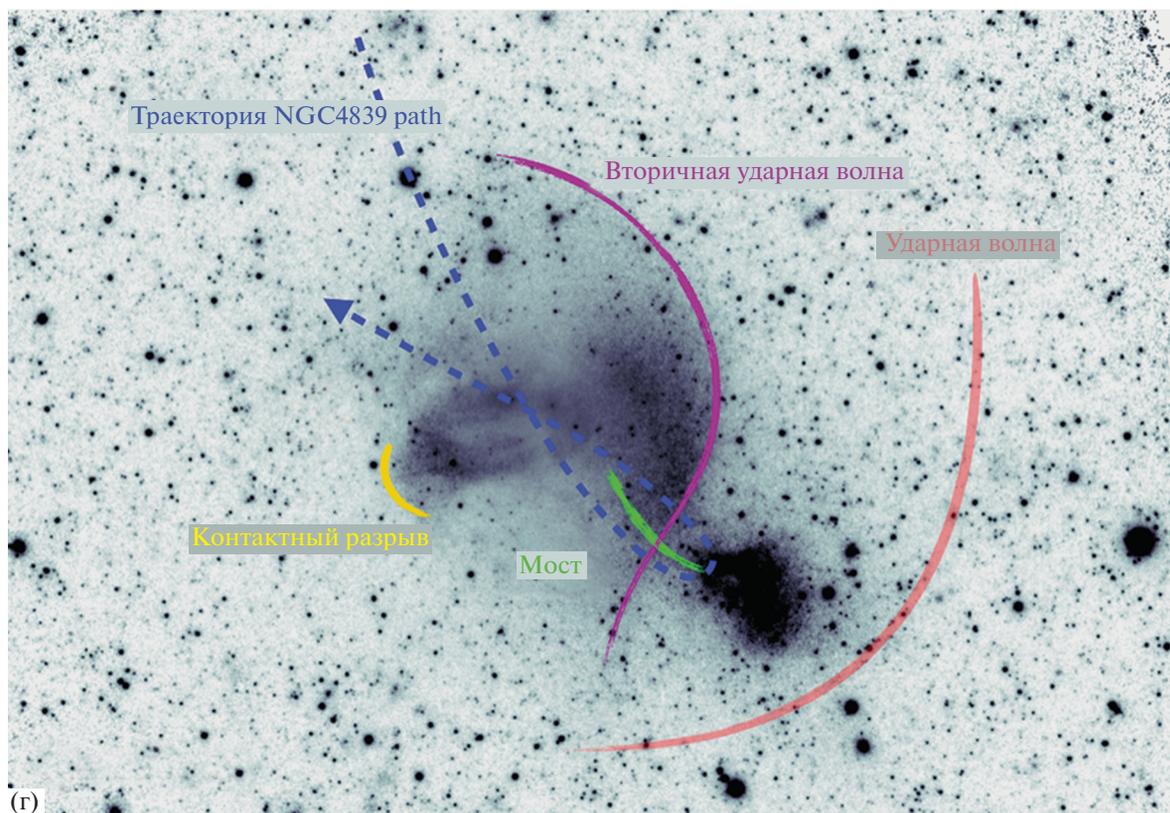


Рис. 27. (г) — Сглаженное рентгеновское изображение поля скопления Волос Вероники. Схематически обозначены некоторые особенности, предположительно связанные со слиянием с группой NGC 4839. Синей пунктирной линией показана предполагаемая траектория группы, которая входит в скопление Волос Вероники с северо-восточного направления и в настоящее время находится близко к апоцентру. Предполагаемые положения двух ударных волн, вызванных группой NGC 4839, показаны красной и фиолетовой кривыми. Ударная волна ближе к центру вызвана вытесненным газом, который возвращается к гидростатическому равновесию. Это самая заметная особенность видна на изображении как граница поверхностной яркости. Зеленой линией показан слабый рентгеновский “мост”, соединяющий NGC 4839 и основное скопление, — возможный след прохождения группы через скопление Волос Вероники. Желтая линия показывает контактный разрыв — границу раздела между областями холодного и горячего газа с одинаковым давлением. Это аэродинамика с характерным временем в 1 млрд лет. Подробнее см. Чуразов и др. (2021).

разрешение около 1.3 кэВ на энергии 6 кэВ, что соответствует предполетным оценкам.

Превосходные возможности телескопа eROSITA по спектроскопии горячей астрофизической плазмы (с температурой в миллионы градусов) в ярких рентгеновских источниках во время обзора всего неба ясно проявились в спектре остатка сверхновой Петли Лебеда (рис. 30), который был получен на основе короткой экспозиции 200 с. Отчетливо видны линии рентгеновского излучения ряда ионов разных химических элементов.

Спектроскопические возможности телескопа eROSITA в диапазоне 3–9 кэВ проиллюстрированы на рис. 31, где показан спектр галактического микроквара SS 433, полученный на этапе проверки научных характеристик СРГ/eROSITA. Четко разрешены линии излучения сильно ионизованных атомов (кремния, серы, железа и ни-

келя), возникающие в приближающемся (голубое смещение) и удаляющемся (красное смещение) барионных многотемпературных джетах. Положения линий полностью соответствуют ожиданиям, основанным на модели кинематической прецессии со скоростью струй, равной четверти скорости света.

4.5. Рентгеновский тайминг

Телескоп ART-XC обладает превосходным временным разрешением в 23 мкс, которое определяется разрешением временных меток, устанавливаемых считывающей электроникой на зарегистрированные события. Это позволяет в режиме наведения детально изучать поведение миллисекундных пульсаров. Временные характеристики телескопа были проверены при наблюдении пульсара в Крабовидной туманности. На рис. 32 показана кривая

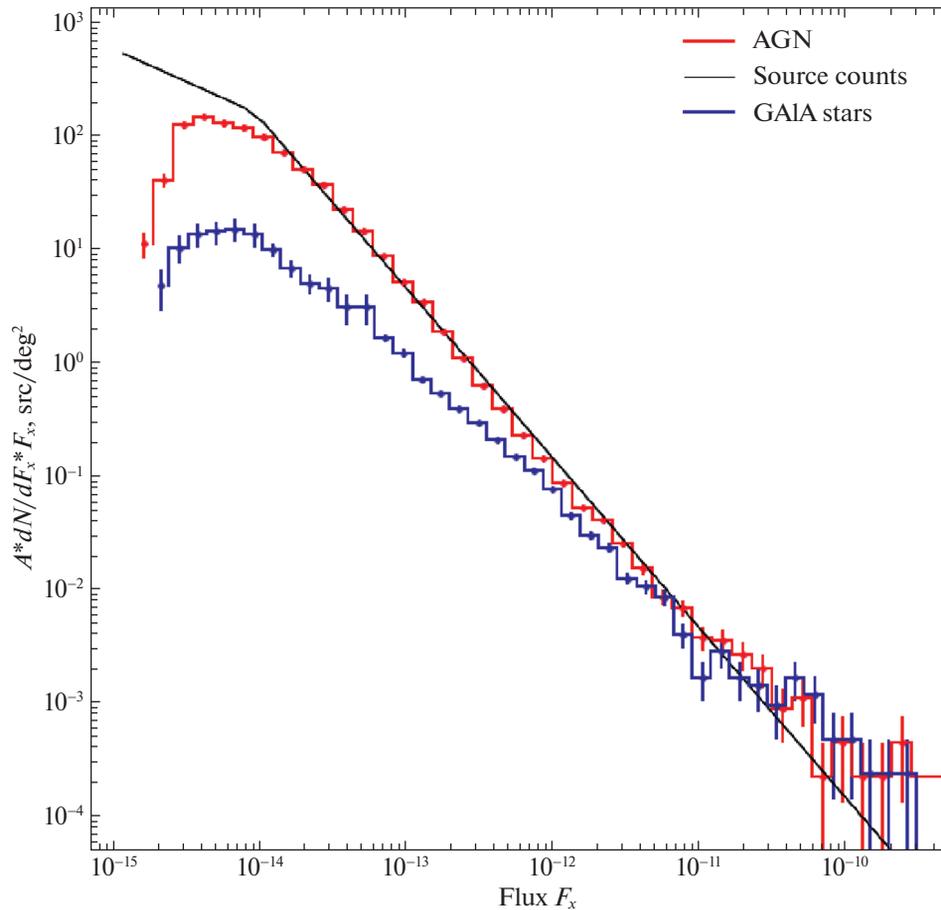


Рис. 28. Предварительное распределение $\log N - \log S$ компактных источников во внегалактической части полусферы, в которой российский консорциум ученых отвечает за анализ и интерпретацию данных. Распределение источников, у которых есть оптические партнеры — звезды из каталога Gaia, показано синей гистограммой (“GAIA stars”), а распределение остальных — красной гистограммой (“AGN”, т.е. АЯГ). Распределения получены на основе неполных данных первых двух обзоров неба и не используют весь потенциал данных за первый год. Коррекция на неполноту в области малых потоков не делалась. Коэффициент A по оси y включает в себя приближения и неточности предварительного анализа. Он достаточно близок к единице и может слабо зависеть от потока, причем по-разному для звезд Gaia и АЯГ.

блеска этого пульсара в нескольких энергетических диапазонах, измеренная с помощью ART-XC и свернутая с радио эфемеридами обсерватории Джодрелл–Бэнк. Пульсации с периодом около 33 мс четко регистрируются вплоть до 30 кэВ, а энергетическая зависимость морфологии импульса соответствует ожидаемой.

Номинальное время интегрирования ПЗС-матриц телескопа eROSITA составляет 50 мс. Это время определяется требованием избегать размывания рентгеновских изображений во время обзора всего неба. При номинальной скорости вращения (360 градусов за 4 ч) источники в поле зрения телескопа смещаются на 3.5 угл. сек за 50 мс, что в 3 раза меньше размера пикселя ПЗС-матрицы. Хотя такое время интегрирования не

позволяет систематически изучать переменность на миллисекундных масштабах, стабильность фона и характеристик телескопа дает отличную возможность для наблюдения за объектами на больших временных масштабах в трех важных интервалах: 0.05–40 с (для источников, пересекающих поле зрения в течение одного сканирования), от 4 ч до 1 дня (в течение шести сканирований одного и того же объекта за день) и от 6 мес до 4 лет (в течение всего обзора неба, проводимого обсерваторией СРГ). Кроме того, переменность источников, расположенных вблизи пересечений отдельных сканирований около полюсов эклиптики, можно отслеживать почти непрерывно на масштабах более 4 ч.

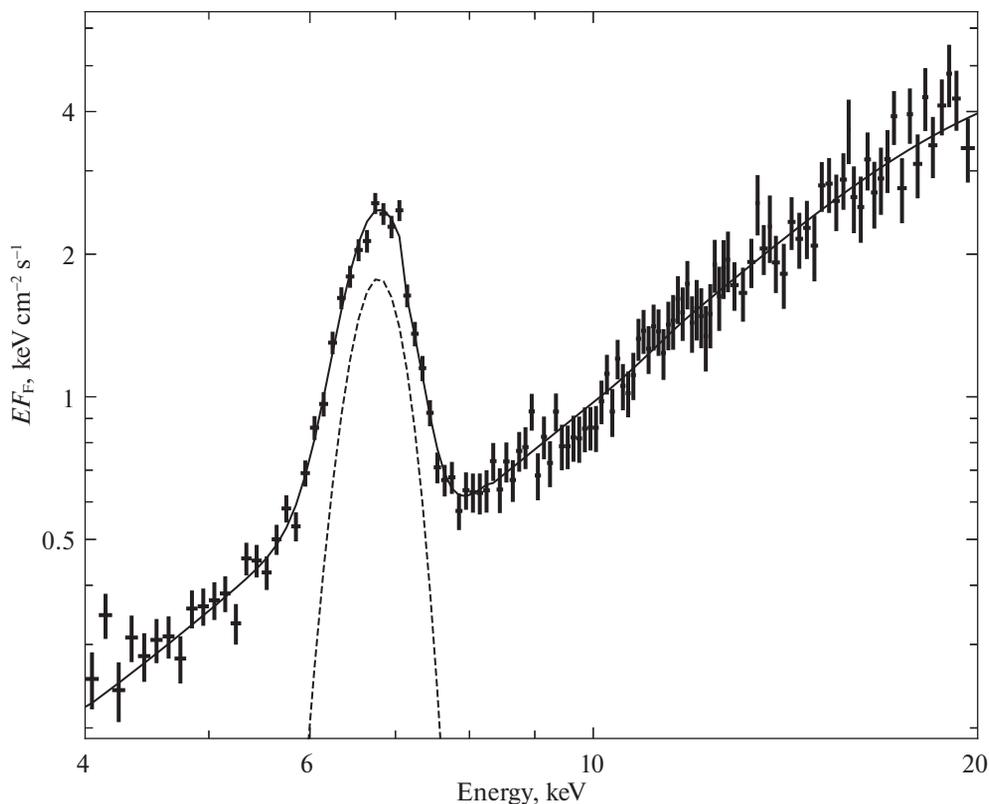


Рис. 29. Рентгеновский спектр галактики Циркуль, измеренный с помощью телескопа ART-XC. Линия Fe–Ka выделяется на фоне сложного континуума. Экспозиция составила около 50 кс, единицы измерения потока произвольны.

4.6. Галактические транзиенты по данным ART-XC

При ежедневном сканировании (экспозиция около 60 с на источник) телескоп ART-XC достигает чувствительности (5σ) $\sim 8 \times 10^{-12}$ эрг cm^{-2} s^{-1} в диапазоне энергий 4–12 кэВ (~ 0.6 мКраб). Ежедневно исследуя около 1% неба, ART-XC обеспечивает быстрое оповещение о новых источниках рентгеновского излучения (см., например, Мереминский и др., 2020б,в; Швоппе и др., 2020) или новых вспышках известных или плохо изученных источников (см., например, Мереминский и др., 2020а,г). Такие события, как правило, обнаруживаются также телескопом eROSITA, что позволяет уточнить положение источника на небе и получить подробную спектральную информацию на энергиях ниже ~ 2 –8 кэВ для проведения широкополосного спектрального анализа.

Телескоп ART-XC предоставляет уникальную возможность изучения популяции слабых транзиентов, которые иначе могли бы остаться незамеченными из-за того, что являются слишком слабыми для телескопов с широким углом обзора и мониторов всего неба (таких как INTEGRAL/IBIS, Swift/BAT и MAXI). Относительно жесткий рентгеновский диапазон телескопа

ART-XC также делает его менее зависимым от внутреннего поглощения в источнике или поглощения в Галактике и позволяет обнаруживать сильно поглощенные источники, которые могут быть пропущены мягкими рентгеновскими инструментами. Например, транзиенты, зарегистрированные ART-XC, часто оказываются малозаметными в данных eROSITA. Программы наблюдений по отождествлению таких транзиентов уже позволили установить природу нескольких источников ART-XC, таких как новый микроквазар SRGA J043520.9+552226/at2019wey (Яо и др. 2021а,б; Мереминский и др. 2021), новоподобная катаклизмическая переменная SRGt J062340.2-265715 (Швоппе и др., 2021), несколько новых Be-систем (Дорошенко и др., 2021; Лутовинов и др., 2021) и ряд других.

4.7. Внегалактические транзиенты и звездные вспышки

Стратегия повторяющихся обзоров неба, когда любое положение на небе наблюдается каждые 6 мес, оказалась эффективной для изучения долгосрочной переменности источников и обнаружения галактических и внегалактических транзиентов

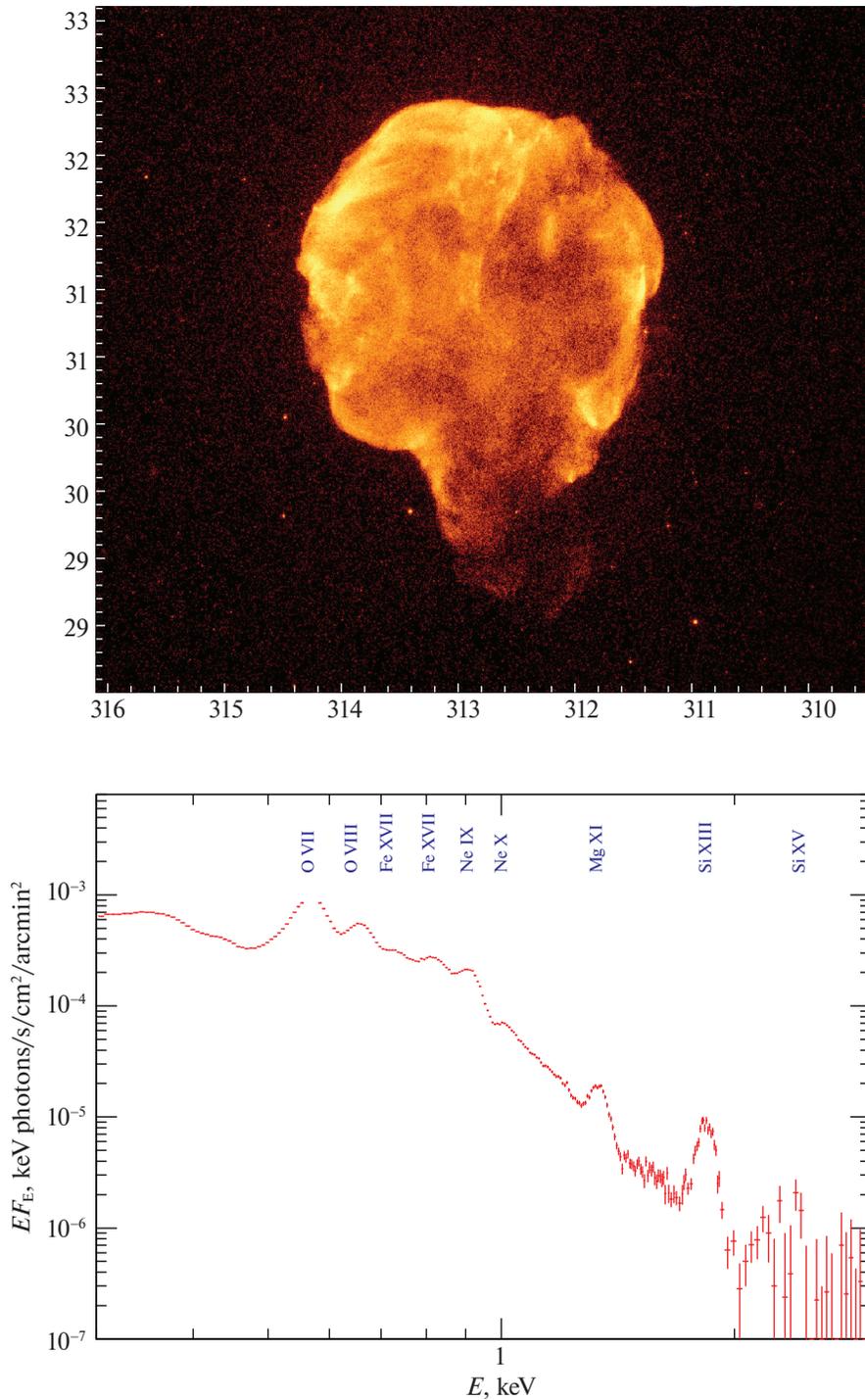


Рис. 30. Верхняя панель: рентгеновское изображение остатка сверхновой Петли Лебеда в диапазоне энергий 0.4–2 кэВ, полученное телескопом eROSITA во время первых двух обзоров всего неба СРГ. Максимальное время экспозиции (на точку) по изображению составляет около 400 с, оси обозначены в градусах. Нижняя панель: Рентгеновский спектр всей Петли Лебеда. Указаны ионы, вносящие вклад в некоторые из самых ярких линий излучения. Спектр нормирован на квадратную минуту дуги.

разных типов. Каждые 24 ч eROSITA обнаруживает от полудюжины до дюжины источников, которые изменили свою светимость более чем на порядок

по сравнению с предыдущим наблюдением шестью месяцами ранее (Гильфанов и др., 2020; Сазонов и др., 2020). Около половины этих источников связа-

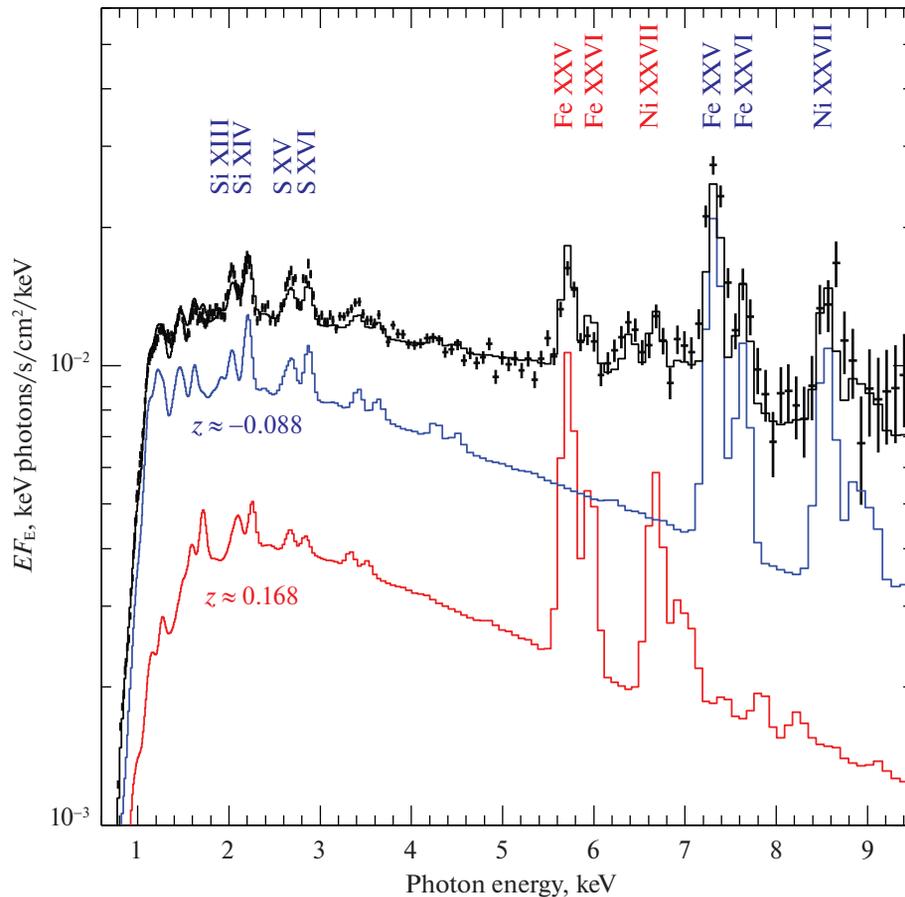


Рис. 31. Спектр галактического микроквазара SS 433, полученный на этапе проверки характеристик СРГ/eROSITA. Данные хорошо согласуются с моделью барионных высокотемпературных джетов (Хабибуллин и др., 2016): вклады приближающегося (с синим смещением) и удаляющегося (с красным смещением) джетов показаны синим и красным соответственно. Отмечены положения линий водородо- и гелиеподобных кремния, серы, железа и никеля.

ны со звездами Gaia, а другая половина предположительно имеет внегалактическое происхождение. Требование по меньшей мере 10-кратного увеличения потока соответствует эффективному порогу обнаружения транзиентов $\sim 2 \times 10^{-13}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Поскольку каждое сканирование проходит через полюса эклиптики, источники в этих областях сканируются каждые 4 ч. Для этих источников уже накоплены кривые блеска, охватывающие более 16 мес, что открывает уникальные перспективы для детального исследования переменности звезд и АЯГ на масштабах от нескольких часов до нескольких лет. Предполагается, что сканирование неба будет продолжаться в том же режиме по меньшей мере до конца третьего обзора неба.

Ведется активный поиск событий приливного разрушения звезд (СПР) среди внегалактических транзиентов eROSITA на основе оптических и инфракрасных свойств их источников и формы их рентгеновских спектров (рис. 33). Российский

консорциум выявляет относительно яркие кандидаты в СПР примерно раз в неделю (Хабибуллин и др., 2020а,б; Гильфанов и др., 2020, 2021). Для них проводится оптическая спектроскопия на ряде телескопов в России (6-метровый телескоп БТА на Кавказе, 1.5-м Российско-турецкий телескоп РТТ-150 в Турции, 1.6-м телескоп АЗТ-33ИК Саянской обсерватории, 2.5-м телескоп Кавказской горной обсерватории Астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова). Активное сотрудничество с Установкой по поиску транзиентов им. Цвикки (ZTF) позволяет оперативно классифицировать обнаруженные транзиенты и проводить их оптические наблюдения на телескопах Паломарской обсерватории и обсерватории Кека. В период с 10 июня по 14 декабря 2020 г., охватываемый вторым обзором всего неба СРГ/eROSITA, были обнаружены и оптически подтверждены в полушарии $0 < l < 180^\circ$ 16 СПР (Сазонов и др., 2021). Первые СПР были зарегистри-

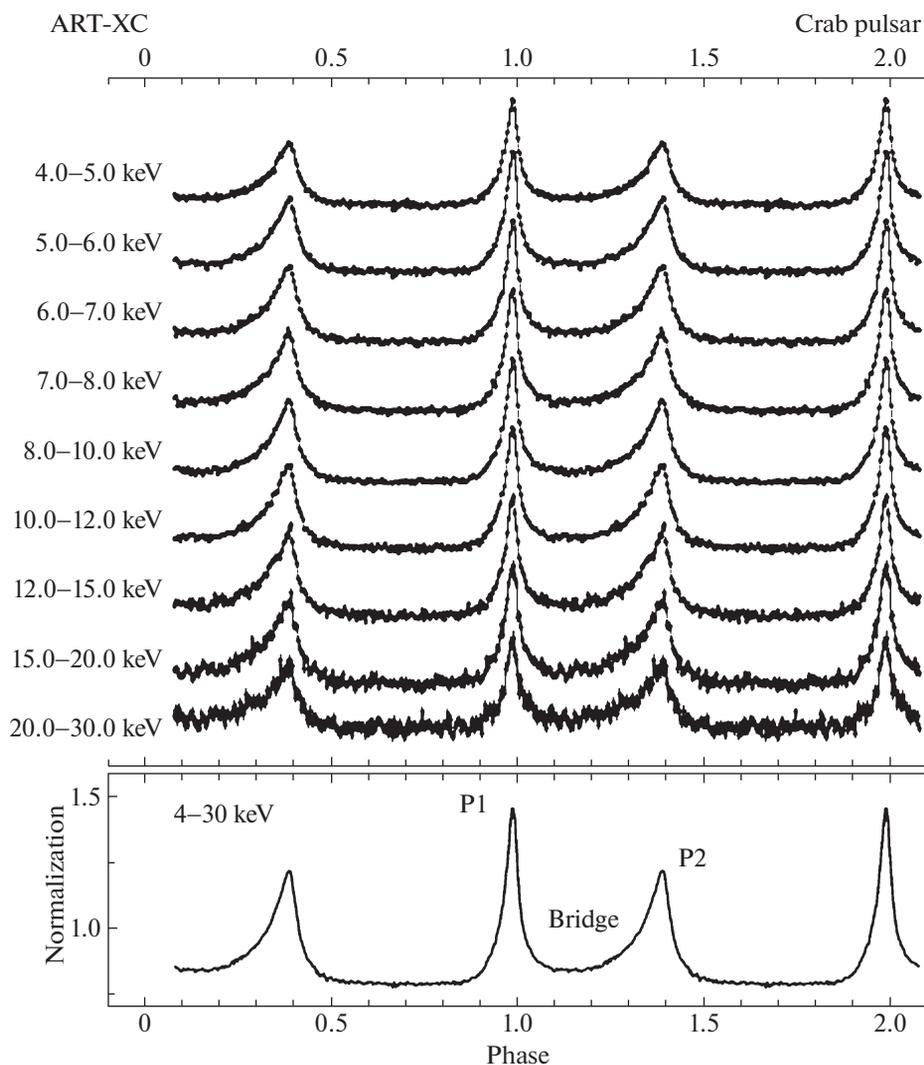


Рис. 32. Фазовые профили импульса пульсара в Крабовидной туманности, восстановленные в нескольких энергетических диапазонах. Время экспозиции ART-XC составило около 45 кс.

стрированы с помощью телескопа eROSITA и на другой половине неба (Лю и др., 2021).

Благодаря стратегии сканирования СРГ есть возможность обнаруживать более быстрые транзиенты, которые меняют яркость на масштабе ~ 1 день, в частности, рентгеновские послесвечения гамма-всплесков, причем даже без регистрации в гамма-диапазоне (Хабибуллин и др., 2012). Ведется регулярный поиск таких событий (см., например, Вилмс и др., 2020).

5. КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ СРГ

Проектирование конструкции и систем космического аппарата СРГ продолжалось до 2008 г., когда была определена и принята окончательная концепция проекта (см. ниже раздел 8 об истории проекта СРГ).

5.1. Платформа “Навигатор” для СРГ

Космический аппарат (рис. 2, 3, 8) основан на служебной платформе “Навигатор”, которая была разработана НПО Лавочкина для применения в составе космических аппаратов метеорологического и научного назначения. Ко времени принятия решения по проекту СРГ уже были изготовлены и прошли тестирование летные варианты платформы “Навигатор” в составе спутников “Радиоастрон” и “Электро-Л” № 1 (рис. 34). В 2011 г. начались летные испытания платформы. Это дало возможность накопить бесценный опыт ее эксплуатации, который был учтен при создании СРГ. Были проведены модификации, направленные на повышение надежности миссии в целом и достижение требуемых технических параметров космического аппарата.

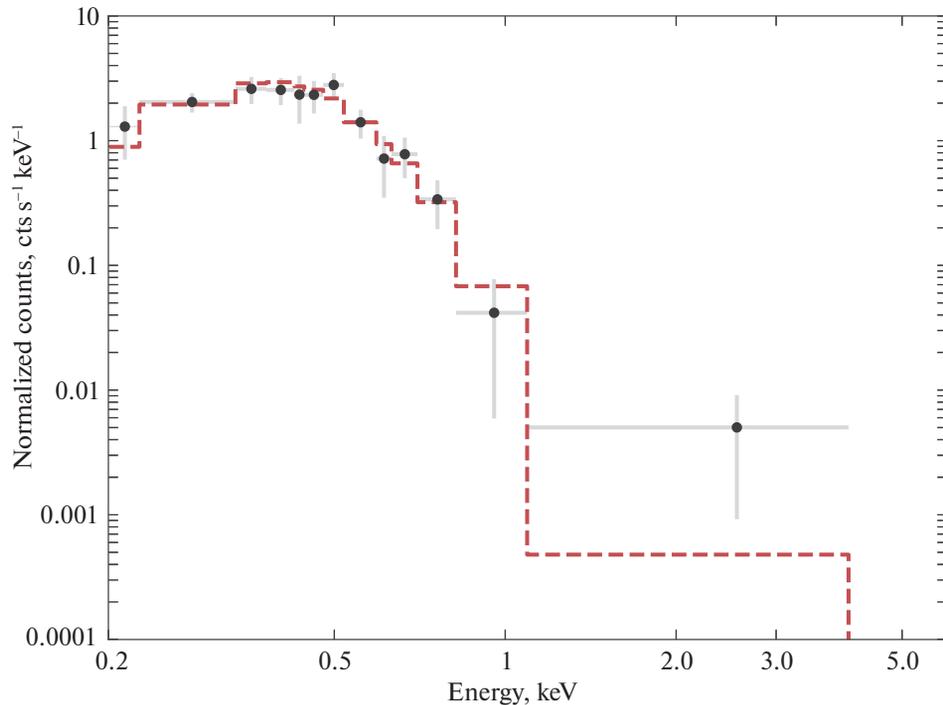


Рис. 33. Спектр события приливного разрушения звезды SRGe J213527.3-181634/ZTF20abgbdpr, полученный телескопом eROSITA. Пунктирной линией показана наилучшая модель излучения многоцветного аккрецирующего диска с температурой внутреннего диска ~ 100 эВ (Гильфанов и др., 2020).

Принципиальным изменением платформы “Навигатор” была установка нового радиокомплекса X-диапазона, вызванная необходимостью поддержания связи с космическим аппаратом на больших расстояниях.

Платформа “Навигатор”-СРГ включает в себя следующие компоненты: бортовой комплекс управления, бортовой радиокомплекс, солнечные панели с механизмом поворота, двигательная установка, система терморегулирования, телеметрическая система, антенно-фидерная система, кабельная сеть, конструкция, система электропитания, вспомогательные дополнительные узлы и элементы.

Бортовой комплекс управления выполняет следующие основные задачи: управление научной аппаратурой и служебными системами космического аппарата, управление движением космического аппарата вокруг центра масс и самого центра масс, управление ориентацией космического аппарата для выбора соответствующей всенаправленной антенны для связи с наземными станциями, контроль технического состояния и диагностика бортовых систем с последующей передачей информации на Землю через бортовой радиокомплекс, контроль нештатных ситуаций и выполнение автоматического перехода космического аппарата в дежурное состояние в нештатных случаях, когда они не могут

быть разрешены бортовыми системами самостоятельно.

Бортовой комплекс управления включает в себя следующие составляющие: бортовой компьютер, блоки силовой автоматики, гироскопический датчик угловой скорости, два солнечных датчика СДП-1, два устройства солнечной ориентации ПОС 347К, два звездных датчика SED26, четыре комплекта маховиков “Агат-15М”.

Главными исполнительными элементами системы ориентации являются маховики, три из которых активны и один находится в холодном резерве. Набор из трех маховиков обеспечивает угловую скорость вплоть до 0.07 град/с. Для разгрузки маховиков (сброса накопленного момента) используются 16 двигателей стабилизации (два комплекта по 8 двигателей — активный и резервный) с тягой 0.5 Н каждый. Эти двигатели используются также на начальном участке полета для обеспечения ориентации на Солнце и при нештатных ситуациях.

Кроме двигателей стабилизации система включает в себя 8 двигателей с тягой по 5 Н каждый (4 активных и 4 в резерве), предназначенных для коррекции траектории движения центра масс (орбиты аппарата). Все двигатели используют в качестве рабочего тела гидразин, размещаемый в двух баках по 180 кг в каждом.

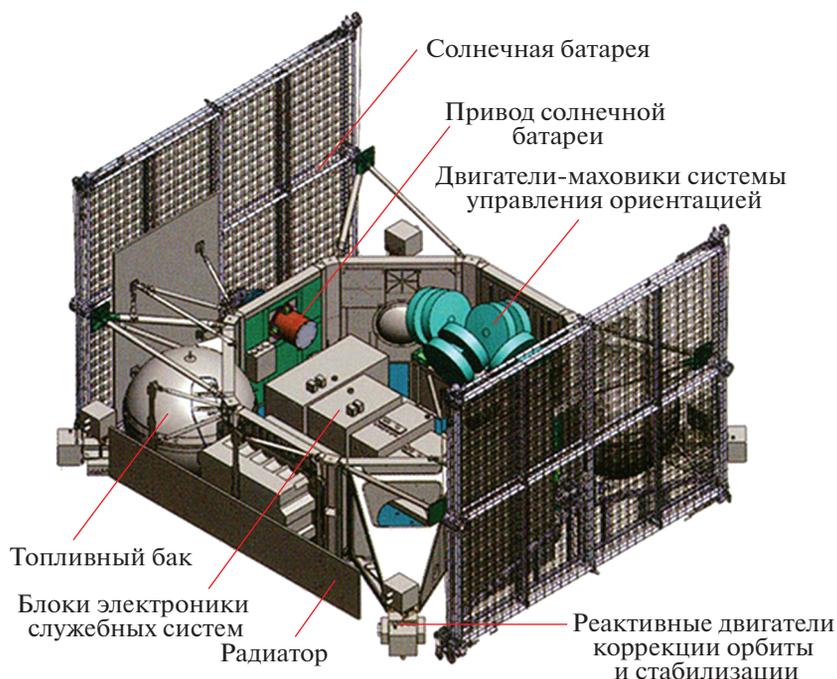


Рис. 34. Платформа “Навигатор” (НПО Лавочкина, см. также <http://www.russianspaceweb.com/navigator.html>, А. Зак).

Бортовое электропитание для служебных систем и научных приборов обеспечивается солнечными батареями. Суммарная потребляемая мощность всех бортовых систем не превышает 1700 Вт, что меньше доступной мощности солнечных панелей к концу срока их эксплуатации (1870 Вт). Система электропитания включает в себя химическую батарею на 55 А ч, которая обеспечивает питание для бортовых систем на начальной фазе полета после отделения космического аппарата от ракеты-носителя и в случае нештатных ситуаций.

Тепловой режим космического аппарата поддерживается осевыми и периферийными тепловыми трубами, а также электрическими нагревателями, управляемыми бортовой системой обеспечения теплового режима. Кроме того, оба телескопа имеют свои собственные системы терморегулирования.

Телескопы eROSITA и ART-XC расположены на геометрически устойчивом основании, смонтированном на общей платформе на модуле космического аппарата. Часть электронных блоков ART-XC и гироскопический измеритель величины угловой скорости бортового комплекса управления размещены на термостабилизированной платформе.

5.2. Режимы ориентации и управления обсерваторией

За исключением начальной фазы полета бортовой комплекс управления функционирует в режиме инерциальной системы ориентации, которая обеспечивает трехосную стабилизацию и вращение космического аппарата в запрограммированной ориентации относительно инерциальной системы отсчета. Данные ориентации от звездных датчиков постоянно комплексуются с данными гироскопических датчиков, в результате чего определяется кватернион ориентации.

В режиме инерциальной ориентации могут выполняться следующие операции: переориентация космического аппарата для наведения телескопов (ось $+X$ СРГ) на выбранную цель на небесной сфере и трехосная стабилизация по отношению к инерциальной системе; вращение космического аппарата с постоянной угловой скоростью (обычно 0.025 град/с) относительно оси $+Z$ СРГ с постоянным вращением оси вращения с небольшой угловой скоростью (~ 1 град/сут) для обеспечения плавного обзора всего неба; трехосная стабилизация во время сообщения аппарату импульсов скорости для коррекции траектории.

Несколько последовательных поворотов космического аппарата могут быть объединены в серию сканирования областей на небесной сфере по запланированным маршрутам. В этом режиме

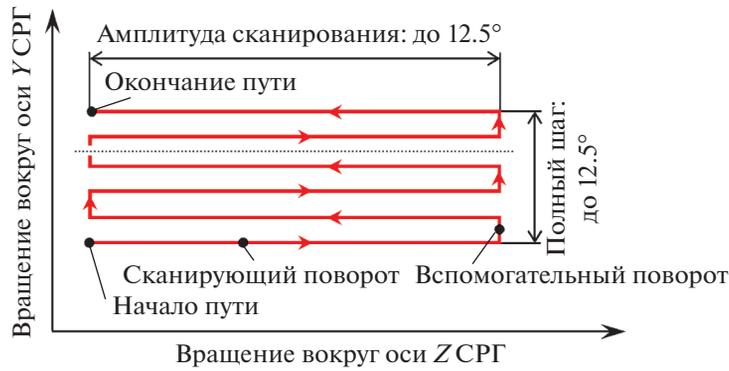


Рис. 35. Типичный маршрут оси X в режиме сканирования.

бортовой комплекс управления наводит ось X СРГ в требуемую начальную точку поля сканирования (относительно инерциальной системы отсчета) и выполняет программу относительных поворотов вокруг осей Y и Z космического аппарата. В течение этих поворотов работающие согласованно звездные датчики и гироскопические устройства (датчики угловых скоростей) обеспечивают непрерывное точное следование по заданному маршруту относительно инерциальной системы. Размеры поля сканирования могут достигать $12.5^\circ \times 12.5^\circ$. Типичная процедура сканирования состоит из нескольких S-образных последовательностей поворотов (рис. 35) с основными поворотами вокруг оси Z и меньшими вспомогательными поворотами (шагами) вокруг оси Y . Шаг вращения может быть произвольно малым и обычно выбирается в пределах от 4 до 12 угл. мин. Максимальная угловая скорость сканирующих поворотов может достигать 0.04 град/с. В течение полета подтверждено, что ошибка управления ориентацией составляет менее 10 угл. сек, а ошибка стабилизации угловой скорости не превышает 0.72 угл. сек/с.

Рисунок 36 иллюстрирует основные ограничения по наведению и сканированию наблюдений обсерватории СРГ.

5.3. Бортовой радиокомплекс и передача данных

Бортовой радиокомплекс, помимо приема команд и выполнения траекторных измерений, также способен передавать в одном потоке научные данные и служебную телеметрию. Номинальная скорость передачи служебных телеметрических данных составляет 16 кбит/с (передача телеметрии в реальном времени) и 32 кбит/с (сброс записанной телеметрии).

Номинальная скорость передачи научных данных составляет 512 кбит/с, но она также может выполняться со скоростью 64, 128 и 256 кбит/с. Загрузка телекоманд с наземных станций осуществляется со скоростью 500 бит/с (обычно) или 125 бит/с (в чрезвычайных ситуациях). Радиокомплекс принимает телекоманды через всенаправленную антенну и передает данные через средненаправленную антенну с шириной угла $\pm 24^\circ$.

Бортовая телеметрическая система собирает данные служебных телеметрических датчиков и цифровые данные из бортового комплекса управления и записывает их во внутреннее запоминающее устройство. Во время сеанса связи можно сбросить сохраненные данные или запустить режим передачи телеметрии в реальном времени.

5.4. Запуск и выведение на рабочую орбиту

Обсерватория СРГ работает на квазипериодической орбите около точки либрации L_2 системы Солнце–Земля. Эта орбита имеет много явных преимуществ для выполнения миссии, которые связаны с удаленностью (1.5 млн км, что соответствует времени прохождения света 5 с) точки L_2 от Земли в направлении от Солнца: длительные периоды видимости с наземных станций для управления и приема научных данных, исключение периодических попаданий космического аппарата в радиационные пояса Земли.

Расположение российских наземных станций приема телеметрической информации и выдачи команд в северном полушарии привело к необходимости выбора даты старта таким образом, чтобы обеспечить максимальную длительность радиовидимости космического аппарата. Кроме того, выбор оптимальной рабочей орбиты должен был обеспечить минимальную характеристическую скорость для удержания космического аппарата около точки L_2 . Принятое решение, опирающееся

$$\alpha \in [70^\circ; 165^\circ]$$

$$\delta \in [-13^\circ; +13^\circ]$$

$\varepsilon \leq 24^\circ$ – угол между средненаправленной антенной (ось + Z СРГ) и направлением от КА к наземной станции

$\zeta > 12.5^\circ$ – угол между оптической осью звездного датчика SED-26 (ось + X СРГ) и направлением с КА на Луну

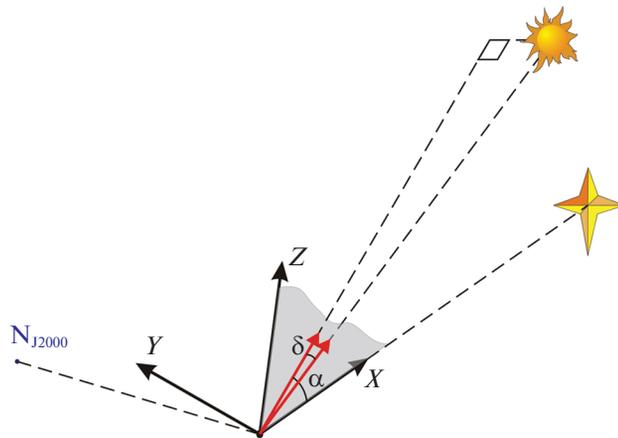


Рис. 36. Основные ограничения на ориентацию во время сканирования и точечных наблюдений.

на эти два критерия, привело к необходимости подготовки отдельных программ полета разгонного блока для каждой возможной даты старта.

В итоге, принимая во внимание располагаемое время достижения готовности отдельных составляющих космического аппарата, были выбраны два возможных окна старта: 21–22 июня 2019 г. и 12–13 июля 2019 г. Старт КА СРГ состоялся с космодрома Байконур 13 июля 2019 г. в 15 ч 30 мин 57 с московского времени.

Головной блок, включающий разгонный блок, переходный отсек и космический аппарат, был выведен ракетой-носителем Протон-М на незамкнутую орбиту с высотой апогея около 200 км. Далее первым включением двигательной установки разгонного блока головной блок был выведен на переходную орбиту с высотами перигея и апогея 168×2013 км соответственно. Следующим включением головной блок был выведен на номинальную орбиту в район около точки либрации L2 с высотами перигея и апогея 500×1450000 км. После этого космический аппарат был отделен от разгонного блока, который импульсом скорости был переведен на орбиту, исключаящую последующее столкновение с аппаратом. Процесс выведения на орбиту занял суммарно 2 ч, в течение которого головной блок находился в тени Земли 34 мин. Полет к точке L2 длился примерно 100 дней без заходов в тень Земли.

Для обеспечения достижения космическим аппаратом номинальной орбиты были запланированы три коррекции траектории на пути к точке L2: на 10-е, 20-е и 40-е сутки миссии; в качестве резервных дат были выбраны 15-е, 25-е и 45-е сутки. Для выполнения указанных маневров коррекции был предусмотрен запас характеристической скорости, равный 100 м/с. Первая коррекция была выполнена в соответствии с программой. Вторая коррекция была перенесена на резервную дату с тем, чтобы получить больший объем траекторных измерений после выполнения первой. К моменту запланированной третьей коррекции расчеты показали, что в ней нет необходимости, поэтому она не проводилась ни в один из запланированных дней (см. табл. 2).

Рабочая орбита СРГ удовлетворяет следующим ограничениям: максимальное расстояние от космического аппарата до точки L2 в плоскости эклиптики ~ 920000 км, выход из плоскости эклиптики ~ 700000 км и ~ 550000 к северному и южному полюсам эклиптики соответственно.

После выведения космического аппарата на номинальную орбиту около точки L2 (примерно 100-е сутки) коррекция орбиты выполнялась примерно каждые 50-е сутки в течение миссии (см. ниже п. 5.7).

Таблица 2. График коррекции траектории СРГ на пути к области точки L2

№	Дата и время (москowsкое)	Сутки полета	Число включений двигательной установки	Суммарная харак- теристическая скорость, м/с	Израсходованное рабочее тело, кг
1	22.07.2019 17:30:00.000	10	2	13.59	15.98
2	06.08.2019 17:30:00.000	25	2	3.49	4.09

5.5. Управление космическим аппаратом

Планирование работы обсерватории осуществляется в рамках трех временных интервалов: долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного, с повышением уровня детализации плана при переходе на следующую стадию. Долгосрочное планирование определяется научными задачами, сформулированными учеными, участвующими в проекте.

На среднесрочном уровне работа космического аппарата и наземных станций планируются на следующий календарный месяц. Примерно за две недели до реализации программы НПО Лавочкина выполняет априорный расчет траектории движения КА в течение планируемого месяца, назначает предварительные интервалы сеансов управления и при необходимости — технологических работ с КА (обычно они включают только коррекции траекторий). НПО Лавочкина передает эти данные в Наземный Научный Комплекс (ННК) в ИКИ РАН, где месячный план дополняется научными работами в соответствии с долгосрочным планом. Разработанный на этом этапе план полностью определяет последовательность и параметры режимов ориентации космического аппарата. Он проходит предварительную верификацию соблюдения ограничений по работе с космическим аппаратом и наземными станциями, как на стороне ИКИ РАН, так и на стороне НПО Лавочкина, причем основной целью является проверка ограничений по ориентации КА. В случае изменений в работе наземных станций или состояния бортовых систем, ежемесячный план может быть скорректирован даже во время его реализации. В таких случаях повторная верификация и принятие решения обычно занимают не более трех дней.

На краткосрочном уровне планируется конкретная работа наземных станция и космического аппарата в ходе предстоящего сеанса управления. Основная задача краткосрочного планирования состоит в выполнении соответствующей части месячного плана с начала очередного сеанса управления, по меньшей мере, до следующего сеанса управления. Предусмотренные месячным планом

работы конкретизируются в форме программы сеанса управления, которая представляет собой последовательность команд для наземных станций, служебных систем космического аппарата и систем телескопов. Для составления программы сеанса связи НПОЛ собирает запросы на выдачу команд от кураторов соответствующих систем. В частности, последовательность команд для обеспечения работы телескопов (с конкретными параметрами команд и временем/интервалами выдачи) генерируется в ИКИ РАН на основе запросов научных групп ART-XC и eROSITA.

Команды для космического аппарата и научных приборов могут исполняться непосредственно в момент получения во время сеанса связи или сохраняются в памяти бортового комплекса управления для выполнения в указанное время (полетное задание). НПО Лавочкина выполняет моделирование составленной программы сеанса управления на информационно-логическом стенде бортового комплекса управления, который позволяет выполнить более точную верификацию соблюдения ограничений по работе с космического аппарата, а также выявить логические ошибки планирования и некорректные команды. Моделирование выполняется на интервале от начала планируемого сеанса управления до начала следующего. Эта технология обеспечивает сквозное моделирование в течение всей миссии, повышая надежность управления.

При положительных результатах моделирования и согласии всех сторон с составленной программой сеанса в назначенное время выполняется его реализация с контролем исполнения команд по телеметрической информации. При необходимости в ходе сеанса составленная номинальная программа может быть скорректирована, в том числе, с выдачей внеплановых команд группами ART-XC и eROSITA.

Сеансы связи проводятся ежедневно. Каждый сеанс длится примерно 4–5 ч, что позволяет сбросить всю записанную за сутки научную и служебную информацию, провести траекторные измерения по крайней мере двумя наземными станциями, проверить состояние бортовых систем и научных приборов и заложить на борт полетное задание на

последующий период вплоть до нескольких дней. В ходе сеанса управления полный поток информации с КА в реальном времени через наземные станции поступает в НПОЛ и передается в ИКИ РАН.

5.6. Наземный комплекс управления

Управление полетом КА СРГ обеспечивается Наземным комплексом управления проекта “Спектр-РГ”, включающем Сектор главного конструктора НПО Лавочкина, ЦУП ЦНИИмаш, наземные станции, баллистические центры и средства связи. Центральным органом, ответственным за летные испытания и управление космическим аппаратом, является НПОЛ, который обеспечивает средства для взаимодействия специалистов, участвующих в летных испытаниях и реализации научной программы.

Радиосвязь с космическим аппаратом обеспечивается с помощью радиотехнических наземных комплексов, расположенных на Байконуре (антенна ТНА-57 диаметром 12 м), в Медвежьих Озерах (антенна ТНА-1500 диаметром 64 м) и Уссурийске (антенна П-2500 диаметром 70 м). В настоящее время для получения научных данных используются только наземные комплексы в Медвежьих Озерах и Уссурийске. Эти наземные радиотехнические комплексы были модернизированы для участия в проекте СРГ и на данный момент полностью обеспечивают потребности миссии. В периоды сокращения длительности зон радиовидимости антеннами Российской сети дальнего космоса (которые обычно происходят в апреле и мае) к приему научных данных при необходимости привлекаются станции Маларгуэ, Себрерос и Нью-Норсиа сети ESTRACK, в соответствии с соглашением между Роскосмосом и ЕКА.

Баллистическое обеспечение миссии обеспечивается баллистическими центрами: Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш). Все элементы наземного комплекса управления объединены в единую информационную систему посредством широкополосной сети передачи данных, которая обеспечивает обмен данными между элементами наземного комплекса управления и научного наземного комплекса.

5.7. Большие коррекции орбиты СРГ

После выведения космического аппарата на номинальную орбиту в окрестности точки L2 (на 100-е сутки) коррекции удержания на этой траектории выполнялись примерно каждые 50 суток вплоть до сентября 2020 г. (см. табл. 2).

Так как дата старта выбиралась исходя из многих критериев, каждую весну имеется разрыв длительностью около месяца в радиовидимости номинальной рабочей орбиты с наземных станций управления (см. рис. 37). С осени 2020 г. применяется стратегия так называемых больших маневров с целью решить эту проблему. Этот подход был предложен в соответствии с (Каналис, Масдемонт, 2004). Он заключается в проведении одного тестового маневра (3 м/с) и последующей выдачи десяти больших маневров (6 м/с каждый) (табл. 3). Как показали расчеты (см. рис. 38), это должно расширить интервалы видимости СРГ с Российской сети антенн дальней космической связи в течение весны каждого последующего года. Тем самым значительно улучшаются условия для операций управления платформы “Навигатор” и телескопов, а также условия передачи на Землю научных данных.

6. ТЕЛЕСКОП ART-XC им. М.Н. ПАВЛИНСКОГО

Рентгеновский телескоп ART-XC на борту космического аппарата СРГ представляет собой набор рентгеновских зеркальных телескопов с зеркалами косоугольного падения. Он был разработан Институтом космических исследований и Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики (ВНИИЭФ). Центр космических полетов имени Маршалла НАСА (MSFC) изготовил летные образцы модулей рентгеновских зеркальных систем. ART-XC предназначен для проведения обзора всего неба в диапазоне энергий 4–12 кэВ и точечных наблюдений отдельных астрофизических объектов в диапазоне энергий 4–30 кэВ.

6.1. Конструкция

ART-XC состоит из семи идентичных рентгеновских зеркальных систем (РЗС) в паре с узлом рентгеновского детектора (УРД, рис. 39). Каждая пара РЗС + УРД образует один телескоп. Все телескопы ориентированы в одном и том же направлении.

Основу конструкции ART-XC составляет конусообразная труба из углеродного волокна высотой три метра. Блоки РЗС установлены на верхней части этой трубы и фокусируют рентгеновские фотоны на соответствующие УРД. Солнцезащитный козырек защищает РЗС от прямых солнечных лучей. Верхняя часть этой структуры покрыта слоем меди для уменьшения попадания рассеянного рентгеновского излучения в детекторы. Также каждый УРД оснащен коллиматором для уменьшения рассеянного рентгеновского излучения. Коллиматор

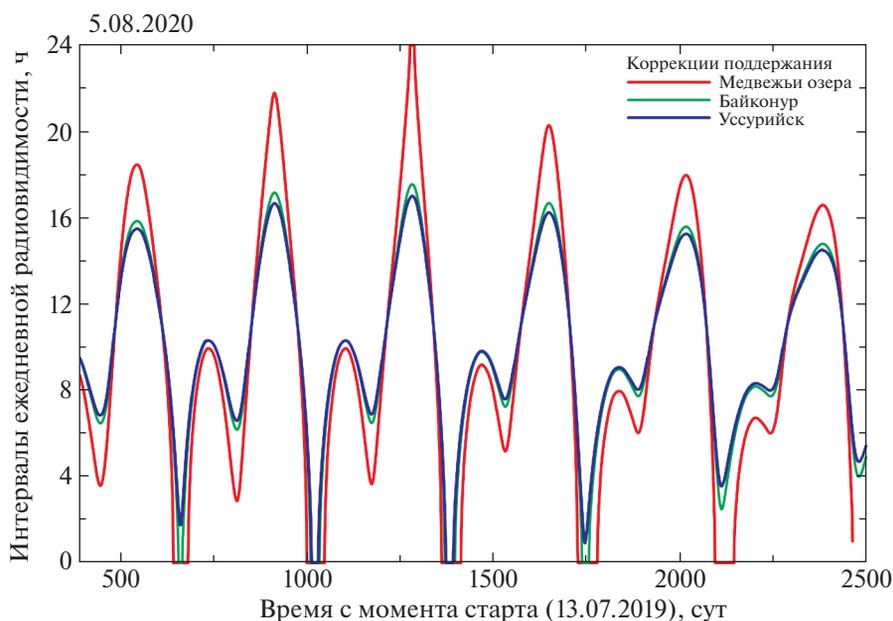


Рис. 37. Интервалы ежесуточной радиовидимости СРГ с российских наземных станций управления (стратегия коррекций поддержания).

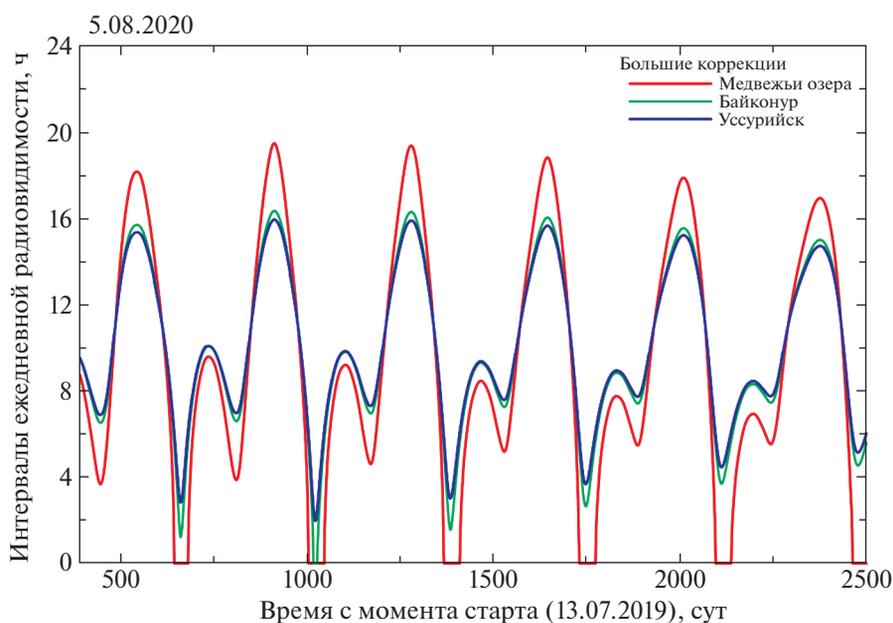


Рис. 38. Интервалы ежесуточной радиовидимости СРГ с российских наземных станций управления (стратегия «больших» коррекций).

включает в себя блок калибровочных источников рентгеновского излучения ($^{55}\text{Fe} + ^{241}\text{Am}$) для калибровки в полете. Тепловые трубы и радиатор используются для поддержания рабочей температуры детектора на уровне около -22°C на всех детекторах. Звездный датчик установлен рядом с РЗС.

РЗС телескопа ART-XC были изготовлены и откалиброваны в MSFC (Губарев и др., 2012, 2014; Кривонос и др., 2017). Каждая РЗС содержит 28 вложенных зеркальных оболочек Wolter-I (рис. 40). Оболочки были изготовлены с использованием технологии репликации электроосажденного никеля и покрыты слоем иридия с плотностью

Таблица 3. Программа коррекции траектории СРГ в окрестности точки L2

№	Дата и время (москowsкое)	Сутки полета	Число включений двигательной установки	Суммарная харак- теристическая скорость, м/с	Израсходованное рабочее тело, кг
1	21.10.2019 19:00:00.000	100	1	0.21	0.25
2	10.12.2019 19:00:00.000	150	1	0.18	0.21
3	30.01.2020 19:00:00.000	201	1	0.27	0.32
4	01.04.2020 19:00:00.000	263	1	1.00	1.13
5	16.06.2020 21:00:00.000	339	1	0.95	1.07
6	05.08.2020 20:00:00.000	389	1	0.94	1.08
7	05.10.2020 19:00:00.000	450	1	3.01	3.38
8	23.11.2020 19:00:00.000	499	1	6.23	6.99
9	28.02.2021 17:00:00.000	588	1	6.24	6.94

Примечание. Оставшееся рабочее тело 319.63 кг.

90% и толщиной около 10 нм. Толщина оболочки незначительно изменяется в зависимости от радиуса: наружные оболочки имеют толщину больше номинальной, чтобы сделать их более жесткими и, следовательно, улучшить угловое разрешение модуля. Верхние концы оболочек вклеены в подерживающую структуру — “паук”. Номинальное фокусное расстояние РЗС составляет 2700 мм. РЗС были расфокусированы на 7 мм во время установки в телескоп, чтобы обеспечить более равномерное угловое разрешение по всему полю зрения в режиме обзора.

Детекторная система ART-XC состоит из семи УРД, двух блоков электроники и блока коммутации для подключения последовательного интерфейса. Позиционно-чувствительный рентгеновский детектор для ART-XC был разработан в ИКИ РАН (Левин и др., 2014, 2016). Чувствительный элемент представляет собой двусторонний стриповый детектор (DSSD) на основе кристалла CdTe с размерами $29.953 \times 29.953 \times 1.000$ мм³. Высококачественные кристаллы CdTe были изготовлены специально для ИКИ РАН компанией AcroRad Co. Ltd. (Япония). Разрешение по двум координатам обеспечивается двумя взаимно перпендикулярными наборами из 48 стрипов на двух сторонах кристалла. Для считывания сигнала с каждого детектора используются специализированные микро-

схемы VA64TA1, по одной микросхеме для каждой стороны. Микросхемы были изготовлены фирмой Ideas (Норвегия). В ИКИ РАН было произведено и испытано более 30 УРД. Семь из них были установлены в летный образец телескопа ART-XC.

6.2. Характеристики

Поле зрения ART-XC составляет ~ 36 угл. мин (~ 0.3 кв. град.), в пределах которого зеркальные системы обеспечивают угловое разрешение лучше 1 угл. мин. Эффективная площадь (по оси) достаточно велика вплоть до энергий ~ 30 кэВ. Кроме того, существуют фотоны, которые отражаются от зеркальной системы только один раз и могут попадать на детектор с углов вплоть до ~ 50 угл. мин. Рисунок 41 иллюстрирует влияние таких одиночных отраженных фотонов на поле зрения ART-XC и их вклад в усредненную эффективную площадь по полю зрения. Для такого типа событий поле зрения ART-XC составляет ~ 2 кв. град. Хотя истинное изображение не может быть получено в этом расширенном поле зрения, и одиночные отраженные фотоны обычно вызывают увеличение фона, их можно использовать для измерения потоков рентгеновского излучения ярких источников. Поэтому телескоп ART-XC можно использовать также в качестве “концентратора”. В результате в

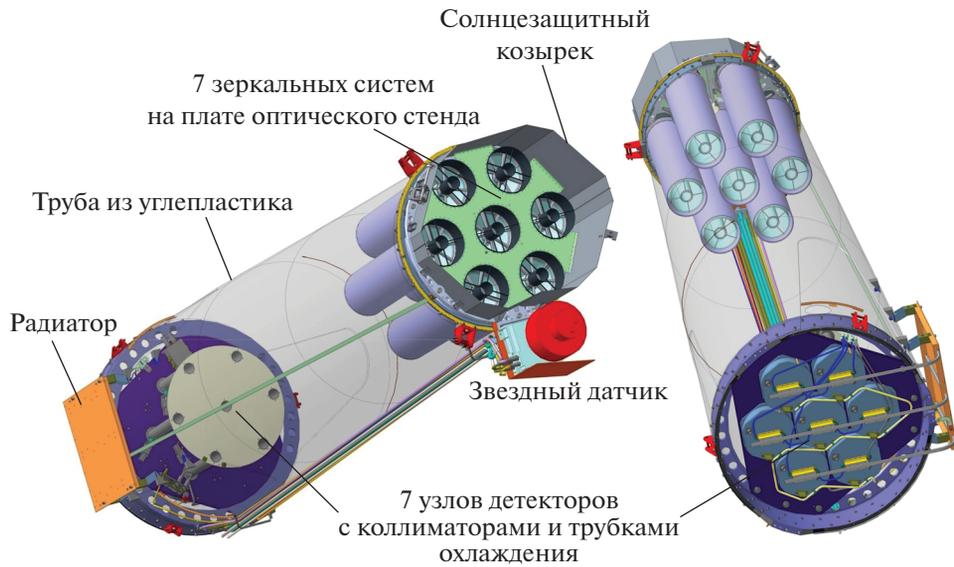


Рис. 39. Устройство телескопа ART-XC: конусообразная труба из углеродного волокна с семью идентичными системами рентгеновских зеркал в верхней части. Зеркальные системы фокусируют рентгеновские лучи на семь узлов рентгеновских детекторов.

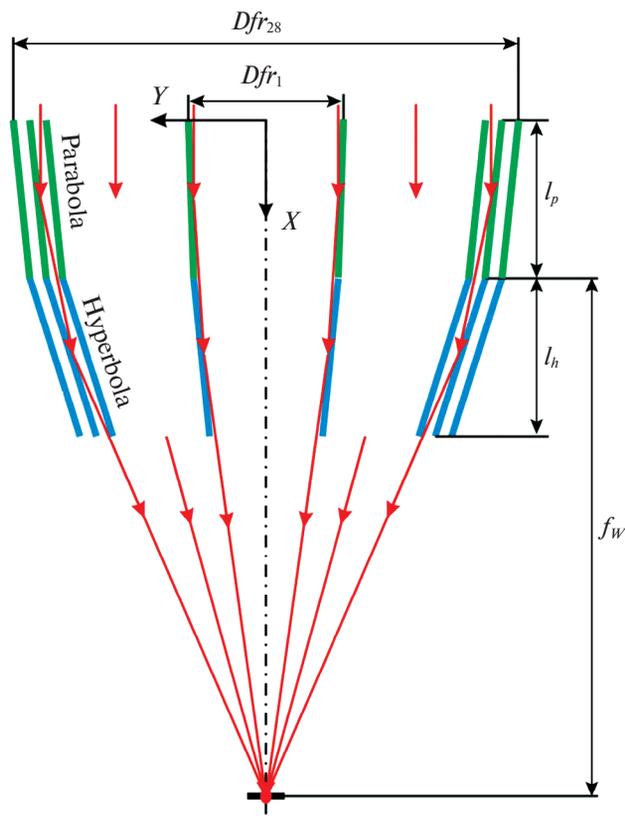


Рис. 40. Оптическая схема типа Волтер I телескопа ART-XC: Dfr_{28} и Dfr_1 — входные отверстия самой внешней и самой внутренней оболочек соответственно, l_h и l_p — высоты параболоидов и гиперболоидов соответственно, f_w — фокусное расстояние зеркальной системы. На основе работы (Павлинский и др., 2020).

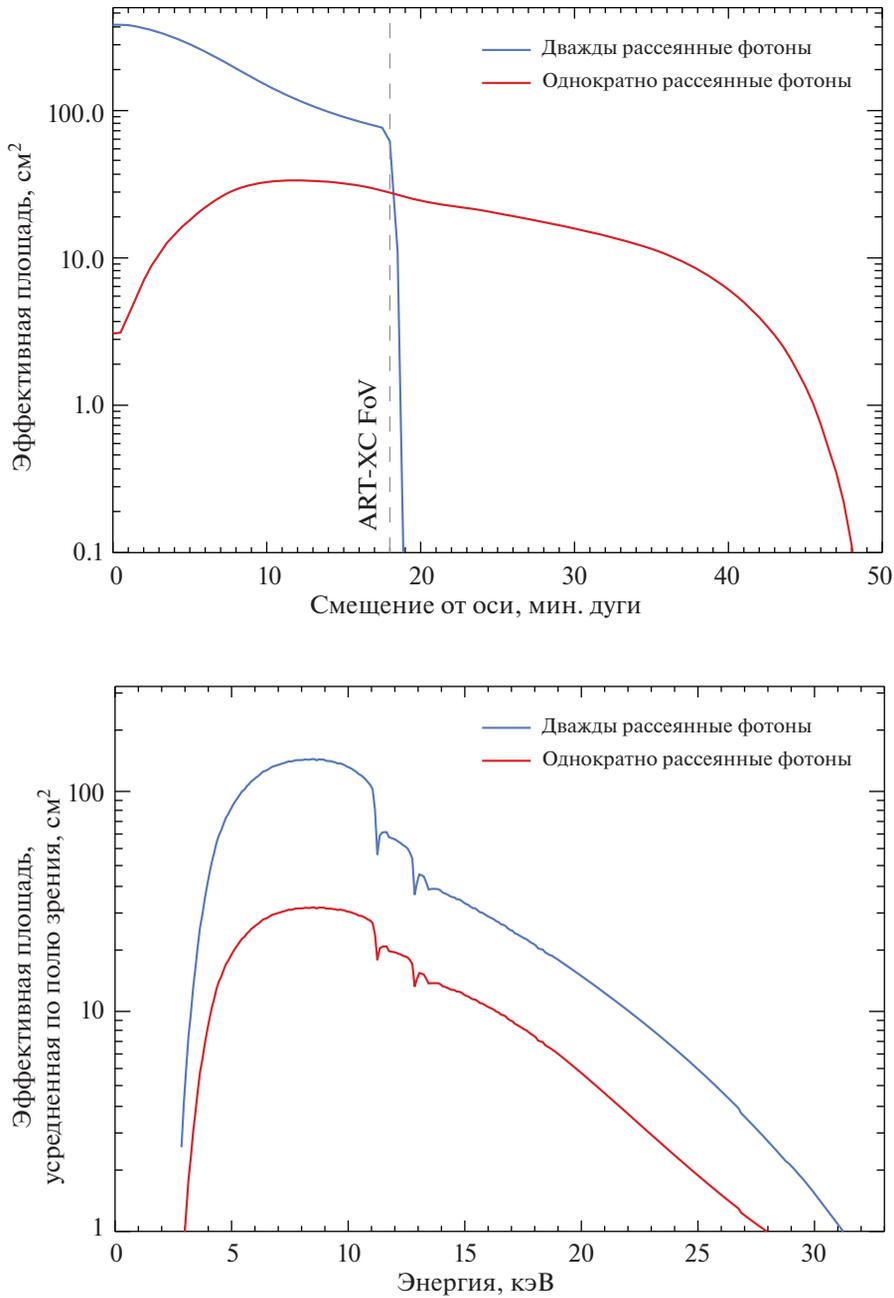


Рис. 41. (а) — Эффективная площадь телескопа ART-XC для дважды отраженных фотонов (синий) и однократно отраженных фотонов (красный) на энергии 8.1 кэВ в зависимости от углового расстояния до оси. (б) — Усредненная по полю зрения эффективная площадь телескопа ART-XC для дважды (синий) и однократно (красный) отраженных фотонов в диапазоне энергий 4–35 кэВ в зависимости от энергии. Эти оценки основаны на эффективной площади смоделированной зеркальной системы и эффективности запасного детектора.

режиме обзора ART-XC может отслеживать яркие транзиенты не менее 28–32 ч (Павлинский и др., 2019б).

УРД могут регистрировать фотоны с энергией вплоть до ~ 100 кэВ, со спектральным разрешением 9% на энергии 13.9 кэВ. Размер стрипа детектора соответствует угловому размеру 45 угл. сек. Во

время калибровок запасных УРД в рентгеновском испытательном центре ИКИ РАН (Павлинский и др., 2018, 2019а,б) было определено, что их эффективность достигает 50% в диапазоне энергий 4.47–4.76 кэВ и 90% в диапазоне энергий 9.43–10.04 кэВ.

Таблица 4. Параметры ART-XC

Параметры	Значения
Полная масса	350 кг
Размеры	3.5 м × Ø 0.9 м
Потребляемая мощность	150 Вт
Число модулей	7
Номинальная фокальная длина	2700 мм
Рабочий энергетический диапазон	4–30 кэВ
Поле зрения	0.3 кв. град
Эффективная площадь для точечных наблюдений	385 см ² @ 8.1 кэВ
Охват	43.8 см ² град ² @ 8.1 кэВ
Угловое разрешение (ширина на полувысоте) в обзоре	53 угл. сек
Энергетическое разрешение	9% @ 13.9 кэВ
Временное разрешение	23 мкс

На основе модели эффективной площади зеркальной системы и наземных калибровок были оценены эффективная площадь на оси, виньетирование и охват телескопа ART-XC. Эффективная площадь ART-XC на оси при энергии 8.1 кэВ составляет 385 кв. см. Охват на энергии 8.1 кэВ составляет 43.8 см² град². В табл. 4 приведены основные параметры ART-XC.

6.3. Научные задачи

Основная цель ART-XC — провести обзор всего неба в широком рентгеновском диапазоне энергий 4–30 кэВ с чувствительностью $\sim 10^{-12}$ эрг с⁻¹ см⁻² ($\sim 10^{-13}$ эрг с⁻¹ см⁻² вблизи полюсов эклиптики) в диапазоне 4–12 кэВ и угловым разрешением лучше, чем одна угловая минута. Таким образом, обзор ART-XC станет самым чувствительным

обзором всего неба, когда-либо проводившимся в этих диапазонах. Обзор ART-XC дополняет обзор всего неба, проводимый телескопом eROSITA в перекрывающемся энергетическом диапазоне 0.3–8 кэВ (с максимальной чувствительностью ниже 2 кэВ). Более жесткий энергетический диапазон обзора ART-XC особенно ценен для изучения населения сильно поглощенных астрофизических объектов.

Предварительные оценки показывают, что в течение 4-летнего обзора всего неба ART-XC обнаружит ~ 5000 источников рентгеновского излучения, в основном АЯГ, в том числе сильно поглощенных (с колонковой плотностью $N_H > 10^{23}$ атомов водорода на кв. см). Это позволит получить обширную базу данных для изучения населения АЯГ на $z \leq 0.3$.

ART-XC также предоставит ценную информацию о температуре межгалактического газа в богатых скоплениях галактик на малых красных смещениях. Это поможет улучшить ограничения на космологические параметры, полученные по результатам обзора всего неба eROSITA.

Обзор всего неба ART-XC может привести к прорывным результатам в изучении различных классов галактических источников рентгеновского излучения, таких как рентгеновские двойные системы и КП. Может быть найдено до 1000 КП, по сравнению с ~ 100 , известными из предыдущих рентгеновских обзоров.

Благодаря уникальному сочетанию широкого энергетического охвата, хорошего углового разрешения и широкого поля зрения, ART-XC может добиться значительных успехов в изучении остатков вспышек сверхновых и рентгеновского хребта Галактики.

Наконец, ART-XC хорошо подходит для обнаружения и мониторинга транзиентных и переменных источников рентгеновского излучения, таких как рентгеновские и гамма-всплески, галактические рентгеновские транзиенты и АЯГ. Хотя вероятность обнаружить гамма-всплеск в поле зрения ART-XC невелика, яркие гамма-всплески могут проникать через защитный материал телескопа и вызывать сигнал на детекторе. Для таких событий ART-XC может дать точную информацию о времени всплеска, которую можно использовать для определения положения источника всплеска на небе с помощью триангуляции с другими космическими обсерваториями.

6.4. Характеристики в полете

На момент написания этой статьи ART-XC работает на орбите уже почти два года. Результаты, полученные в ходе фазы калибровок и летных испытаний характеристик телескопа, а также в

ходе обзора всего неба, полностью подтверждают ожидаемые уникальные возможности прибора.

В частности, для калибровки эффективной площади ART-XC была проведена серия наблюдений Крабовидной туманности во время фазы проверки характеристик телескопов. Измеренная эффективная площадь оказалась в хорошем соответствии с результатами наземных калибровок и моделирования (Павлинский и др., 2018, 2019а,б).

7. ТЕЛЕСКОП eROSITA

7.1. История

Концепция телескопа eROSITA основана на длинной серии предыдущих научных и технологических разработок, начиная с очень успешной миссии ROSAT Германии/США/Великобритании (1990–1999 гг.; Трюмпер, 1982), разработанной и управлявшейся под руководством Института внеземной физики Общества Макса Планка (МРЕ). Обсерватория ROSAT провела первый обзор всего неба в диапазоне энергий от 0.1 до 2.4 кэВ с помощью рентгеновского телескопа с оптикой косоугольного падения и выполнила десятки тысяч наблюдений в трехосной стабилизации.

Большие рентгеновские телескопы следующего поколения: обсерватория Chandra (НАСА) и XMM-Newton (ЕКА), потребовали разработки зеркальных систем с большим фокусным расстоянием (7.5–10 м), чтобы сфокусировать более жесткое рентгеновское излучение. Однако эти обсерватории, запущенные в 1999 г., могли проводить только точечные наблюдения; из-за их ограниченного поля зрения было невозможно проводить обзоры больших площадок. Поэтому было предложено создать телескоп, строящий изображения в жестком рентгеновском диапазоне, который может провести обзор всего неба. Астрофизический институт Потсдама (AIP), МРЕ и Университет Тюбингена (IAAT) предложили миссию ABRIXAS (Широкополосный рентгеновский обзор всего неба с построением изображений).

С самого начала концепция миссии ABRIXAS разрабатывалась на основе последовательной адаптации технологий зеркал и детекторов обсерватории XMM-Newton для малой национальной миссии. Поэтому сроки подготовки проекта были относительно короткими (~3 года), а общие затраты — умеренными. Семь зеркальных модулей проецировали изображение в фокальной плоскости на копию рп-CCD камеры, разработанной для XMM-Newton, и с их небольшим фокусным расстоянием 1.6 м идеально подходили для малого спутника. Но из-за конструктивной ошибки в источнике питания спутник потерял свою основную батарею вскоре после запуска, в апреле 1999 г., и его не

удалось использовать для научных исследований. Однако разработки аппаратного и программного обеспечения, реализованные в миссии ABRIXAS, оказались чрезвычайно полезными в последующих проектах.

Несмотря на неудачный исход миссии ABRIXAS, привлекательность первоначальной научной цели — обзора всего неба в жестком рентгеновском диапазоне — осталась высокой, и не было никакой другой запланированной астрофизической миссии с аналогичными задачами. С помощью Лаборатории полупроводников (HLL) для производства высокочувствительных детекторов Института внеземной физики Общества Макса Планка был запущен новый проект по дальнейшему развитию весьма успешной технологии XMM-Newton рп-CCD. В марте 2002 г. все участвующие институты предложили ЕКА разместить телескоп ROSITA (Рентгеновский обзор с помощью набора телескопов, строящих изображения) на внешней платформе Международной космической станции (МКС). Предполагалось изготовить семь таких же зеркальных модулей, как у ABRIXAS, но оснастить каждый из них в фокальной плоскости своим собственным, недавно разработанным, сохраняющим кадры рп-CCD-детектором. В сентябре 2002 г. это предложение было поддержано ЕКА с наивысшим уровнем научного приоритета и рекомендовано для проработки фазы А. Однако запуск был невозможен ранее 2011 г. из-за занятости внешних платформ МКС. Впоследствии выяснилось, что установка на МКС не была бы удачным вариантом для ROSITA, прежде всего, потому что НАСА решило прекратить свои полеты на МКС в 2010 г., а также потому, что эксперимент по исследованию загрязнений на МКС показал, что окружающая среда не безопасна для чувствительных рентгеновских зеркал и детекторов ROSITA.

На рубеже тысячелетий по наблюдениям сверхновых типа Ia двумя независимыми группами (удостоенными Нобелевской премии по физике в 2011 г. за свои открытия) было обнаружено ускоренное расширение Вселенной, что может свидетельствовать о существовании космологической постоянной. Последующие измерения крошечных возмущений температуры микроволнового фонового излучения, проведенные в экспериментах Воомеганг и WMAP (в дальнейшем из этих возмущений возникли галактики, скопления галактик и крупномасштабная структура Вселенной в целом), указали на то, что Вселенная является плоской, так что общее содержание материи и энергии в космосе достигает почти точно критического значения. На самом деле, уже проведенные в 1990-х гг. исследования массовой доли барионов в отобранных по рентгеновским измерениям (в основном по данным

ROSAT) скоплениях галактик убедительно показали, что плотность материи ниже единицы (Шукер и др., 2003).

Тот факт, что очень большая выборка скоплений галактик может быть особенно полезна для прецизионной космологии, побудил целый ряд групп задуматься об организации специальных обзоров скоплений галактик большой площади. В апреле 2003 г. члены команды ROSITA приняли участие в заявке DUO на конкурс малых космических проектов NASA (SMEX), взяв за основу модифицированную конструкцию телескопа ROSITA. Вместе с другими четырьмя миссиями DUO была выбрана среди 36 конкурирующих предложений для рассмотрения в стадии А, проведенного в 2004 г. DUO должен был обследовать область неба площадью около 6000 кв. град, пересекающуюся с областью покрытия оптического Слоановского цифрового обзора неба (SDSS). Таким образом можно было обнаружить около 10 000 скоплений галактик, что дало бы ограничения на плотность темной энергии с точностью лучше 10%. НАСА, однако, не выбрало проект DUO для дальнейшей разработки. При этом в рамках программы SMEX был выполнен только один проект — жесткий рентгеновский фокусирующий телескоп NuSTAR, запущенный в 2012 г.

В феврале 2005 г. “Комитет по астрономии и астрофизике” (AAAC), основанный Национальным научным фондом (NSF), NASA и Департаментом энергетики (DOE), а также “Консультативная группа по физике высоких энергий” (HEPAR), основанная NSF и DOE, создали “Оперативную группу по темной энергии” (DETF) с задачей консультирования NSF, NASA и DOE об оптимальных стратегиях будущих исследований темной энергии. В частности, DETF оценила и сравнила различные наземные и космические приборы и методы наблюдений. В специальной “Белой книге” (Хайман и др., 2005) было показано, что, опираясь на существующие в то время технологии, можно получить выборку из примерно 100 000 скоплений галактик, отобранных в рентгене, что позволило бы получить очень строгие ограничения на фундаментальные параметры космологической модели Вселенной. Получение такой обширной выборки скоплений галактик и является основной задачей телескопа eROSITA. Для достижения этой цели потребовалось изменить конструкцию зеркальной системы ABRIXAS путем добавления 27 дополнительных оболочек, в результате чего диаметр каждого модуля телескопа увеличился в два раза, а эффективная площадь на низких энергиях возросла в пять раз. Благодаря этой кардинальной перестройке eROSITA, по всей видимости, станет первым реализованным экспериментом по исследованию темной энергии 4-го уровня и превзойдет

проект на основе DUO, который рассматривался группой DETF.

В июне 2006 г. запрос о финансировании проекта eROSITA был направлен Германскому космическому агентству (DLR). Пять немецких институтов (MPE, IAAT, AIP, Гамбургская обсерватория и обсерватория им. доктора Карла Ремайса в Бамберге — Астрономический институт Университета Эрлангена—Нюрнберга) договорились о совместной работе по разработке, созданию и организации научного использования прибора и сформировали Германский консорциум eROSITA. Позже к ним присоединились еще три института: Институт астрономии Аргеландера при Боннском университете, Институт астрофизики Общества им. Макса Планка (MPA) и Обсерватория Мюнхенского университета (LMU). В марте 2007 г. DLR одобрило проект и профинансировало разработку телескопа eROSITA, и в то же время между DLR и Российским космическим агентством (Роскосмос) был подписан меморандум о взаимопонимании для обеспечения запуска eROSITA в рамках миссии “Спектр—Рентген—Гамма”. Вскоре после этого началось создание телескопа. В сентябре 2008 г. Роскосмос принял окончательное решение по орбите, полезной нагрузке и средствам выведения. Предполагалось, что телескоп eROSITA будет запущен связкой ракеты-носителя и разгонного блока “Зенит—Фрегат” (позднее в 2016 г. была заменена на комбинацию “Протон—М” — Блок—ДМ) вместе с российским рентгеновским телескопом жесткого диапазона ART-XC на орбиту вокруг точки L2, чтобы обеспечить максимальную эффективность обзора неба. В июле 2009 г. Общество Макса Планка и DLR выделили для eROSITA дополнительные средства, чтобы компенсировать затраты, вызванные переходом на орбиту в районе L2. В следующем месяце было подписано детальное соглашение между Роскосмосом и DLR.

В последующие годы команды в Германии и России были активно заняты разработкой и созданием телескопов. Предполагалось, что зеркальные модули — уменьшенные версии зеркал XMM-Newton — будут созданы с использованием той же технологии и тем же промышленным консорциумом. Однако возникли значительные проблемы из-за более короткого фокусного расстояния и меньших зеркальных оболочек, поскольку в этом случае неидеальность формы оказывает значительно большее влияние на качество изображения. Размер пятна, в котором собирается половина энергии, у инженерной модели оказался равным 42 угл. сек, что почти в три раза хуже, чем требовалось. Устранение этих проблем потребовало больших усилий, чем предполагалось, но в итоге привело к успеху. Еще одной серьезной проблемой оказалась

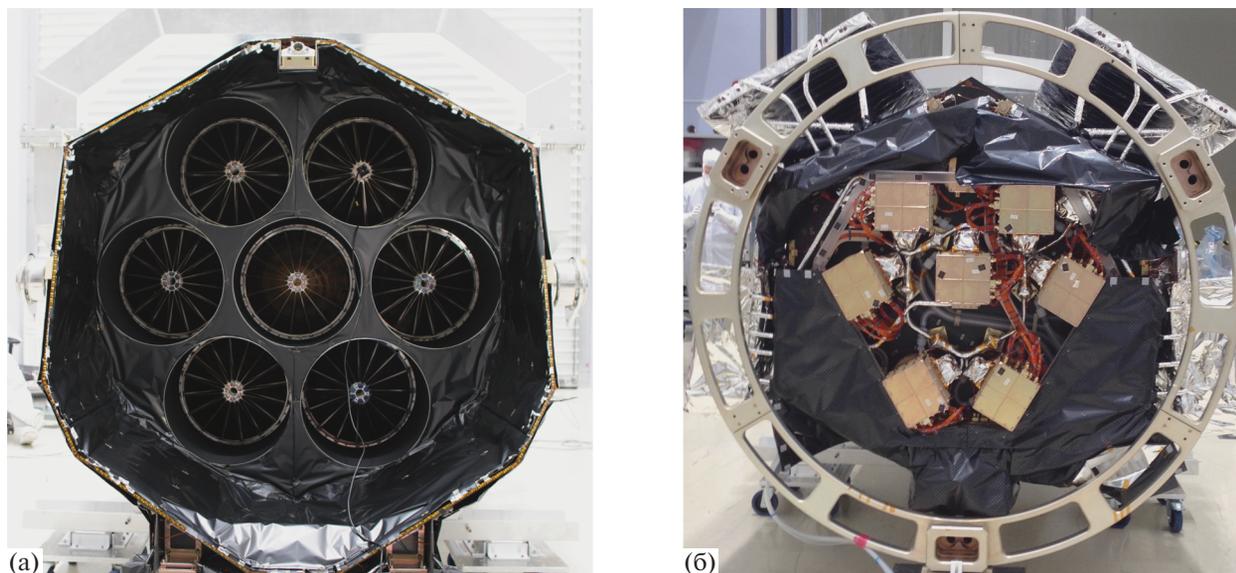


Рис. 42. Фотографии полностью интегрированного телескопа eROSITA, сделанные во время заключительного этапа квалификационных испытаний в декабре 2016 г.: (а) — вид спереди телескопа (с открытой крышкой) со всеми семью установленными зеркальными узлами; (б) — вид сзади телескопа со всеми семью установленными камерами в сборе.

разработка электроники: после принятия решения об орбите в окрестности точки L2 в основном завершённый дизайн пришлось изменить, чтобы использовать радиационно-стойкие компоненты. Все квалификационные испытания проводились в испытательных центрах MPE или на объектах компаний в районе Мюнхена.

Телескоп eROSITA был доставлен в Россию в январе 2017 г. Затем в НПО Лавочкина была проведена серия испытаний, после чего началась интеграция приборов с космическим аппаратом СРГ. Наконец, в апреле 2019 г. обсерватория была доставлена на космодром Байконур.

7.2. Телескоп eROSITA

Телескоп eROSITA (рис. 42) состоит из семи одинаковых соосных рентгеновских телескопов, размещённых на общем оптическом основании шестиугольной формы. Система сотовых панелей из углеродного волокна соединяет семь зеркальных систем в передней части с соответствующими семью детекторными камерами со стороны фокальной плоскости. Оптическое основание соединено с корпусом КА посредством шестиугольной конструкции.

Каждое из зеркал состоит из 54 зеркальных оболочек в геометрии Вольтера-I (параболоид-гиперболоид) с наружным диаметром 360 мм и одинаковым фокусным расстоянием 1600 мм (Фридрих и др., 2008; Арканджели и др., 2017). Во время наземной калибровки было определено, что

среднее разрешение семи зеркальных модулей по оси составляет 16.1 сек. дуги (ширина сбора половины энергии) на энергии 1.5 кэВ. Неизбежное внеосевое размытие, типичное для оптики типа Wolter-I, компенсировано смещением камер на 0.4 мм в сторону зеркал. Это немного расфокусирует каждый телескоп и приводит к небольшому ухудшению качества изображений на оси (18 сек дуги), но улучшает среднее по полю зрения угловое разрешение. Каждая зеркальная система имеет в своем фокусе ПЗС-камеру (Мейдингер и др., 2014). ПЗС-камеры eROSITA являются усовершенствованными версиями ПЗС-камер EPICsp на XMM-Newton. Они состоят из 384×384 пикселей в области изображения размером $28.8 \text{ мм} \times 28.8 \text{ мм}$, что соответствует квадратному полю зрения размером $1.03^\circ \times 1.03^\circ$. Каждый пиксель соответствует области неба 9.6×9.6 кв. мин. дуги. Номинальное время интегрирования составляет 50 мс для всех ПЗС eROSITA. Благодаря наличию дополнительной области хранения кадров, в ПЗС-матрице существенно снижено количество так называемых вневременных событий, которые регистрируются во время считывания ПЗС-матрицы. Это является значительным улучшением по сравнению с РН-камерой на телескопе XMM-Newton (Штрюдер и др., 2001). Для обеспечения оптимальных характеристик во время наблюдений ПЗС-детекторы охлаждаются примерно до -85°C с помощью пассивных элементов (Фюрмец и др., 2008).

Таблица 5. Основные параметры eROSITA в пусковой конфигурации

Телескоп		Семь зеркальных систем		Семь камер в сборе	
Размер	3.5 × Ø 1,9 м	Диаметр внешней оболочки	358 мм	ПЗС-изображение	2.88 × 2.88 см ² (1.03 × 1.03 град)
Масса	808 кг	Число оболочек	54	Размер пикселя	75 × 75 мкм ² (9.6 × 9.6 угл. сек)
Энерго-потребление	522 Вт максимум	Фокальная длина	1600 мм	Временное разрешение	50 мс
Объем данных	600 МБ/день максимум	Диаметр области сбора половины энергии: на оси и в среднем по полю зрения	18 угл. сек 26 угл. сек	Энергетическое разрешение	70 эВ @ 1 кэВ
				Квантовая эффективность	95%

Для летных калибровок в каждой камере есть колесо фильтров с радиоактивным источником ⁵⁵Fe и алюминиево-титановой мишенью. Это дает три спектральные линии на 5.9 кэВ (Mn-K α), 4.5 кэВ (Ti-K α) и 1.5 кэВ (Al-K α).

Обработка данных на борту обеспечивается семью блоками электроники (СЕ), каждый из которых взаимодействует со своей камерой. Каждый из СЕ обеспечивает надлежащий контроль напряжения и времени считывания соответствующей камеры, а также выполняет обработку данных на борту в пределах времени интегрирования камеры.

“Контроллер интерфейсов и температур” (ИТС) получает телеметрию, генерируемую каждым СЕ, и сохраняет ее в оперативной памяти, управляет каждым СЕ, контролирует распределение мощности и температуры зеркал и камер. Учитывая его критичность, имеется дублирующий блок ИТС, находящийся в холодном резерве (Коутиньо и др., 2018).

Наконец, на eROSITA установлены два (дублированных) звездных датчика для точного определения ориентации. Размеры конструкции телескопа составляют примерно 1.9 м (диаметр) × × 3.2 м (высота в конфигурации с закрытой передней крышкой). Общий вес eROSITA составляет 808 кг. В табл. 5 приведены основные параметры прибора eROSITA.

7.3. Начальные операции, первые результаты и характеристики инструмента

Этап ввода eROSITA в эксплуатацию после запуска преследовал цель включения всех подсистем и проверки того, что они работоспособны и

функционируют так, как необходимо для выполнения научных задач. Этот этап послужил не только для проверки и ввода в эксплуатацию телескопа eROSITA, но и для отработки наземными группами в Химках (НПОЛ), Москве (ИКИ РАН) и Гархинге (МРЕ) процедур безопасной эксплуатации КА и телескопов в космосе. Первым критически важным для всей миссии событием стало включение ИТС, которое должно было произойти менее чем через 4 ч после взлета, чтобы запустить терморегулирование зеркал и электроники. Вторым было открытие крышки телескопа, которое произошло 22 июля. Включения камер пришлось подождать несколько дней, чтобы избежать чрезмерного загрязнения из-за первых двух коррекций траектории космического аппарата, проводившихся на 10-й и 25-й дни после старта. Кроме того, охлаждение камер не могло быть запущено ранее чем через 21 день после открытия крышки, чтобы обеспечить достаточную дегазацию телескопа. Ввод в эксплуатацию камер длился около двух месяцев, включая время, необходимое для выполнения серии тестов функциональности электроники камер и системы теплового баланса.

Одновременные наблюдения неба всеми семью модулями рентгеновского телескопа eROSITA начались 13 октября. В течение следующих восьми недель eROSITA получила первые астрономические изображения и провела серию наблюдений, предназначенных для точной калибровки приборов и проверки того, что характеристики телескопа соответствуют ожидаемым. Российские и немецкие научные группы совместно разработали эту программу калибровки и проверки характеристик (CALPV), состоящую из точечных наблюдений,

сканирования отдельных полей и пробных сканирования больших кругов на небе.

На рис. 43 и 44 показаны два примера изображений, полученных телескопом eROSITA во время фазы CALPV и на ранней стадии обзора неба. Они подчеркивают ключевые особенности этого уникального рентгеновского телескопа, а именно способность делать глубокие изображения очень больших областей неба, характеризующиеся высокой чувствительностью по отношению к точечным и диффузным источникам излучения. Чтобы лучше оценить возможности eROSITA, в рамках фазы проверки характеристик телескопа был проведен мини-обзор EFEDS, в ходе которого участок неба площадью 140 кв. град был просканирован с глубиной, соответствующей ожидаемой глубине обзора всего неба к моменту его завершения (см. табл. 6). Полученные данные с высокой точностью подтверждают чувствительность рентгеновского телескопа по отношению к основным классам его мишеней. Этот мини-обзор выявил более 20 000 точечных рентгеновских источников, около 80% из которых являются далекими АЯГ, в которых происходит рост сверхмассивных черных дыр, а оставшиеся 20% — звезды, активные в рентгене.

Наконец, 13 декабря 2019 г. начался первый обзор всего неба. Он завершился 12 июня 2020 г. после 182 дней почти непрерывного сканирования неба. Всего запланировано восемь обзоров всего неба со средней экспозицией (eROSITA) около $200 \text{ с}/\cos(\text{lat})$ в каждом, где lat — широта эклиптики. При этом области размером 1 кв. град вокруг полюсов эклиптики просматриваются каждые четыре часа, и в них накапливается экспозиция около 30 кс за один обзор.

В ходе обзора всего неба космический аппарат непрерывно вращается со скоростью сканирования 90 град/ч, что соответствует 4-часовому периоду вращения. Ось вращения ориентирована примерно на Солнце и поэтому смещается по эклиптической долготе примерно на 1 град/сут. Это позволяет совершить один обзор всего неба за полгода. Выбранная скорость сканирования гарантирует, что угловое разрешение не ухудшается из-за размывания фотонов в течение 50 мс-цикла считывания ПЗС-матрицы. При этом обеспечивается достаточное перекрытие между отдельными сканированиями для исследования переменности источников и получения однородного покрытия неба в ходе обзора.

Предварительный анализ показал, что в ходе первого обзора было обнаружено более миллиона точечных источников рентгеновского излучения и около 20 000 диффузных источников. Это больше полного числа рентгеновских источников, известных до обзора eROSITA. Около 80% точечных

источников являются далекими АЯГ (включая 80% всех известных блазаров) и 20% — коронально активными звездами Млечного Пути.

Таким образом, в течение первого года работы в космосе было подтверждено большинство технических, эксплуатационных и научных характеристик телескопа eROSITA обсерватории СРГ. В табл. 6 описаны ключевые характеристики eROSITA, основанные на данных, собранных за этот период, как на этапе проверки характеристик, так и в ходе обзора всего неба. По сравнению с предполетными оценками (см. Мерлони и др., 2012, и табл. 4.4.1 там же), характеристики телескопа полностью соответствуют ожиданиям в мягком диапазоне энергии, в то время как в жестком диапазоне энергии они оказались немного хуже, в основном из-за повышенного уровня фона частиц.

8. ИСТОРИЯ ПРОЕКТА СРГ В РОССИИ

8.1. Международные проекты по рентгеновской астрономии в России

История международных космических проектов в области рентгеновской астрономии в СССР и России началась с рентгеновской обсерватории на модуле “Квант” космической станции “Мир”. Этот проект был предложен Институтом космических исследований Академии наук СССР для реализации в рамках советской программы “Интеркосмос”. Для участия в этом проекте был приглашен ряд европейских учреждений: 1) Бирмингемский университет (Великобритания) и Нидерландский институт космических исследований SRON, которые построили рентгеновский телескоп ТТМ с кодированной маской и апертурой, чувствительный в энергетическом диапазоне 2–25 кэВ, 2) Институт веземной физики Общества им. Макса Планка (Германия), который предоставил спектрометр жесткого рентгеновского излучения HEXE, чувствительный в энергетическом диапазоне 20–120 кэВ, 3) Европейский центр космических исследований и технологий (ESTEC) Европейского космического агентства, который построил спектрометр газа высокого давления GSPS. Для этого проекта ИКИ АН СССР сконструировал жесткий рентгеновский детектор Пульсар X-1.

Модуль “Квант” был выведен на орбиту ракетой-носителем “Протон” и успешно состыкован с космической станцией “Мир” в апреле 1987 г. Главным научным результатом работы обсерватории “Рентген” стало открытие в августе 1987 г. жесткого рентгеновского излучения с необычным спектром от очень близкой сверхновой SN 1987A, которая вспыхнула пятью месяцами ранее в Большом Магеллановом Облаке (Сюняев и др., 1987а,б, 1990а,б). Обнаруженные

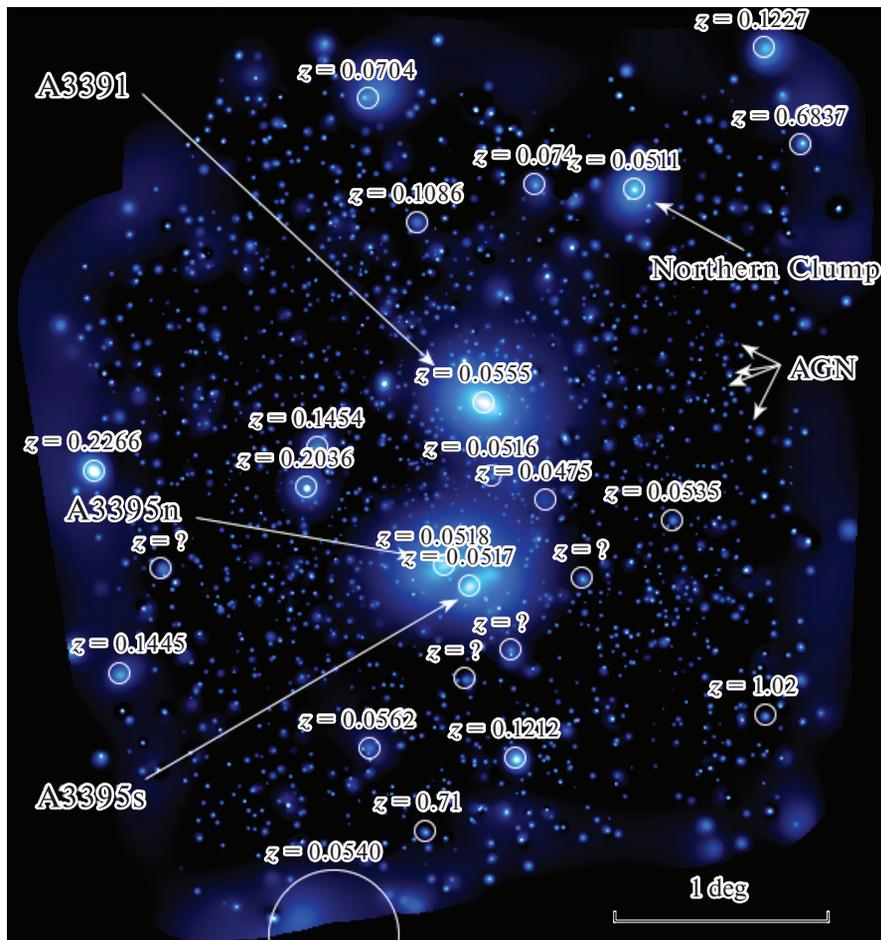


Рис. 43. Рентгеновское изображение системы скоплений галактик Abell 3391/95, полученное телескопом eROSITA в диапазоне 0.3–2.3 кэВ, очищенное с помощью вейвлетов. На изображении также видны несколько сгустков диффузного газа, расположенных на том же расстоянии, а также несколько фоновых скоплений галактик. Один градус соответствует 3.9 Мпк на красном смещении A3391 (из работы Райприх и др., 2021).

фотоны были произведены в виде линий гамма-излучения, связанных с распадом радиоактивного кобальта-56. Во время прохождения через оптически толстую оболочку сверхновой эти фотоны испытали многократные комптоновские рассеяния на относительно холодных электронах и из-за эффекта отдачи теряли свою энергию. В результате сформировался чрезвычайно жесткий рентгеновский спектр излучения необычной формы, и именно такой спектр был обнаружен через несколько месяцев приборами HEXE и Пульсар X-1. На энергиях ниже 20 кэВ важную роль играло фотопоглощение фотонов ионами тяжелых элементов, в первую очередь железа и кобальта. Этим можно было объяснить отсутствие сигнала в энергетическом диапазоне телескопа ТТМ.

В 1987–1995 гг. телескоп ТТМ обнаружил множество переменных и постоянных источников, которые теперь носят названия “KS” (источники мо-

дуля “Квант”, Сюняев и др., 1991а). Наличие приборов, чувствительных в разных диапазонах рентгеновского спектра, позволило построить широкополосные спектры в диапазоне энергий 2–200 кэВ для множества ярких переменных и постоянных источников в двойных звездных системах, включая черные дыры и нейтронные звезды (рентгеновские пульсары и нейтронные звезды со слабыми магнитными полями) (Сюняев и др., 1991б, 1994). Впервые было продемонстрировано, насколько сильно рентгеновские спектры двойных систем зависят от природы аккрецирующего объекта. С помощью телескопа ТТМ были проведены тайминговые наблюдения рентгеновских пульсаров (Гильфанов и др., 1989) и получены высококачественные рентгеновские изображения области Центра Галактики.

Второй рентгеновской орбитальной обсерваторией ИКИ РАН в рамках программы “Интеркосмос” стал спутник “Гранат”, построен-

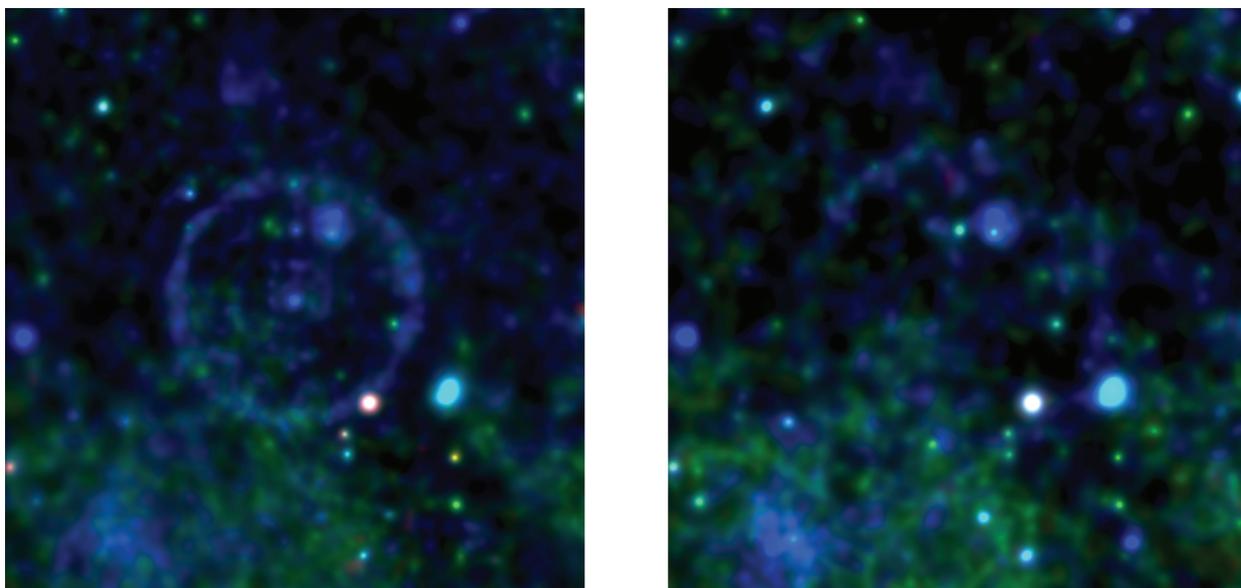


Рис. 44. Адаптивно сглаженные псевдоцветные изображения, полученные в ходе первого (eRASS1, слева) и второго (eRASS2, справа) обзоров всего неба телескопом eROSITA в энергетических диапазонах 0.2–0.6 кэВ (красный), 0.6–1.0 кэВ (зеленый), 1.0–2.3 кэВ (синий). Размер изображений составляет $3^\circ \times 3^\circ$. Круглая структура представляет собой кольцо рассеивающей пыли, связанное с “эхом” вспышки рентгеновской двойной MAXI J1348-630 (из работы Ламер и др., 2021).

ный НПО Лавочкина и выведенный с помощью ракеты-носителя “Протон” на вытянутую эллиптическую орбиту вокруг Земли с 4-дневным периодом. Он работал на орбите с декабря 1989 по май 1999 г. Полезная нагрузка обсерватории “Гранат” включала: жесткий рентгеновский и гамма-телескоп SIGMA, детекторы гамма-всплесков PHEBUS, разработанные во Франции, монитор всего неба WATCH (Дания) и рентгеновский телескоп АРТ-П, созданный ИКИ РАН и его филиалом в г. Фрунзе (ныне Бишкек, Кыргызстан), чувствительный в энергетическом диапазоне 2–25 кэВ. Оба телескопа SIGMA и АРТ-П имели кодирующие маски и координатно-чувствительные детекторы, позволяющие строить изображения неба в поле зрения.

Среди основных результатов обсерватории “Гранат” — карты центральной области Галактики в жестких рентгеновских лучах, построенные телескопами SIGMA (40–100 кэВ) и АРТ-П (3–25 кэВ) (см., например, Павлинский и др., 1994; Чуразов и др., 1994; Гильфанов и др., 1993). Монитор WATCH обнаружил чрезвычайно интересную рентгеновскую двойную с черной дырой GRS 1915-105 (“GRS” означает источник обсерватории “Гранат”, Кастро-Тирадо и др., 1992). Обнаруженная с помощью телескопа АРТ-П пространственная корреляция рентгеновского излучения в диапазоне 8–22 кэВ с распределением молекулярного газа

в центре Галактики стала первым указанием на рентгеновское эхо прошлой активности ядра Галактики, источника Sgr A*, в рентгеновском диапазоне (Сюняев и др., 1993). Согласно предсказанию Вайнштейна, Сюняева (1980), такое эхо должно возникать из-за рассеяния рентгеновских фотонов на молекулах H_2 в плотном газе вокруг Sgr A*. Наблюдения PHEBUS помогли четко установить (Ткаченко и др., 2002) существование двух типов гамма-всплесков: коротких и обычных, которые, как мы теперь знаем, тесно связаны с параметрами звездных объектов, ответственных за их возникновение (слияния нейтронных звезд в случае коротких всплесков и коллапс массивных звезд в случае обычных всплесков).

В 2002 г. в соответствии с соглашением между Европейским космическим агентством и Роскосмосом ракета-носитель “Протон” вывела на высокоапогейную орбиту Международную астрофизическую лабораторию гамма-лучей (INTEGRAL), которая и по сей день продолжает получать научные данные. Российским ученым предоставляется 25% наблюдательного времени этой миссии. Среди выдающихся результатов обсерватории INTEGRAL — детальная спектроскопия излучения, связанного с аннигиляцией электрон-позитронов в центре Галактики (Чуразов и др., 2005), регистрация рентгеновских линий распада радиоактивного титана-44 в остатке кол-

Таблица 6. Основные характеристики телескопа eROSITA и его чувствительность в обзоре

Характеристики		Энергетический диапазон	
		Мягкий диапазон 0.2–2.3 кэВ	Жесткий диапазон 2.3–8 кэВ
Средняя эффективная площадь по полю зрения (см ²)		1365 @ 1 кэВ	139 @ 5 кэВ
Полный фон (10 ⁻³ отсчетов с ⁻¹ угл. мин ⁻²)		~3.7	~2.1
Чувствительность к точечным источникам в одном обзоре			
Экватор эклиптики	Полная экспозиция (с) 200	5×10^{-14} эрг с ⁻¹ см ⁻²	7×10^{-13} эрг с ⁻¹ см ⁻²
Полюс эклиптики	Полная экспозиция (с) 4000	7×10^{-15} эрг с ⁻¹ см ⁻²	9×10^{-14} эрг с ⁻¹ см ⁻²
Чувствительность к точечным источникам в поле eFEDS			
Поле eFEDS	Полная экспозиция (с) 2500	9×10^{-15} эрг с ⁻¹ см ⁻²	1.3×10^{-13} эрг с ⁻¹ см ⁻²
Чувствительность к точечным источникам по сумме восьми обзоров (ожидаемая)			
Экватор эклиптики	Полная экспозиция (с) 1600	1.1×10^{-14} эрг с ⁻¹ см ⁻²	2.5×10^{-13} эрг с ⁻¹ см ⁻²
Полюс эклиптики	Полная экспозиция (с) 30 000	2.5×10^{-15} эрг с ⁻¹ см ⁻²	4×10^{-14} эрг с ⁻¹ см ⁻²

Примечание. Оценки фона основаны на данных первого обзора всего неба. Для первого обзора всего неба и обзора eFEDS площадью 140 кв. град (Бруннер и др., 2021) чувствительность по потоку в каждом энергетическом диапазоне была вычислена для всех источников со значимостью выше 8 (мягкий диапазон) и 10 (жесткий диапазон), измеряя поток, ниже которого логарифмическое число отсчетов начинает падать. Для суммы восьми обзоров оценки основаны на детальном моделировании с учетом всех приборных эффектов и интенсивности фона частиц, измеренной в районе L2. Для каждой области приведена полная экспозиция в секундах без учета виньетирования. Соответствующая эффективная экспозиция с учетом виньетирования может быть вычислена делением полной экспозиции на 1.8 для мягкого и 3.31 для жесткого энергетических диапазонов.

лапсировавшей сверхновой SN 1987A (Гребенев и др., 2012) и первое в истории обнаружение линий гамма-излучения распада радиоактивного кобальта-56 от термоядерной сверхновой SN2014J (Чуразов и др., 2014).

8.2. Начало проекта СРГ в СССР

В 1987 г. исполнилось 30 лет со дня запуска первого искусственного спутника Земли. По этому поводу была проведена большая международная встреча в ИКИ РАН, где Интеркосмос объявил конкурс на полезную нагрузку для двух орбитальных обсерваторий. В результате было решено поддержать проекты “Радиоастрон” и “Спектр–Рентген–Гамма” (СРГ). Проект СРГ поддержали ряд известных советских физиков, в том числе: Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров и директор ИКИ РАН Р.З. Сагдеев. Кроме отдела Астрофизики

высоких энергий ИКИ РАН, который предложил проект СРГ, к нему присоединились Дания, Великобритания, Италия, МРЕ (Германия), НАСА (США), Швейцария, Финляндия, Венгрия, Израиль и Турция. Работа над проектом шла полным ходом (рис. 45), но огромные изменения в СССР, а затем и в России, привели к замедлению работ над космическим аппаратом и приборами в 2001–2002 гг., после чего проект был прекращен.

В 2003 г. Совет по космосу РАН рассмотрел и поддержал более скромный проект с запуском ракетой “Союз” (вместо “Протона”), меньшим количеством приборов и смещением научных задач в сторону космологии, тонкой рентгеновской спектроскопии и мониторинга всего неба в рентгеновских лучах. Также была поддержана идея задействования в проекте международного сотрудничества. Проект затем был рассмотрен Роскосмосом,

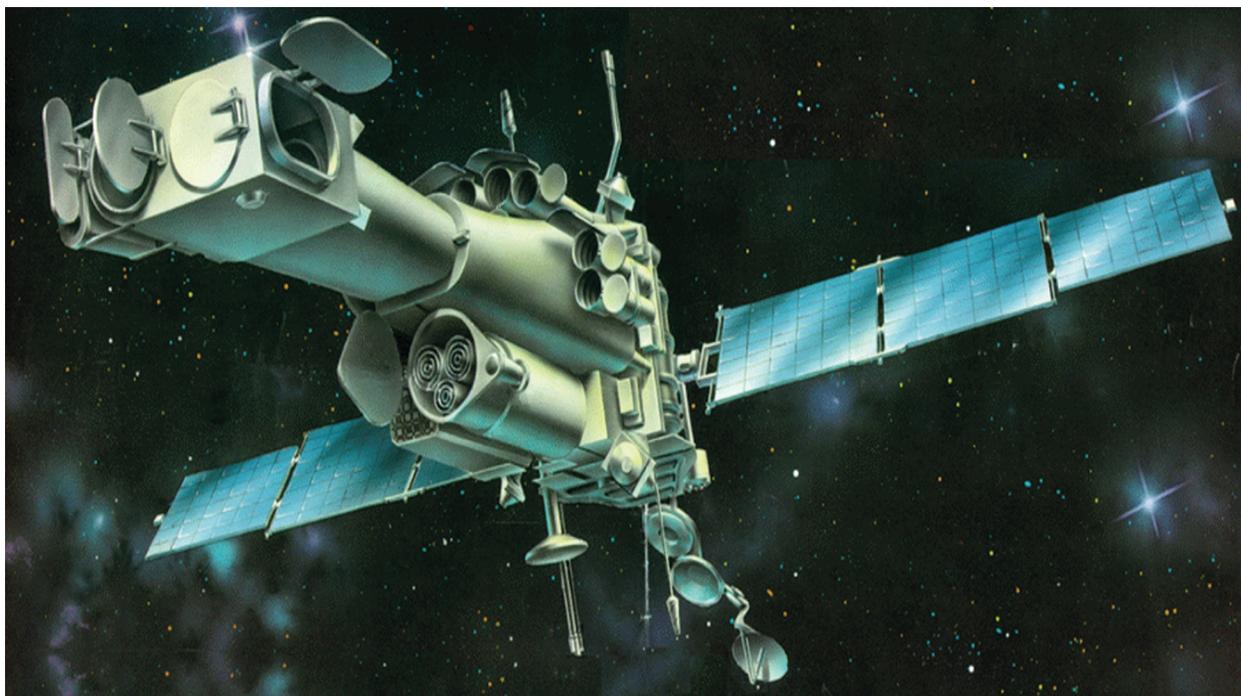


Рис. 45. Дизайн предыдущего проекта СРГ.

и было принято ключевое решение о его дальнейшей проработке. Также было решено сохранить (для преемственности) прежнее название проекта — СРГ, несмотря на то что новый проект не предусматривал наличия приборов, чувствительных в гамма-диапазоне.

В числе первых приглашенных для обсуждения возможного участия в проекте стали ученые из Института внеземной физики Общества им. Макса Планка (МРЕ) в Германии, с которыми отдел Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН тесно сотрудничал в работах по обсерватории “Рентген” на модуле “Квант” космической станции “Мир” и над первым вариантом проекта СРГ. Кроме того, учитывалось, что МРЕ разработал и построил рентгеновский телескоп для чрезвычайно успешного астрофизического спутника ROSAT, который получил замечательные рентгеновские карты неба еще в 1990 г.

МРЕ предложил использовать для наблюдений скоплений галактик (самых массивных объектов во Вселенной, представляющих интерес и для российской стороны) модификацию телескопа, разработанного МРЕ для, к сожалению, неудачной миссии ABRIXAS. Этот телескоп и его детектор были разработаны для исследования неба в значительно более жестком энергетическом диапазоне (от 0.5 до 10 кэВ) по сравнению с ROSAT (см. более

подробное обсуждение в п. 7.1). К тому времени количество массивных скоплений галактик, необходимых для обнаружения барионных акустических колебаний в их пространственном распределении, было уже рассчитано в Институте астрофизики Общества им. Макса Планка (МРА) и оказалось близким к 100 000 (Хютси, 2006). Таким образом, требовалось найти практически все массивные скопления галактик в наблюдаемой Вселенной. Этот вопрос активно обсуждался в МРА в связи с поисками барионных акустических колебаний, предсказанных теоретиками (Пиблс, Ю, 1970; Сюняев, Зельдович, 1970), и с появившимися надеждами найти большое количество скоплений галактик с помощью эффекта Сюняева–Зельдовича с использованием наземных телескопов и космических аппаратов, работающих в микроволновом диапазоне. Поэтому возник вопрос о телескопе с более высокой чувствительностью и работающем в более мягком диапазоне энергии рентгеновского излучения по сравнению с существующими модификациями прибора для спутника ABRIXAS, которые не могли обеспечить необходимую чувствительность для выполнения этой задачи или большинства других задач, представлявших в то время интерес для космологов.

После долгих обсуждений российская сторона согласилась на радикальное увеличение размеров, массы (800 кг) и энергопотребления немецкого прибора для выполнения требований (в соответ-

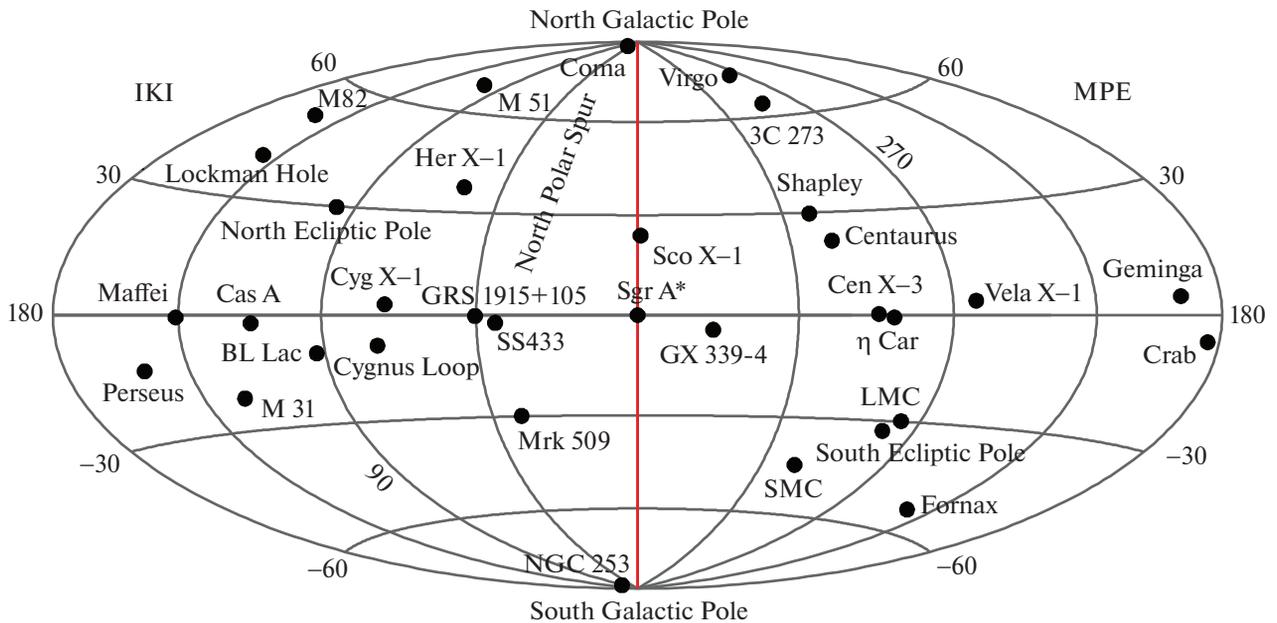


Рис. 46. Разделение данных СПГ/eROSITA между немецким и российским консорциумами (обозначено “MPE” и “IKI” соответственно). Граница в галактических координатах проходит вертикально через центральную сверхмассивную черную дыру Sgr A*.

ствии с расчетами Г. Хазингера и П. Пределя), вытекающих из запланированных научных результатов исследования неба. Параллельно росли и параметры российского телескопа ART-XC.

23 марта 2007 г. Роскосмос и DLR подписали меморандум о включении прибора eROSITA в полезную нагрузку орбитальной обсерватории СПГ. Это открыло путь к интенсивной работе над проектом и телескопом.

8.3. Распределение данных между участниками проекта СПГ

Все данные, полученные с помощью телескопа ART-XC, принадлежат ученым ИКИ РАН, разработавшим телескоп. Данные в пределах области в 200 кв. град. вокруг Северного полюса эклиптики (где чувствительность обзора всего неба достигает максимума) обрабатываются совместно учеными ИКИ РАН и MSFC в обмен на поставку последними нескольких рентгеновских зеркальных систем для телескопа ART-XC.

Согласно меморандуму 2007 г. между Роскосмосом и DLR, данные СПГ/eROSITA в равных долях принадлежат немецким и российским ученым. Так как основная цель телескопа СПГ/eROSITA состоит в построении рентгеновских карт всего неба и создании каталогов источников рентгеновского излучения, было принято решение, что

немецкие ученые отвечают за обработку и публикацию данных в одном полушарии неба, а российские ученые — в другом (рис. 46).

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На момент написания этой статьи обсерватория СПГ работает на орбите уже почти два года. Телескопы ART-XC и eROSITA проводят четвертое сканирование всего неба. Опыт 25 мес работы СПГ позволяет заключить, что первоначальные планы обсерватории успешно реализуются, и количество обнаруживаемых внегалактических объектов соответствует предпусковым ожиданиям. Используя новые данные, полученные в четвертом обзоре неба, можно искать источники, яркость рентгеновского излучения которых сильно изменялась в течение 6–18 мес, прошедших с момента их предыдущего появления в поле зрения телескопов во время первых трех обзоров. Каждый день обсерватория обнаруживает в пределах полосы $360^\circ \times 1^\circ$ (т.е. менее 1% всего неба), в среднем $\sim 5\text{--}10$ объектов, поток излучения от которых увеличился за 6 мес более чем в 10 раз. Глубина рентгеновских карт и количество обнаруженных источников продолжают увеличиваться с увеличением экспозиции. Обсерватория осуществляет свою миссию в круглосуточном режиме.

Работа основана на наблюдениях с помощью телескопов eROSITA и ART-XC на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ была построена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице ее Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в рамках Российской федеральной космической программы при участии Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/eROSITA был построен консорциумом немецких институтов во главе с МРЕ и при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ был спроектирован, построен, запущен и управляется НПО Лавочкина и ее субподрядчиками. Научные данные передаются по каналам связи через сеть антенн дальней космической связи в Медвежьих Озерах и Уссурийске. Данные eROSITA, использованные в этой работе, были обработаны с использованием программного обеспечения eSASS, разработанного немецким консорциумом eROSITA, и собственного программного обеспечения для анализа данных, разработанного российским консорциумом eROSITA.

Статья является переводом работы Р. Сюняева и др., опубликованной в журнале *Astronomy & Astrophysics*, v. 656, A132 (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. Аккерманн и др. (M. Ackermann, A. Albert, W.B. Atwood, et al.), *Astrophys. J.* **793**, 64 (2014).
2. Арканджели и др. (L. Arcangeli, G. Borghi, H. Bräuninger, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **10565**, 1056558 (2017).
3. Ашензи и др. (S. Ascenzi, G. Oganesyan, O.S. Safaia, et al.), *Astron. Astrophys.* **641**, A61 (2020).
4. Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **46**, 689 (2020) [I.F. Bikmaev, E.N. Irtuganov, E.A. Nikolaeva, et al., *Astron. Lett.* **46**, 645 (2020)].
5. Блим и др. (L.E. Bleem, B. Stalder, T. de Haan, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **216**, 27 (2015).
6. Бруннер и др. (H. Brunner, T. Liu, G. Lamer, A. Georgakakis, A. Merloni, M. Brusa, E. Bulbul, K. Dennerl, et al.), arXiv:2106.14517, submitted (2021).
7. Вайнштейн, Сюняев (L.A. Vainshtein and R.A. Sunyaev), *Sov. Astron. Lett.* **6**, 353 (1980).
8. Вилмс и др. (J. Wilms, I. Kreykenbohm, P. Weber, et al.), *Astron. Telegram.* **13416**, 1 (2020).
9. Вогес и др. (W. Voges, B. Aschenbach, T. Boller, et al.), *Astron. Astrophys.* **349**, 389 (1999).
10. Волтер (H. Wolter), *Annalen der Physik* **445**, 94 (1952a).
11. Волтер (H. Wolter), *Annalen der Physik* **445**, 286 (1952b).
12. Вольф и др. (J. Wolf, K. Nandra, M. Salvato, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A5 (2021).
13. Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., Чуразов Е.М. и др., *Письма в Астрон. журн.* **15**, 675 (1989) [M. Gilfanov, R. Sunyaev, E. Churazov, et al., *Sov. Astron. Lett.* **15**, 291 (1989)].
14. Гильфанов и др. (M. Gilfanov, E. Churazov, R.A. Sunyaev, et al.), *Astrophys. J.* **418**, 844 (1993).
15. Гильфанов и др. (M. Gilfanov, S. Sazonov, R. Sunyaev, et al.), *Astron. Telegram.* **14246**, 1 (2020).
16. Гильфанов и др. (M. Gilfanov, S. Sazonov, P. Medvedev, et al.), *Astron. Telegram.* **14800**, 1 (2021).
17. Гирланда и др. (G. Ghirlanda, R. Salvaterra, S. Campana, et al.), *Astron. Astrophys.* **578**, A71 (2015).
18. Гребенев и др. (S.A. Grebenev, A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, and C. Winkler), *Nature* **490**, 373 (2012).
19. Грубер и др. (D.E. Gruber, J.L. Matteson, L.E. Peterson, and G.V. Jung), *Astrophys. J.* **520**, 124 (1999).
20. Губарев и др. (M. Gubarev, B. Ramsey, J.J. Kolodziejczak, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **9144**, The calibration of flight mirror modules for the ART-XC instrument on board the SRG mission, 91444U (2012).
21. Губарев и др. (M. Gubarev, B. Ramsey, S.L. O'Dell, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **8443**, The Marshall Space Flight Center development of mirror modules for the ART-XC instrument aboard the Spectrum Roentgen-Gamma mission, 84431U (2014).
22. Додин А.В., Потанин С.А., Шатский Н.И. и др., *Письма в Астрон. журн.* **46**, 459 (2020) [A.V. Dodin, S.A. Potanin, N.I. Shatsky, et al., *Astron. Lett.* **46**, 429 (2020)].
23. Дорошенко и др. (V. Doroshenko, A. Santangelo, S.S. Tsygankov, and L. Ji), *Astron. Astrophys.* **647**, A165 (2021).
24. Зазнобин и др. (I. Zaznobin, S. Sazonov, R. Burenin, et al.), *Astron. Astrophys.*, in press, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141777> (2021a).
25. Зазнобин И.А., Усков Г.С., Сазонов С.Ю. и др., *Письма в Астрон. журн.* **47**, 89 (2021b) [I.A. Zaznobin, G.S. Uskov, S.Y. Sazonov, et al., *Astron. Lett.* **47**, 71 (2021b)].

26. Йонкер и др. (P.G. Jonker, N.C. Stone, A. Genozov, S. van Velzen and B. Metzger), *Astrophys. J.* **889**, 166 (2020).
27. Кавамуро и др. (T. Kawamuro, Y. Ueda, M. Shidatsu, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **238**, 32 (2018).
28. Каналис, Масдемонт (E. Canalias and J.J. Masdemont), *Inter. Astronautic. Federat.* — 55th Inter. Astronautic. Congress **1**, 536 (2004).
29. Кардашев и др. (N.S. Kardashev, V.V. Khartov, V.V. Abramov, et al.), *Astron. Rep.* **57**, 153 (2013).
30. Кастро-Тирадо и др. (A.J. Castro-Tirado, S. Brandt, and N. Lund), *IAU Circ.* **5590**, 2 (1992).
31. Консорциум спутника Планк (Planck Collaboration), *Astron. Astrophys.* **554**, A140 (2013).
32. Коутиньо и др. (D. Coutinho, W. Bornemann, B. Budau, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **10699**, Proc. SPIE, 106995F (2018).
33. Кривонос и др. (R. Krivonos, A. Tkachenko, R. Burenin, et al.), *Experiment. Astron.* **44**, 147 (2017).
34. Ламб и др. (D.H. Lumb, R.S. Warwick, M. Page, and A. De Luca), *Astron. Astrophys.* **389**, 93 (2002).
35. Ламер и др. (G. Lamer, A.D. Schwobe, P. Predehl, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A7 (2021).
36. Левин и др. (V. Levin, M. Pavlinsky, V. Akimov, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **9144**, ART-XC/SRG: status of the x-ray focal plane detector development, 914413 (2014).
37. Левин и др. (V. Levin, M. Pavlinsky, V. Akimov, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **9905**, Results of ground tests and calibration of x-ray focal plane detectors for ART-XC/SRG instrument, 990551 (2016); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141630>
38. Лутовинов и др. (A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, I.A. Mereminskiy, et al.), *Astron. Astrophys.*, arXiv:2107.05587, in press (2021).
39. Лю и др. (Z. Liu, A. Rau, A. Malyali, A. Merloni, and I. Grotova), *Astron. Telegram.* **14407**, 1 (2021).
40. Мальяли и др. (A. Malyali, A. Rau, and K. Nandra), *MNRAS* **489**, 5413 (2019).
41. Медведев и др. (P. Medvedev, S. Sazonov, M. Gilfanov, et al.), *MNRAS* **497**, 1842 (2020).
42. Медведев и др. (P. Medvedev, M. Gilfanov, S. Sazonov, N. Schartel, and R. Sunyaev), *MNRAS* **504**, 576 (2021).
43. Майдингер и др. (N. Meidinger, R. Andritschke, W. Bornemann, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **9144**, Proc. SPIE, 91441W (2014).
44. Мереминский и др. (I. Mereminskiy, A. Lutovinov, A. Semena, et al.), *Astron. Telegram.* **14051**, 1 (2020a).
45. Мереминский и др. (I. Mereminskiy, P. Medvedev, A. Lutovinov, et al.), *Astron. Telegram.* **14206**, 1 (2020b).
46. Мереминский и др. (I. Mereminskiy, P. Medvedev, A. Semena, A., et al.), *Astron. Telegram.* **13571**, 1 (2020в).
47. Мереминский и др. (I. Mereminskiy, A. Semena, M. Pavlinsky, et al.), *Astron. Telegram.* **13606**, 1 (2020г).
48. Мереминский и др. (I.A. Mereminskiy, A.V. Dodin, A.A. Lutovinov, et al.), *Astron. Astrophys. in press*, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141410> (2021).
49. Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, et al.), arXiv e-prints, arXiv:1209.3114 (2012).
50. Павлинский и др. (M.N. Pavlinsky, S.A. Grebenev, and R.A. Sunyaev), *Astrophys. J.* **425**, 110 (1994).
51. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, et al.), *Experiment. Astron.* **45**, 315 (2018).
52. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, et al.), *Experiment. Astron.* **47**, 1 (2019a).
53. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, et al.), *Experiment. Astron.* **48**, 233 (2019b).
54. Павлинский и др. (M.N. Pavlinsky, A.Y. Tkachenko, V.V. Levin, et al.), *Instrument. Experiment. Techniques* **6** (2020).
55. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021a).
56. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, S. Sazonov, R. Burenin, et al.), *Astron. Astrophys.*, in press (2021b); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141770>
57. Пиблс, Ю (P.J.E. Peebles and J.T. Yu), *Astrophys. J.* **162**, 815 (1970).
58. Предель и др. (P. Predehl, R.A. Sunyaev, W. Becker, et al.), *Nature* **588**, 227 (2020).
59. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
60. Райприх и др. (T.H. Reiprich, A. Veronica, F. Pascaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A2 (2021).
61. Ревнивцев и др. (M. Revnivtsev, S. Sazonov, E. Churazov, et al.), *Nature* **458**, 1142 (2009).
62. Сазонов и др. (S. Sazonov, R. Burenin, G. Khorunzhev, et al.), *Astron. Telegram.* **13987**, 1 (2020).
63. Сазонов и др. (S. Sazonov, M. Gilfanov, P. Medvedev, et al.), *MNRAS* **508**, 3820 (2021).
64. Сакстон и др. (R.D. Saxton, A.M. Read, P. Esquej, et al.), *Astron. Astrophys.* **480**, 611 (2008).
65. Сноуден и др. (S.L. Snowden, R. Egger, M.J. Freyberg, et al.) *Astrophys. J.* **485**, 125 (1997).
66. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Y.B. Zeldovich), *Astrophys. Space Sci.* **7**, 3 (1970).
67. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Y.B. Zeldovich), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **18**, 537 (1980).

68. Сюняев и др. (R. Sunyaev, A. Kaniovsky, V. Efremov, M. Gilfanov, E. Churazov, S. Grebenev, A. Kuznetsov, A. Melioranskiy, et al.), *Nature* **330**, 227 (1987a).
69. Сюняев Р.А., Каниовский А., Ефремов В., Гильфанов М., Чуразов Е., Гребенев С., Кузнецов А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **13**, 1027 (1987b) [R.A. Sunyaev, et al., *Sov. Astron. Lett.* **13**, 431 (1987b)].
70. Сюняев Р.А., Каниовский А., Ефремов В., Гребенев С., Кузнецов А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **16**, 403 (1990a) [R. Sunyaev, et al., *Sov. Astron. Lett.* **16**, 171 (1990a)].
71. Сюняев и др. (R. Sunyaev, S. Grebenev, A. Kaniovsky, V. Efremov, A. Kuznetsov, M. Pavlinsky, and N. Yamburenko), *AIP Conf. Proc.* **232** "Gamma-Ray Line Astrophysics" (Ed. P. Douchoux, N. Prantzos), Paris-Saclay, p. 211 (1990b).
72. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, V. Aref'ev, K. Borozdin, et al.), *Adv. Space Res.* **11**, 5 (1991a).
73. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, V.A. Arefev, K.N. Borozdin, et al.), *Sov. Astron. Lett.* **17**, 409 (1991b).
74. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, M. Markevitch, and M. Pavlinsky), *Astrophys. J.* **407**, 606 (1993).
75. Сюняев Р.А., Бороздин К.Н., Александрович Н.Л. и др., *Письма в Астрон. журн.* **20**, 890 (1994) [R.A. Sunyaev, K.N. Borozdin, N.L. Aleksandrovich, et al., *Astron. Lett.* **20**, 777 (1994)].
76. Ткаченко А.Ю., Терехов О.В., Сюняев Р.А. и др., *Письма в астрон. журн.* **28**, 403 (2002) [A.Y. Tkachenko, O.V. Terekhov, R.A. Sunyaev, et al., *Astron. Lett.* **28**, 353 (2002)].
77. Трюмпер (J. Trümper), *Adv. Space Res.* **2**, 241 (1982).
78. Фрейберг и др. (M. Freyberg, E. Perinati, F. Pacaud, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **11444** (2020).
79. Фридрих и др. (P. Friedrich, H. Bräuninger, B. Budau, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **7011**, Proc. SPIE, 70112T (2008).
80. Фридрих и др. (P. Friedrich, C. Rohé, R. Gaida, et al.), *Soc. Photo-Optic. Instrument. Engineer. (SPIE) Conf. Ser.* **9144**, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, Ed. T. Takahashi, J.-W. A. den Herder, M. Bautz, 91444R (2014).
81. Фюрмец и др. (M. Fürmetz, E. Pfeffermann, P. Predehl, C. Rohé, and L. Tiedemann), *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray* **7011**, *Inter. Soc. Optic. Photon.* 70113Y (2008).
82. Хабибуллин и др. (I. Khabibullin, S. Sazonov, and R. Sunyaev), *MNRAS* **426**, 1819 (2012).
83. Хабибуллин и др. (I. Khabibullin, S. Sazonov, and R. Sunyaev), *MNRAS* **437**, 327 (2014).
84. Хабибуллин и др. (I. Khabibullin, P. Medvedev, and S. Sazonov), *MNRAS* **455**, 1414 (2016).
85. Хабибуллин и др. (I. Khabibullin, P. Medvedev, E. Churazov, et al.), *Astron. Telegram.* **13499** (2020a).
86. Хабибуллин и др. (I. Khabibullin, R. Sunyaev, E. Churazov, et al.), *Astron. Telegram.* **13494** (2020b).
87. Хайман и др. (Z. Haiman, S. Allen, N. Bahcall, et al.), *arXiv e-prints, astro* (2005).
88. Хилтон и др. (M. Hilton, C. Sifón, S. Naess, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 3 (2021).
89. Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Буренин Р.А. и др., *Письма в астрон. журн.* **46**, 155 (2020) [G.A. Khorunzhev, A.V. Meshcheryakov, R.A. Burenin, et al., *Astron. Lett.* **46**, 149 (2020)].
90. Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Медведев П.С. и др., *Письма в Астрон. журн.* **47**, 155 (2021) [G.A. Khorunzhev, A.V. Meshcheryakov, P.S. Medvedev, et al., *Astron. Lett.* **47**, 123 (2021)].
91. Хютси (G. Hütsi), *Astron. Astrophys.* **446**, 43 (2006).
92. Чуразов и др. (E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **92**, 381 (1994).
93. Чуразов и др. (E. Churazov, R. Sunyaev, S. Sazonov, M. Revnivtsev, and D. Varshalovich), *MNRAS* **357**, 1377 (2005).
94. Чуразов и др. (E. Churazov, R. Sunyaev, J. Isern, et al.), *Nature* **512**, 406 (2014).
95. Чуразов и др. (E. Churazov, I. Khabibullin, N. Lyskova, R. Sunyaev, and A.M. Bykov), *Astron. Astrophys.* **651**, A41 (2021).
96. Швоппе и др. (A. Schwoppe, A. Semena, C. Maitra, et al.), *Astron. Telegram.* **14219**, 1 (2020).
97. Штрюдер и др. (L. Strüder, U. Briel, K. Dennerl, et al.), *Astron. Astrophys.* **365**, L18 (2001).
98. Шукер и др. (P. Schuecker, H. Böhringer, C.A. Collins, and L. Guzzo), *Astron. Astrophys.* **398**, 867 (2003).
99. Эйсмонт Н.А., Коваленко И.Д., Назаров В.Н. и др., *Письма в Астрон. журн.* **46**, 292 (2020) [N.A. Eismont, I.D. Kovalenko, V.N. Nazarov, et al., *Astron. Lett.* **46**, 263 (2020)].
100. Яо и др. (Y. Yao, S.R. Kulkarni, K.B. Burdge, et al.), *Astrophys. J.* **920**, 120 (2021a).
101. Яо и др. (Y. Yao, S.R. Kulkarni, K.C. Gendreau, et al.), *Astrophys. J.* **920**, 121 (2021b).

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 *M. 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 косо 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 косо 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 (Вогс и др., 1999). На более высоких энергиях рентгеновские обзоры всего неба проводились либо с помощью коллимированных приборов (например, UHURU, Форман и др., 1978, и HEAO-1, Вуд 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.

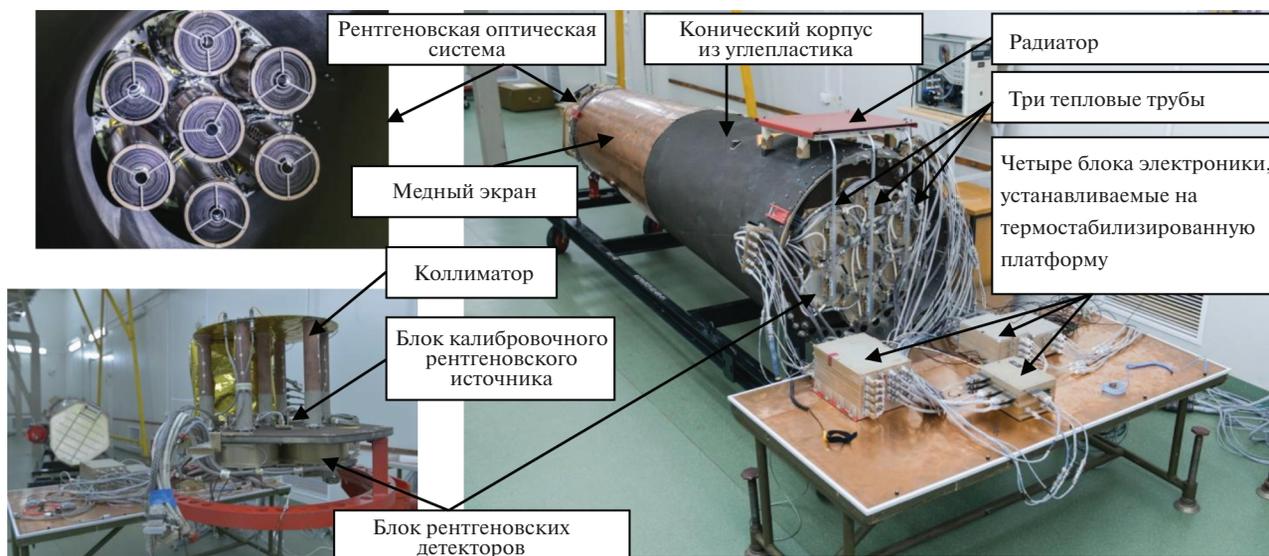


Рис. 1. Телескоп ART-XC. *Вверху слева:* вид на 7 зеркальных систем, направленных на детекторы. *Внизу слева:* вид сбоку на блок детекторов до сборки; в блоке находятся 7 детекторов, соосных с 7 зеркальными системами. Над блоком в направлении зеркальных систем установлены коллиматоры (свой для каждого 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.

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.



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

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 ^а
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 ^б
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'' ^в
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

^а В калибровочной линии радиоактивного ⁶⁰Co.^б В линии радиоактивного ²³⁷Np.^в 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-

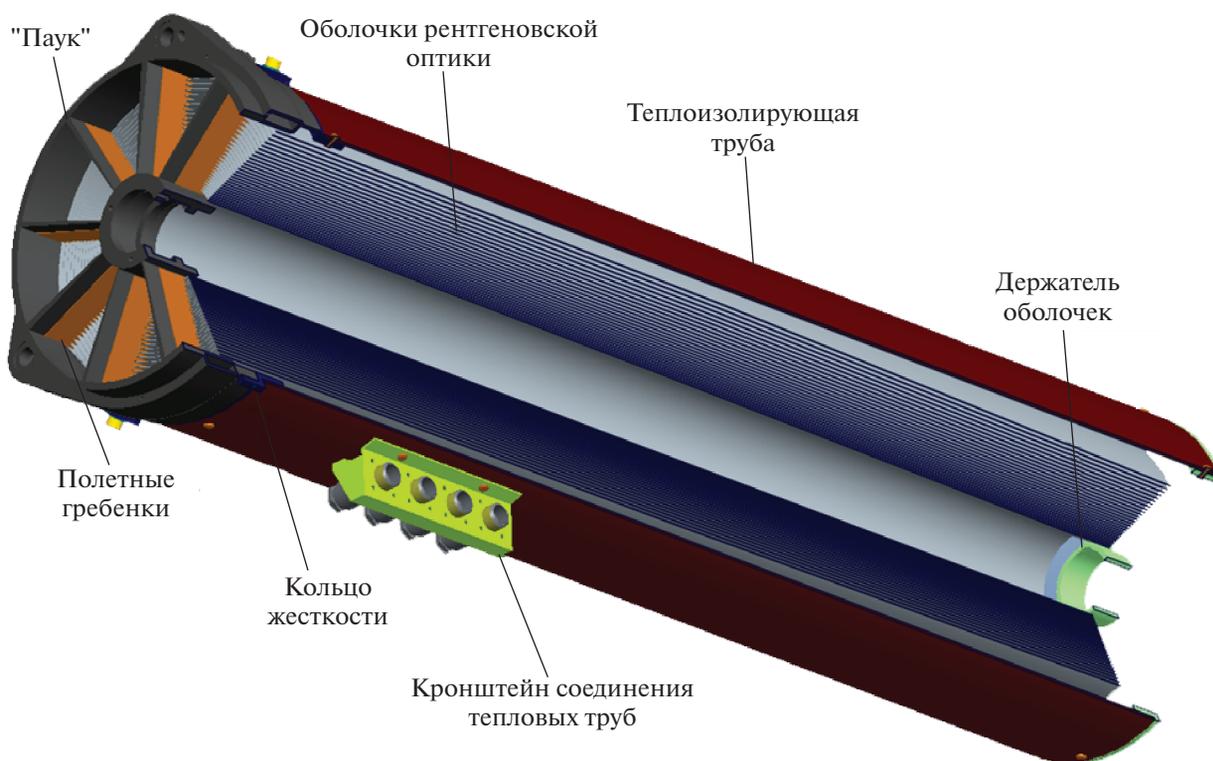


Рис. 3. Поперечный разрез зеркальной системы телескопа ART-XC. Внутренняя перегородка (предназначенная для сокращения посторонней засветки) и нагревательные элементы не показаны.

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”.

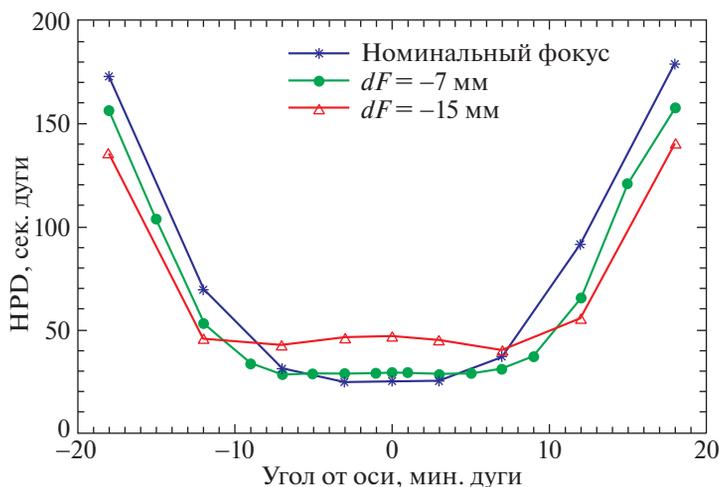


Рис. 5. Диаметр кружка половинной мощности (HPD) зеркальной системы для номинального фокусного расстояния (2700 мм) и для двух расфокусирующих положений $dF = -7$ и -15 мм. Диаметр HPD был измерен на энергии 8.1 кэВ для зеркальной системы MS1 на установке MSFC по измерению степени рассеяния света.

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.

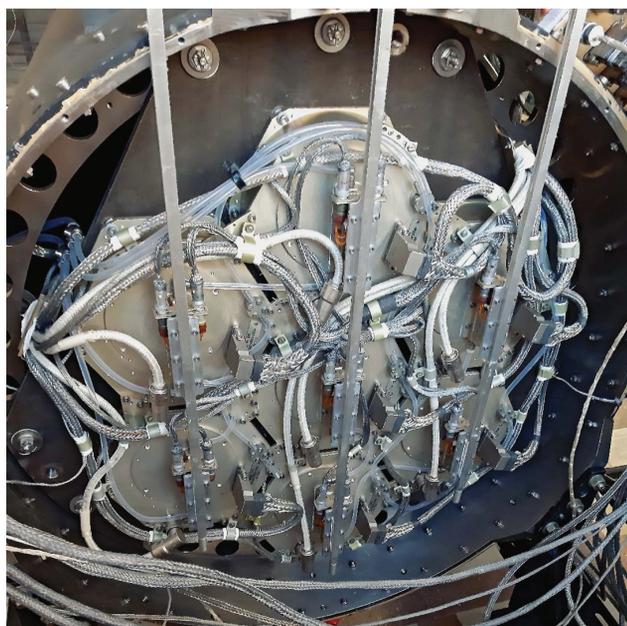


Рис. 6. Семь узлов рентгеновских детекторов (УРД), установленных в фокальной плоскости телескопа ART-XC (вид с задней стороны детекторов).

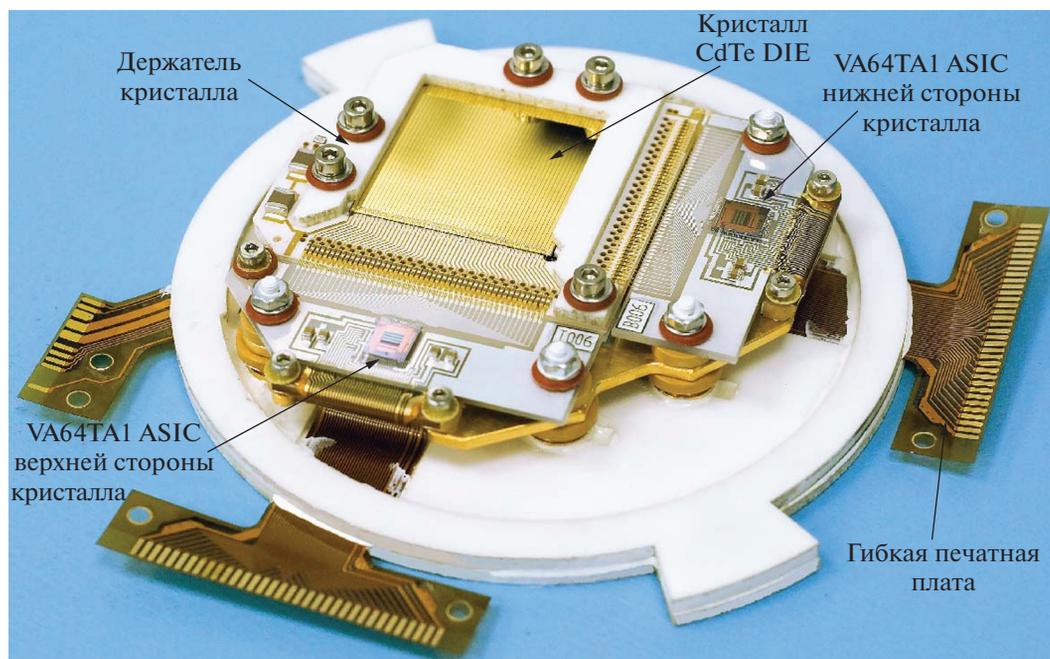


Рис. 7. Гибридная интегральная микросхема детектора рентгеновского излучения (модель СД01).

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-

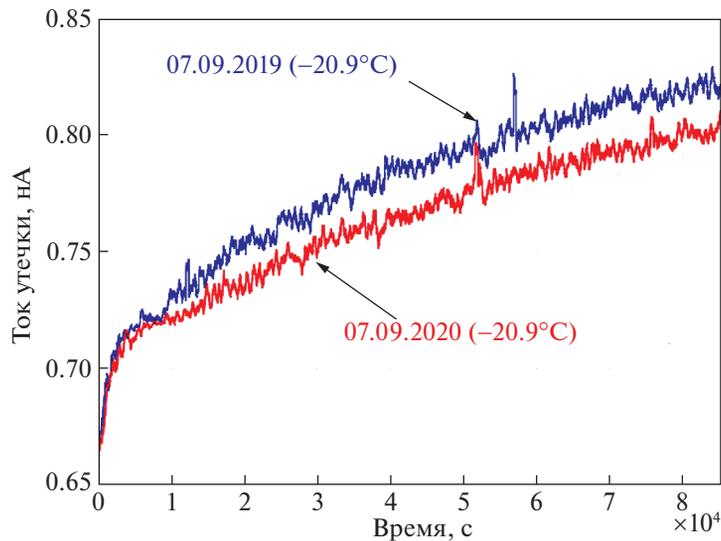


Рис. 8. Зависимость тока утечки от времени в течение одного дня работы детектора на основе кристалла CdTe при напряжении -100 В.

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

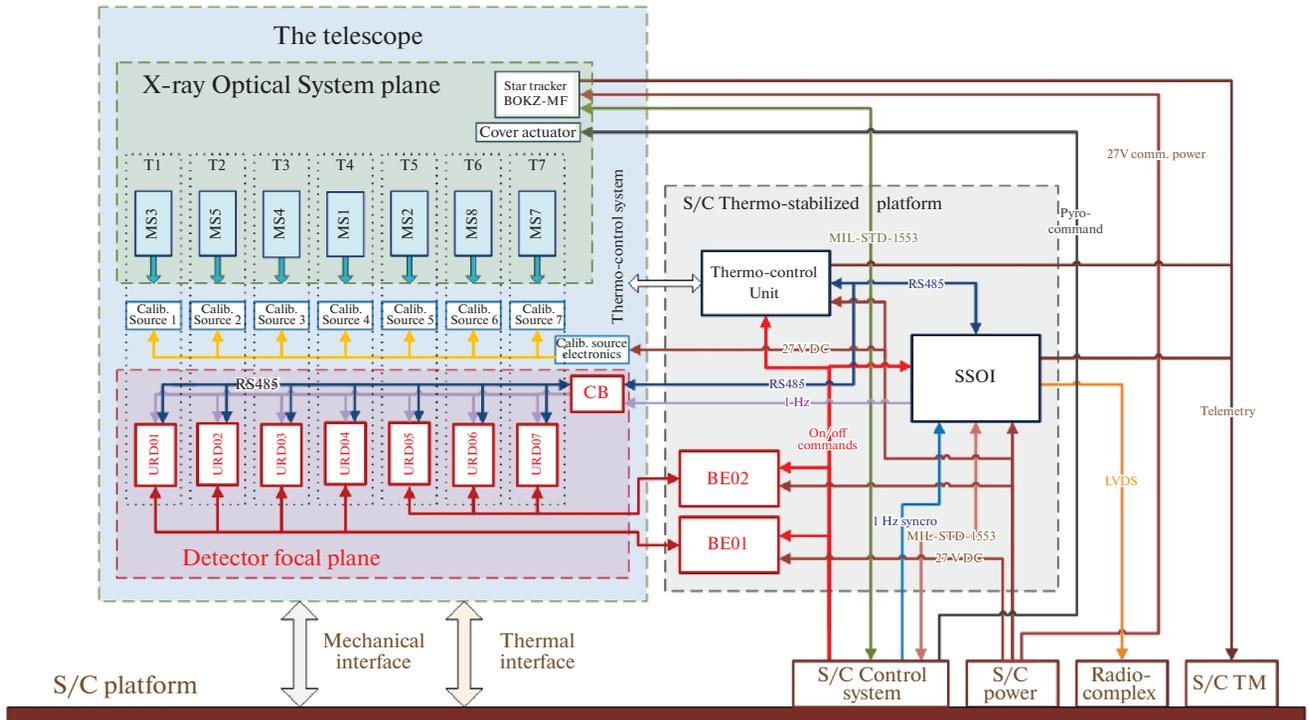


Рис. 9. Блок-схема систем, узлов и интерфейсов телескопа ART-XC.

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

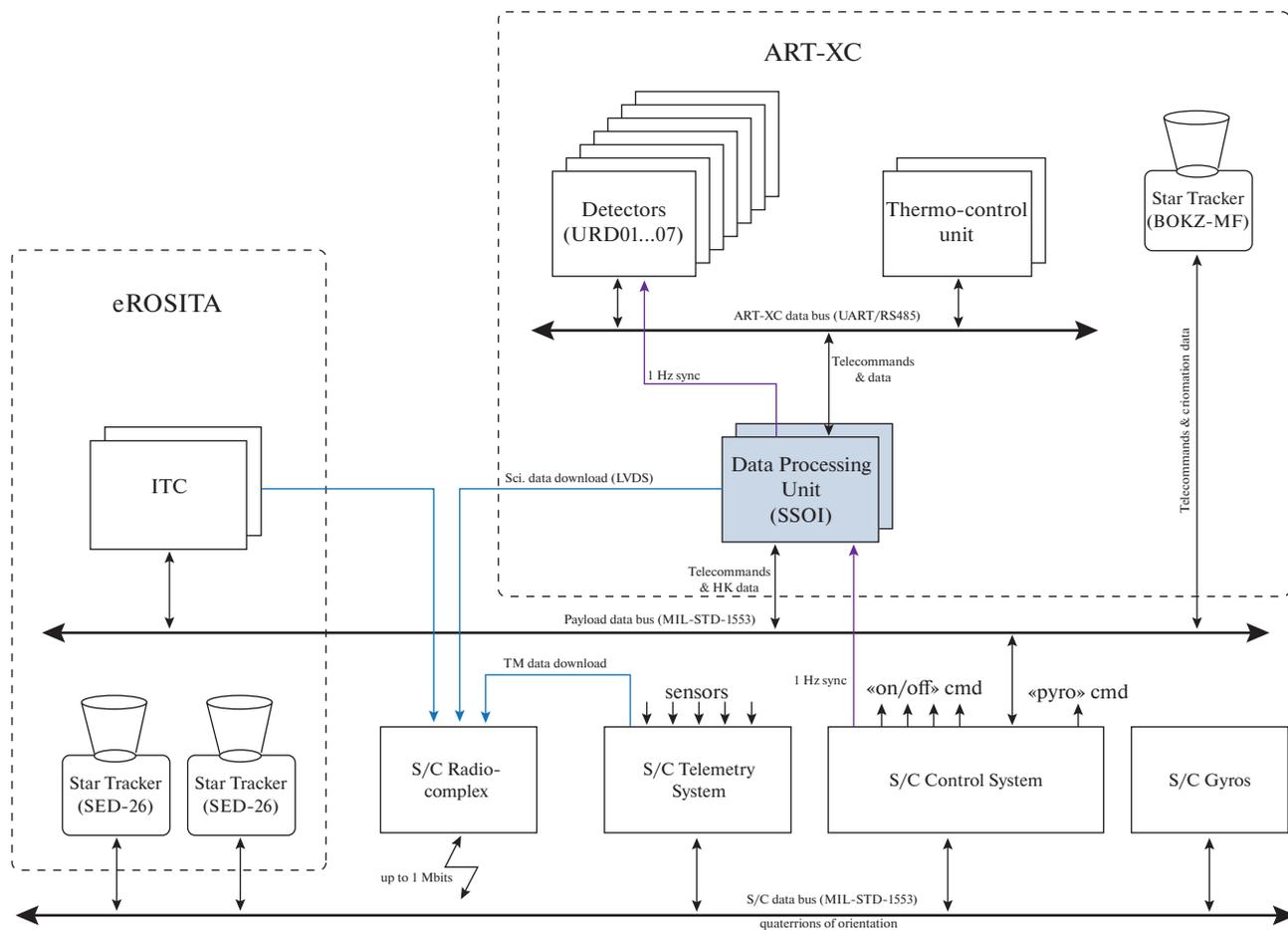


Рис. 10. Бортовая структура обработки данных.

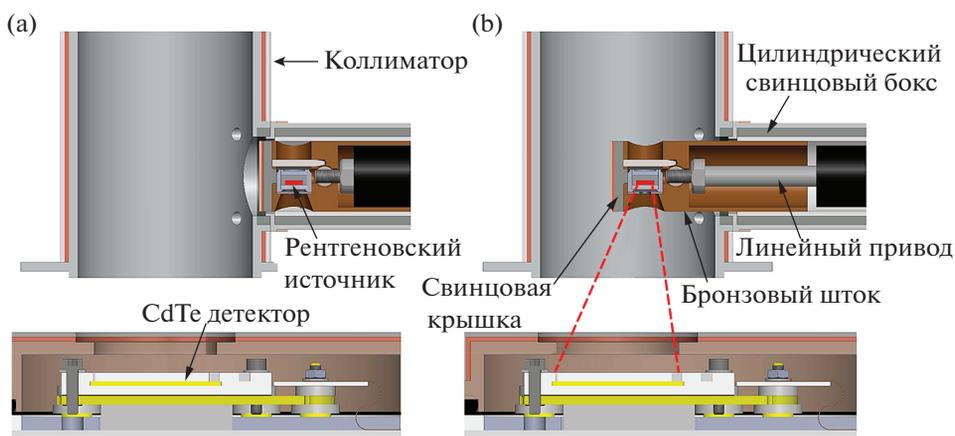


Рис. 11. Калибровочный источник, убранный в свинцовый цилиндрический бокс, прикрепленный к коллиматору модуля телескопа (а). Свинцовый бокс гарантирует отсутствие значимого потока излучения от источника во время астрофизических наблюдений. Источник может быть введен в коллиматор, как показано на панели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

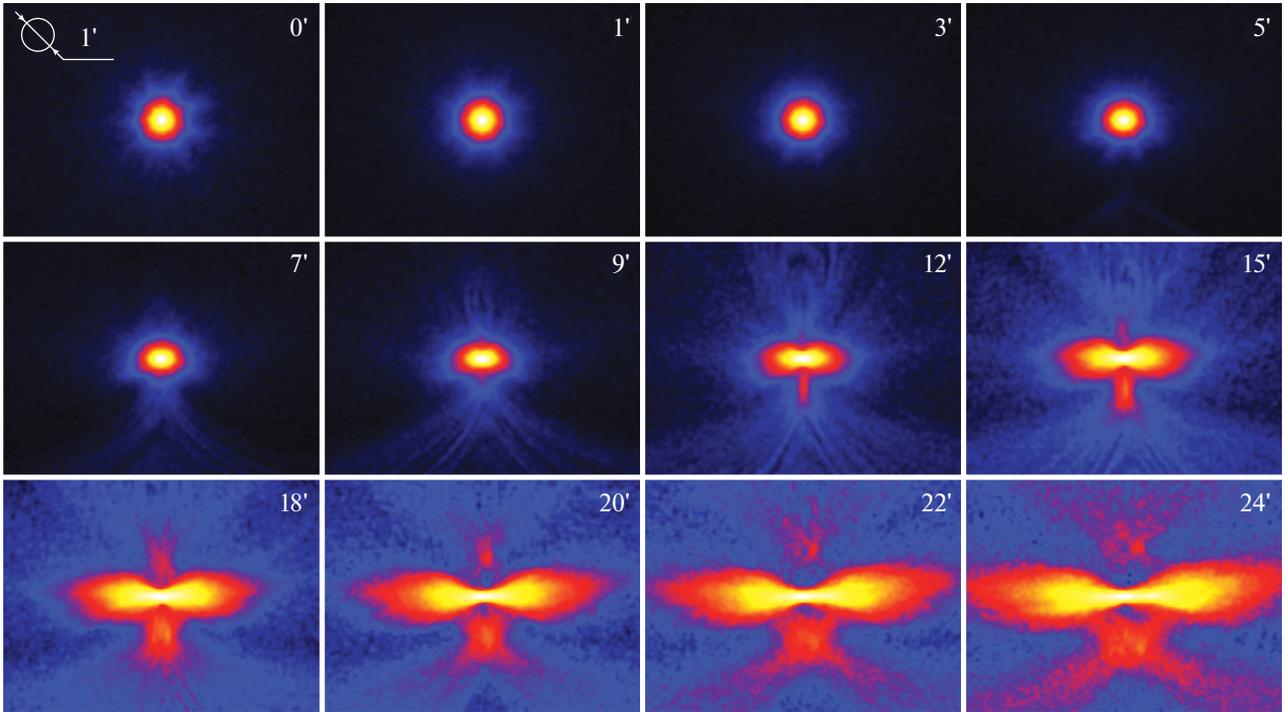


Рис. 12. Образцы функции PSF размытия точечного источника в зеркальной системе MS1 для разных углов смещения (Кривонос и др., 2017). Функция PSF была получена усреднением измерений, выполненных под четырьмя азимутальными углами. Угол смещения показан в верхнем правом углу каждого изображения размером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

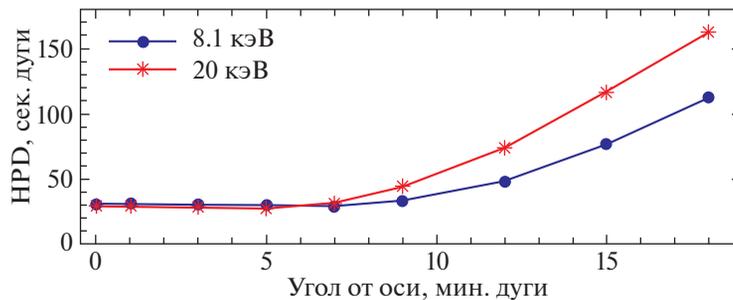


Рис. 13. Диаметр половинной мощности HPD зеркальной системы MS1 на энергиях 8.1 и 20 кэВ для нескольких значений углового расстояния от оси системы (получено на испытательном стенде MSFC по измерению степени рассеяния света). Зеркальная система расфокусирована на 7 мм.

центра: испытательный стенд по измерению степени рассеяния света NASA/MSFC (США), рентгеновский испытательный стенд ИКИ РАН (Россия) и рентгеновский испытательный стенд PANTER Института вневзрывной 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.

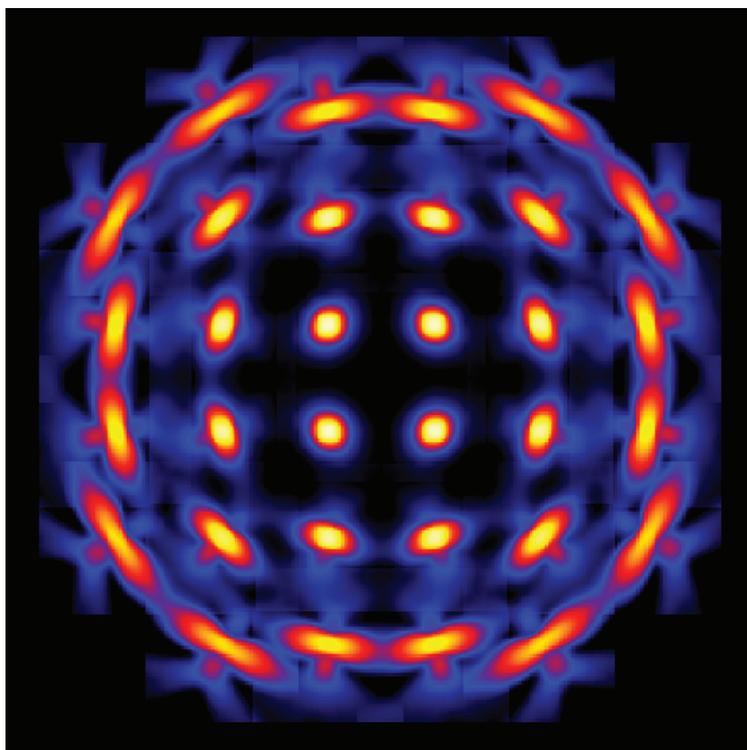


Рис. 14. Модель функции размытия точечного источника (PSF) телескопа ART-XC на энергии 8.1 кэВ, применимая к данным обзора и сканирующих наблюдений, для разных положений точечных источников в поле зрения телескопа.

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 СРГ 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

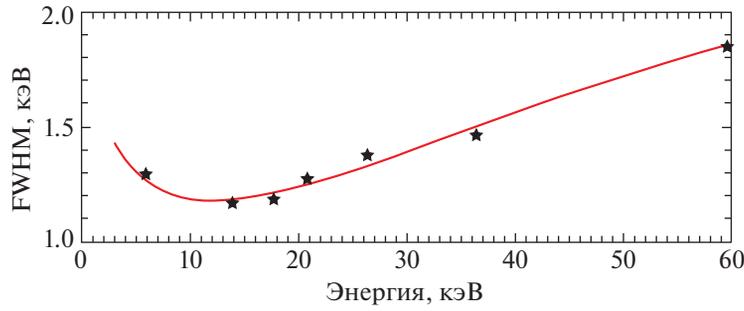


Рис. 15. Энергетическое разрешение (FWHM) детектора в запасном УРД (номер 29) телескопа ART-XC как функция от энергии. Красная кривая — это приближение кубической полиномиальной функции от $E^{1/2}$ в диапазоне 3–60 кэВ.

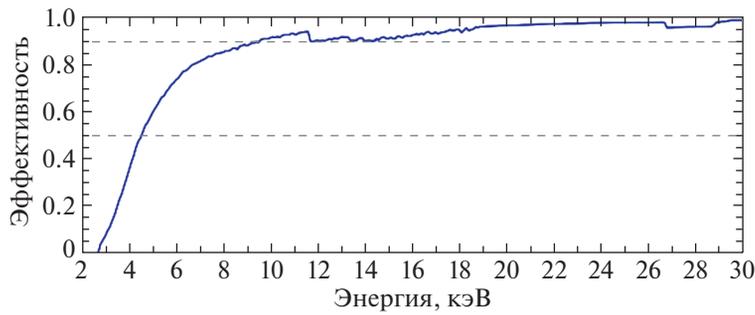


Рис. 16. Оценка эффективности детектора в запасном УРД-29 телескопа ART-XC на основе модели эффективности детектора в спектрометре XR-100T-CdTe (Amptek, США).

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.

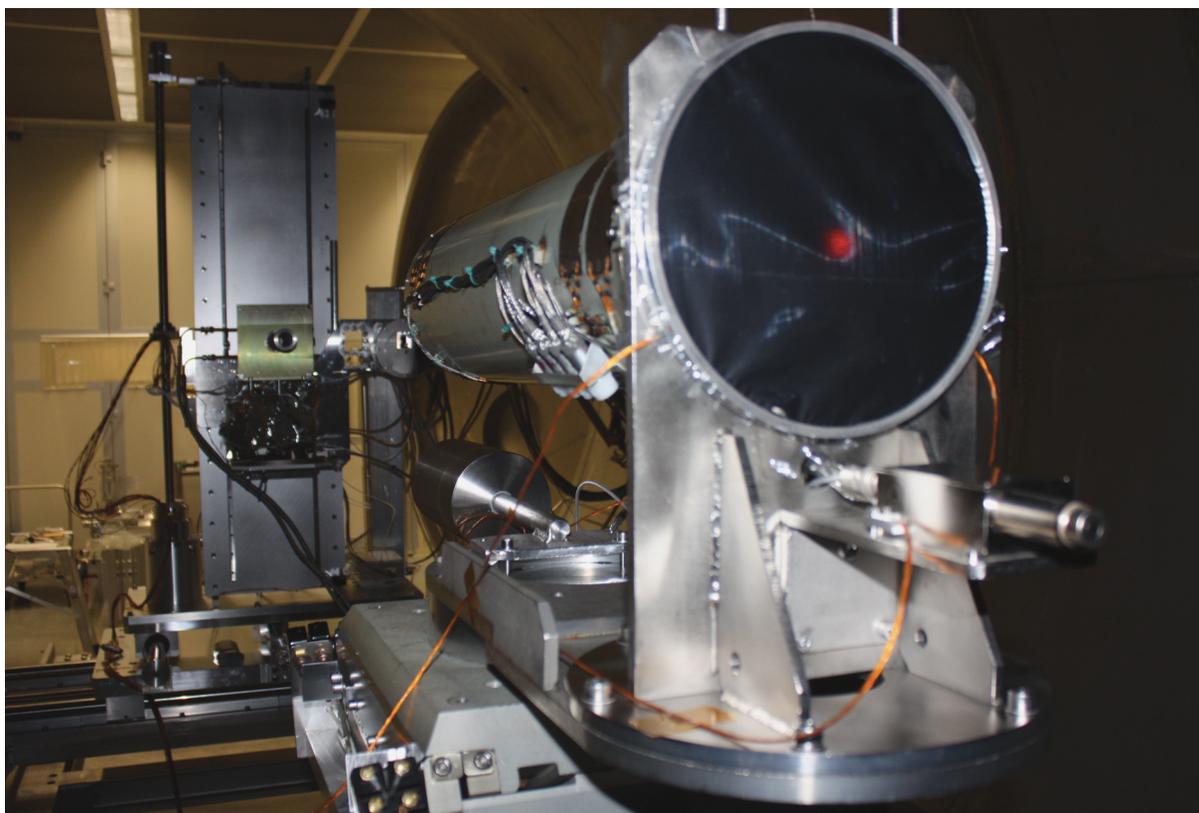


Рис. 17. Запасная зеркальная система MS6 телескопа ART-XC и детекторный блок УРД-29, установленные на рентгеновском стенде PANTER.

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,

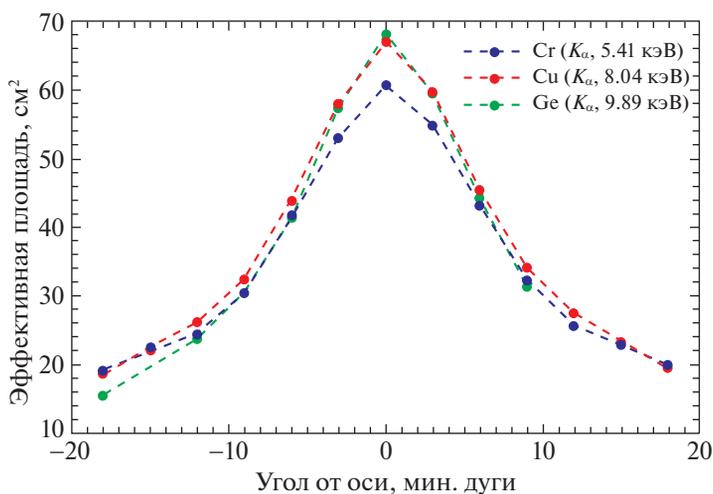


Рис. 18. Эффективная площадь запасной зеркальной системы телескопа ART-XC как функция угла до оси системы (по данным измерений pCCD камерой TRoPIC на испытательном стенде PANTER). Измерения выполнены в K_{α} -линиях Cr (5.41 кэВ, синие точки), Cu (8.04 кэВ, оранжевые точки) и Ge (9.89 кэВ, зеленые точки).

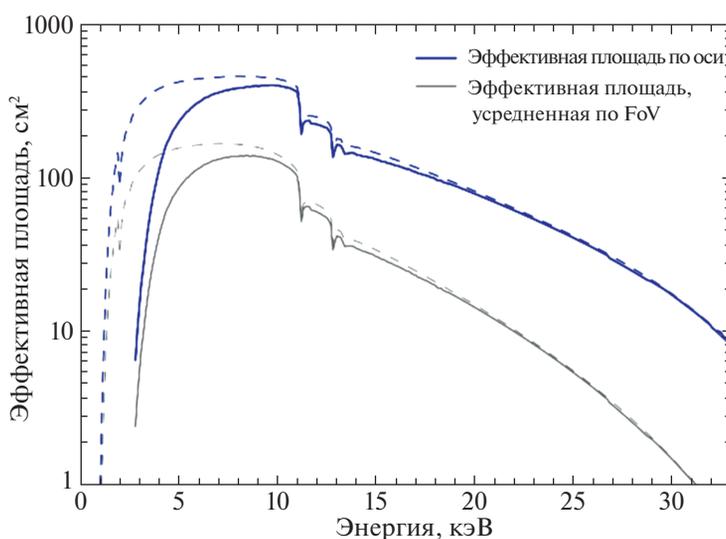


Рис. 19. Зависимость от энергии эффективной площади телескопа ART-XC для дважды отраженных событий по оси и после усреднения по полю зрения (сплошные кривые). Основано на результатах моделирования эффективной площади зеркальной системы ART-XC (пунктирные кривые) и эффективности детектора УРД-29 (рис.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

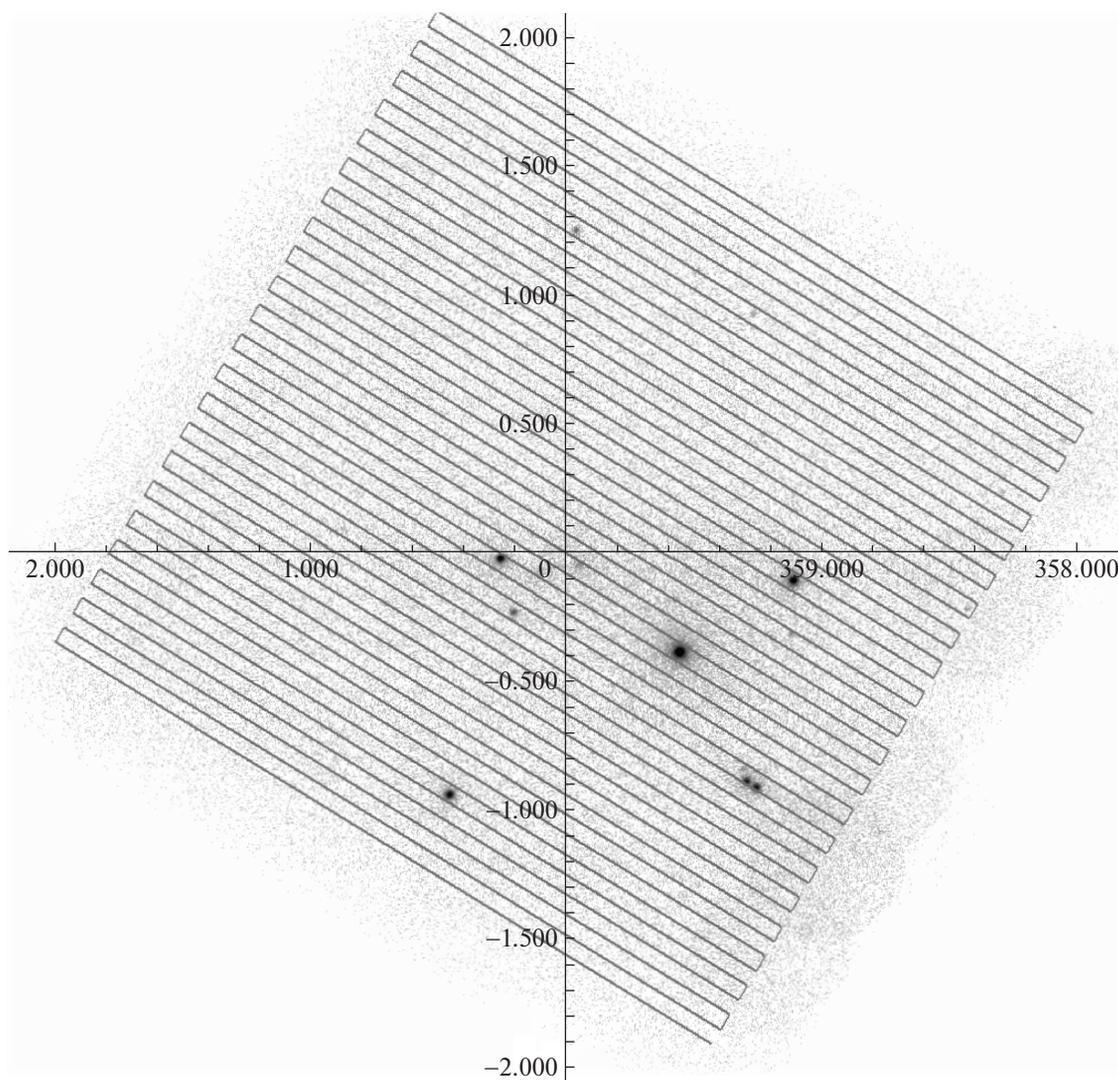


Рис. 20. Пример наблюдения в режиме сканирования: скан области галактического центра 10 сентября 2019 г. (в галактических координатах).

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.

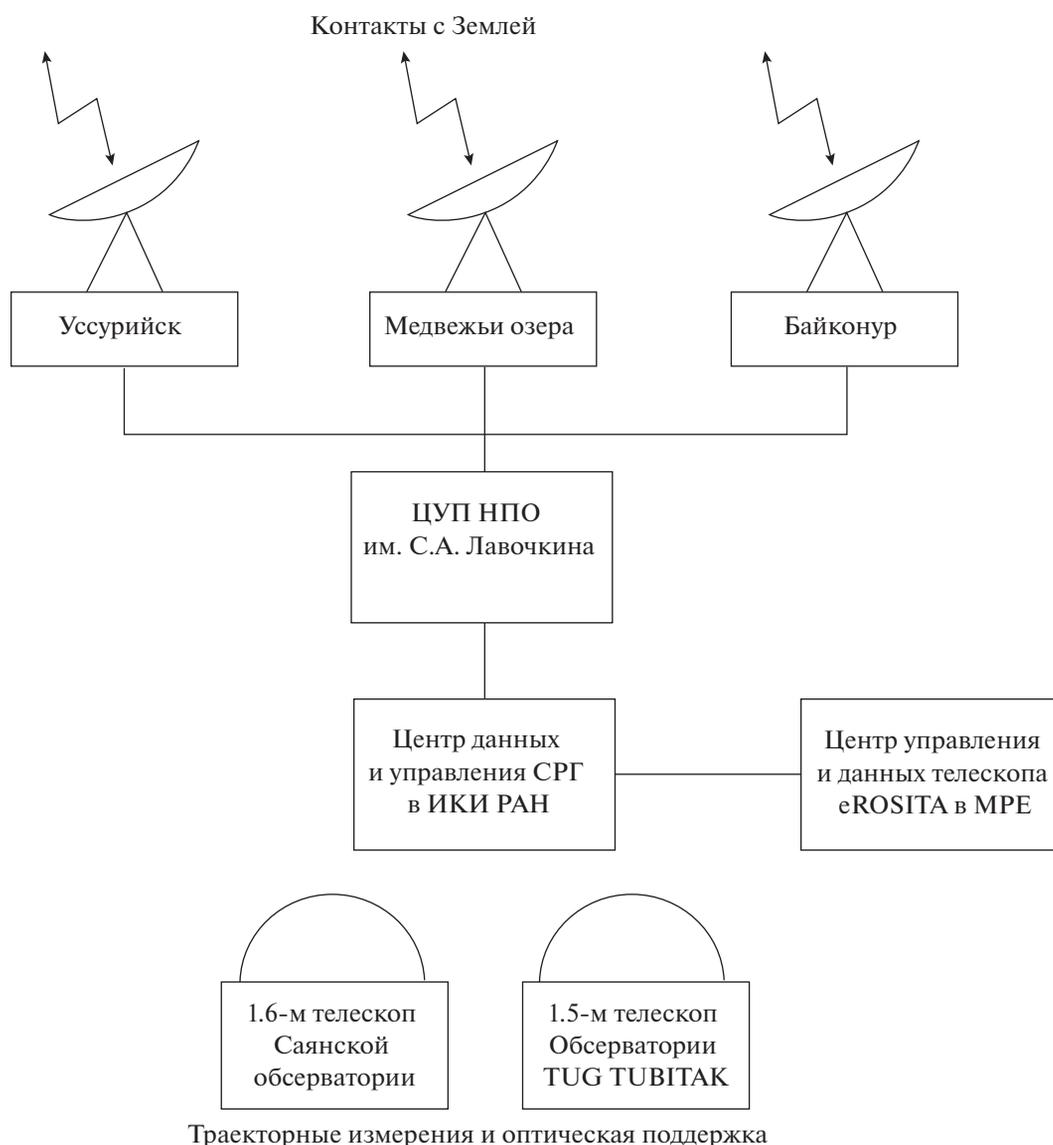


Рис. 21. Наземный научный сегмент.

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.

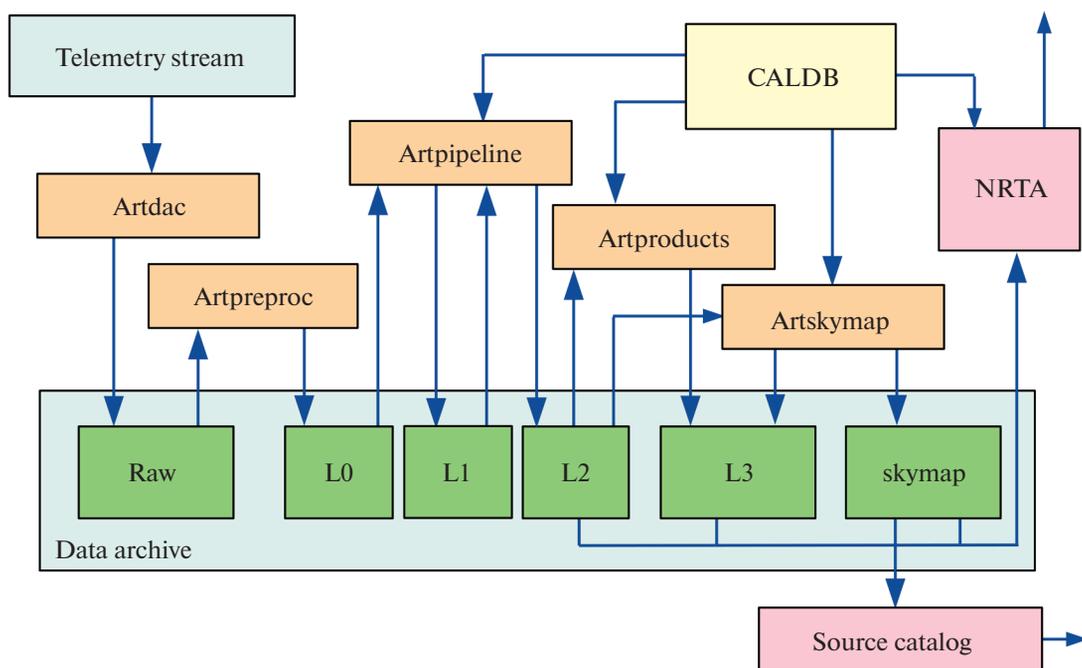


Рис. 22. Схема обработки данных телескопа ART-XC.

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).

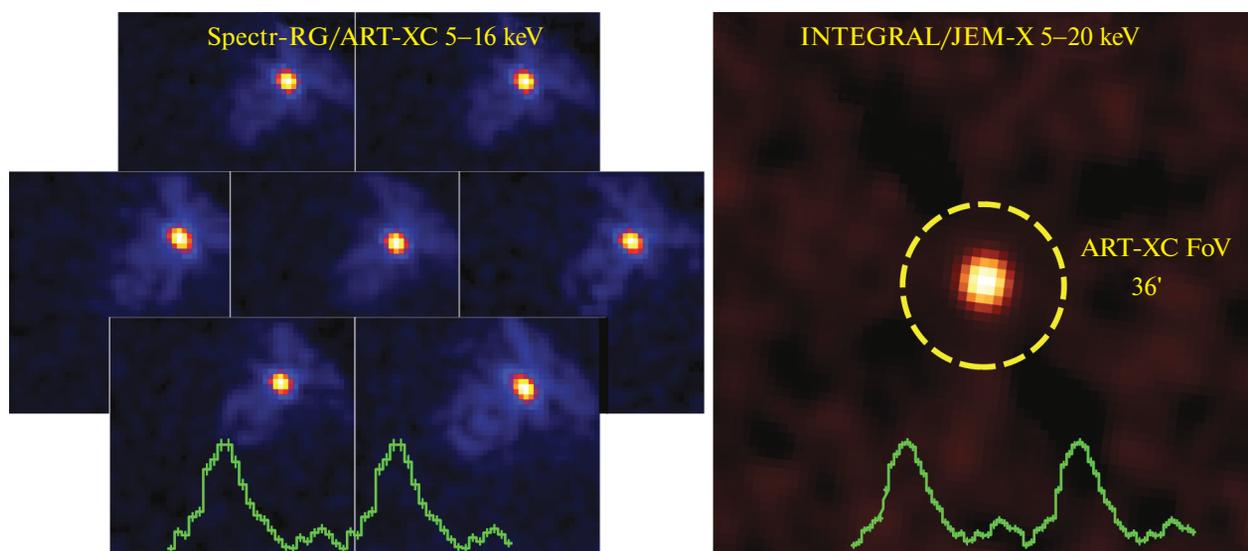


Рис. 23. Изображения рентгеновского пульсара Сеп X-3, полученные семью модулями телескопа ART-XC в диапазоне энергий 5–16 кэВ (слева) и телескопом JEM-X обсерватории INTEGRAL (5–20 кэВ, справа) в ходе одновременных наблюдений. Фазовые кривые пульсирующего сигнала с периодом 4.8 с (зеленые гистограммы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

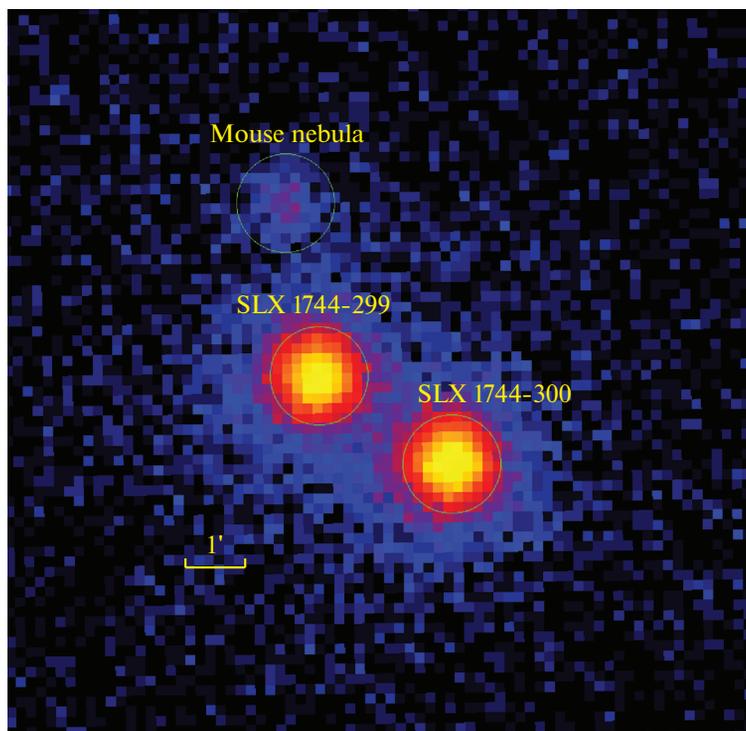


Рис. 24. Изображение, содержащее рентгеновские барстеры SLX 1744-299 и SLX 1744-300 и пульсарную туманность Мышка. Оно было получено телескопом ART-XC во время обзора галактического балджа (этап наблюдений CalPV) в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Угловое расстояние между барстерами составляет приблизительно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

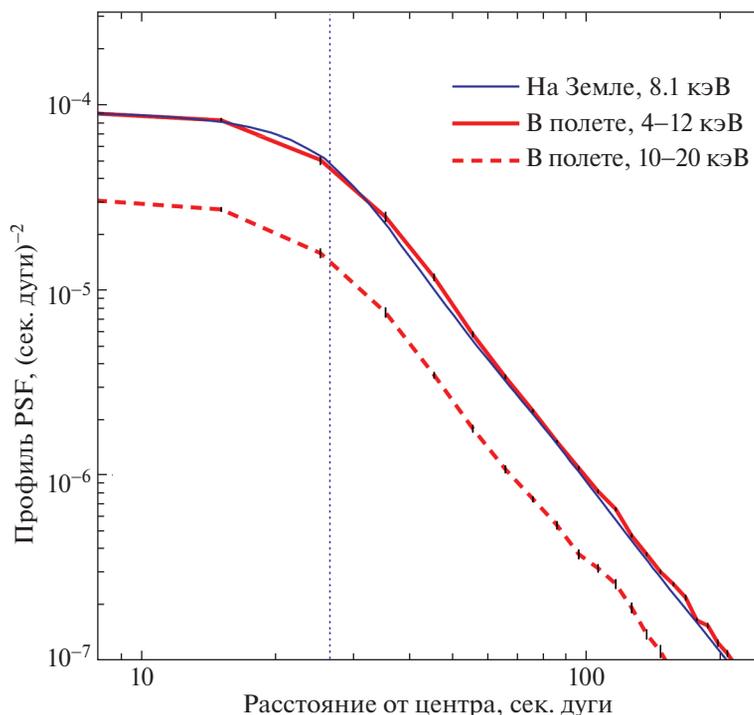


Рис. 25. Радиальные профили функции PSF, усредненные по полю зрения телескопа ART-XC в режиме сканирования: красные сплошная и штриховая линии показывают профили в диапазонах 4–12 и 10–20 кэВ соответственно, полученные во время наблюдений яркого рентгеновского источника на этапе CalPV, синяя линия — 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

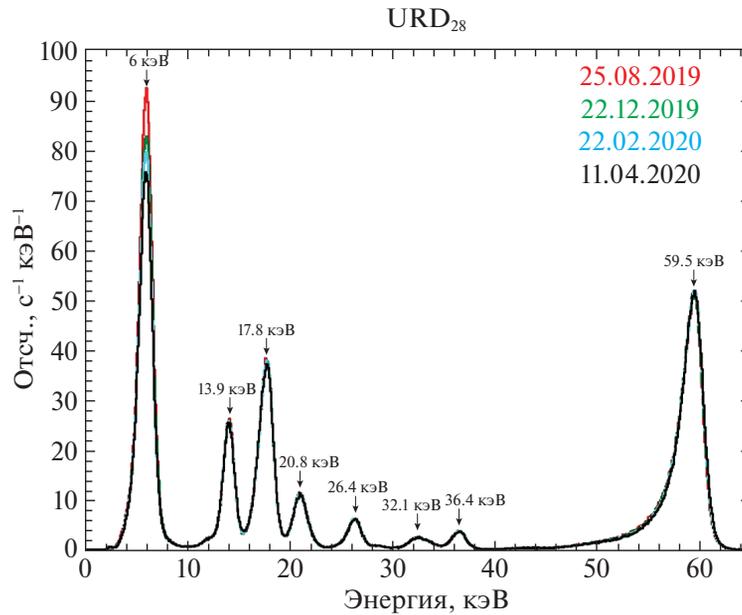


Рис. 26. Калибровочный спектр источника $^{241}\text{Am} + ^{55}\text{Fe}$, измеренный в разные эпохи. Обозначены основные калибровочные линии. Наблюдаемое уменьшение интенсивности линии 5.9 кэВ связано с коротким временем полураспада изотопа ^{55}Fe .

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.

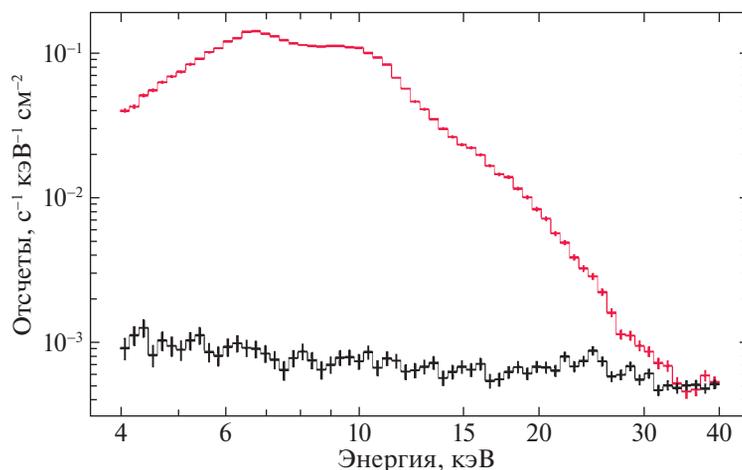


Рис. 27. Суммарный детекторный спектр, зарегистрированный телескопом ART-XC за 20 кс во время наблюдения яркой галактической НМХВ OAO 1657-415 (красная гистограмма), и фоновый спектр, полученный при наблюдении пустого поля (черная гистограмма).

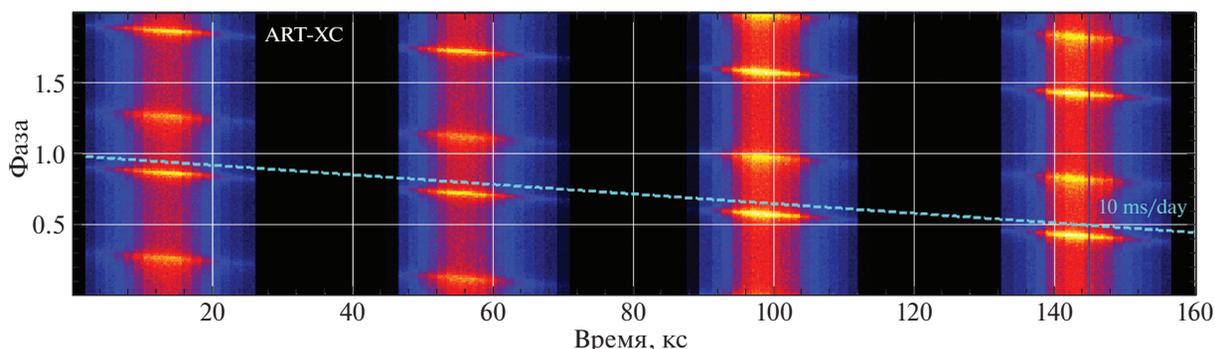


Рис. 28. Динамически свернутая кривая блеска пульсара в Крабовидной туманности. Наблюдаемый фазовый дрейф вызван отклонением частоты бортовых часов от номинального значения.

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

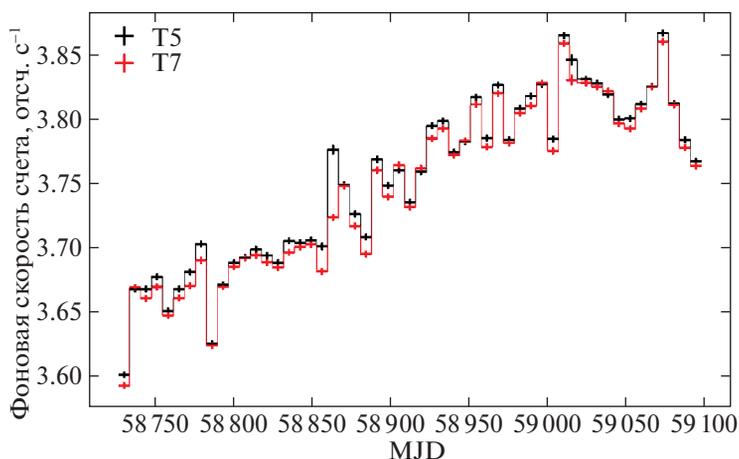


Рис. 29. Эволюция усредненного по неделям темпа счета событий в диапазоне 40–100 кэВ, в котором доминируют заряженные частицы. Показаны темпы счета для двух модулей телескопа.

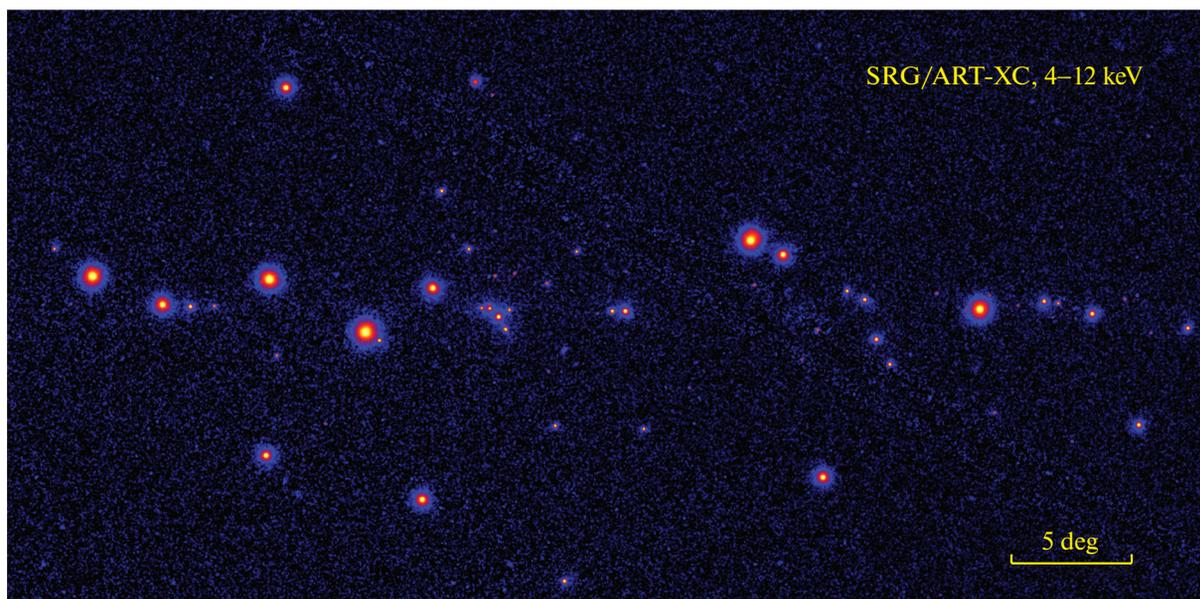


Рис. 30. Карта области Галактической плоскости, полученная в течение первого года обзора всего неба телескопом SRG/ART-XC в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Показана область размером $\simeq 50^\circ \times 25^\circ$ с центром в точке с галактическими координатами $l = 355^\circ$, $b = 0^\circ$, проекция 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. Revnivitsev, A. Lutovinov, E. Churazov, S. Sazonov, M. Gilfanov, S. Grebenev, R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **491**, 209 (2008).
55. Ревнивцев и др. (M. Revnivitsev, 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. Revnivitsev), *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).