УДК 552.1: 523.14

КОНСТРУКЦИЯ МНОГОЗЕРКАЛЬНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА СОДАРТ

© **2006 г.** **В. К. Сысоев**, канд. физ.-мат. наук

ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина", г. Химки, Московская область

E-mail: asd@mouse.berc.rssi.ru

Рассмотрена конструкция многозеркального рентгеновского телескопа СОДАРТ с оптикой скользящего падения, разрабатываемого для космической обсерватории "Спектр-Рентген-Гамма". Телескоп имеет трансформируемую раскрывающуюся в космосе высокостабильную углепластиковую конструкцию с контролем и управлением размерными параметрами, температурным режимом и механизмом смены фокальных приборов. Большая эффективная площадь зеркальной системы, объективный брэгговский спектрометр с высоким спектральным разрешением и комплекс из восьми фокальных приборов, входящий в состав телескопа, позволяет решить многие задачи рентгеновской астрономии.

Коды OCIS: 340.7440.

Поступила в редакцию 02.03.2005.

Введение

За последнее время значительно возрос интерес к зеркальным телескопам рентгеновского диапазона с оптикой скользящего падения. Подобные телескопы, устанавливаемые на борту космических аппаратов, позволяют проводить исследования астрофизических объектов в рентгеновском диапазоне [1, 2]. Последние достижения в области технологии изготовления металлических зеркал рентгеновского диапазона привели к осуществлению целого ряда проектов различных рентгеновских телескопов с зеркальной оптикой скользящего падения [1–4]. Особенно значительные результаты получены при реализации проектов XMM и AXAF. Одним из многообещающих проектов рентгеновских обсерваторий является разрабатываемый в России автоматический космический аппарат "Спектр-Рентген-Гамма" (АКА СРГ) с комплексом телескопов, создаваемых в широкой международной кооперации для исследований в области астрофизики высоких энергий. В состав этой обсерватории входят несколько телескопов с зеркальной оптикой скользящего падения [5] . Наиболее значительным из них является рентгеновский телескоп СОДАРТ.

Описание устройства этого телескопа является целью данной работы.

Для фокусировки рентгеновских лучей в телескопах скользящего падения используется то обстоятельство, что при падении на поверхность металлических зеркал под малыми углами, не превышающими угла полного внутреннего отражения на границе вакуум–зеркало, эти лучи ведут себя подобно обычным световым [1]. При этом для построения изображения используются двухзеркальные системы параболоид + гиперболоид. Для достижения большей эффективной площади зеркальной поверхности используется система коаксиально расположенных зеркал, состоящая из переднего (параболоид) и заднего (гиперболоид) блоков. Построение такой зеркальной системы [2] позволяет достичь фокусного расстояния в 8–10 м, такую длину имеют известные многозеркальные телескопы AXAF, XMM [1, 2]. Изготовление параболических и гиперболических пленочных зеркал и последующая их юстировка в оптических системах, имеющих несколько десятков зеркал, весьма затруднительны. Поэтому перспективным является использование вместо зеркал типа параболоид + гиперболоид пленочных конических зеркал из алюминиевой фольги с золотым покрытием, предложенных в работе [5] . При этом удается достичь приемлемого углового разрешения, а высокая плотность упаковки дает возможность получить большую эффективную площадь зеркальной системы. Подобная зеркальная система XSPECT, созданная Датским институтом космических исследований, применена в телескопе СОДАРТ [6].

В создании данного телескопа участвует широкая международная кооперация: Россия (ИКИ РАН, ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина"), США, Израиль, Дания, Финляндия, ФРГ.

Конструктивный образ телескопа определяется тремя основными факторами: оптической структурой, эксплуатационными условиями и ограничениями, накладываемыми возможностями спутника.

Оптическая структура телескопа СОДАРТ

Рентгеновский телескоп СОДАРТ представляет собой телескоп с многозеркальной оптикой скользящего падения с площадью зеркальной системы 65 м^2, спектральным диапазоном 0,1–20 кэВ и угловым разрешением 2′.

Оптическая структура телескопа (рис. 1) включает: две многозеркальные системы XSPECT (*1*); объективный брэгговский спектрометр BXSPECT

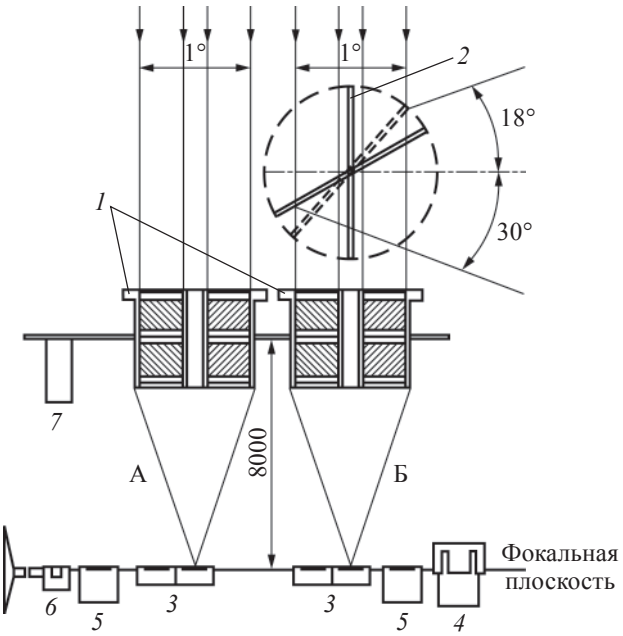

Рис. 1. Оптическая структура телескопа СОДАРТ (пояснения в тексте).

(*2*); две независимые системы фокальных приборов, состоящие из восьми приборов, в их числе четыре позиционно-чувствительных газовых счетчика LEPC/HEPC (*3*), рентгеновский поляриметр SXRP (*4*), два позиционно-чувствительных газовых пропорциональных счетчика КФРД (*5*) и кремний-литиевый спектрометр SIXA (*6*). В состав телескопа входит оптический монитор TAUVEX (*7*), позволяющий идентифицировать поле наблюдения телескопа СОДАРТ и совмещать данные измерений оптического и рентгеновского диапазонов.

Подобная оптическая структура телескопа позволит решать целый ряд задач, в числе которых: построение изображения слабых источников рентгеновского излучения в широком спектральном диапазоне (LEPC/HEPC, КФРД), спектроскопия слабых источников рентгеновского излучения (SIXA), высокоразрешающая спектроскопия ярких рентгеновских источников (BXSPECT), поляризационные измерения рентгеновского излучения (SXRP), сравнительные измерения источников излучения как в рентгеновской, так и в ультрафиолетовой областях спектра (TAUVEX).

Наличие двух независимых зеркальных систем с различными фокальными приборами позволяет проводить взаимодополняющие измерения источников излучения приборами различного типа и увеличить статистическую достоверность данных измерений за счет одновременного наблюдения источника с использованием двух зеркальных систем телескопа.

Функциональный состав телескопа

Рентгеновский телескоп СОДАРТ скользящего падения является сложной управляемой оптико-механической конструкцией, в состав которой входят: две зеркальные системы, панель брэгговского спектрометра с высокоточной системой вращения, комплекс фокальной аппаратуры, оптический монитор, трансформируемая (из-за ограничений, накладываемых размерами головного обтекателя) высокоточная углепластиковая конструкция телескопа, осуществляющая вынос зеркальных систем на заданное фокусное расстояние при приведении телескопа из транспортного положения в рабочее; механизм смены фокальных приборов, производящий перемещение фокальных приборов в точку фокуса; система обеспечения теплового режима (СОТР) зеркальных систем и брэгговского спектрометра и кареток, предназначенная для поддержания расчетной температуры и допустимых температурных градиентов в блоках зеркал и кристаллах брэгговского спектрометра и фокальных приборов; СОТР твердотельного (Si (Li)) охлаждаемого спектрометра, осуществляющая его охлаждение в процессе функционирования до температуры 100 K; система активной юстировки контроля оптико-геометрических характеристик телескопа (САЮ) (лазерный комплекс, устанавливаемый на зеркальной системе), используемая как при сборке телескопа, так и для определения положения оптической оси и геометрических характеристик телескопа в процессе его функционирования; блок управления служебными системами телескопа (БУСС), состоящий из подсистем приведения телескопа в рабочее состояние и эксплуатации телескопа (смена фокальных приборов, поддержание необходимого теплового режима, управление крышками телескопа и т. д.); кабельная сеть.

Компоновочная схема конструкции телескопа СОДАРТ

Рентгеновский телескоп СОДАРТ устанавливается на платформу с научной аппаратурой космического аппарата СРГ. Конструктивно телескоп делится на две части: верхнюю часть, устанавливаемую на платформу аналогично другим телескопам аппарата СРГ, и систему смены фокальных приборов телескопа СОДАРТ (рис. 2), устанавливаемую под платформой. В связи с ограничениями по габаритам, накладываемыми головным обтекателем аппарата СРГ, конструкция телескопа выполнена трансформируемой, имеющей два положения – транспортное и рабочее.

Верхняя часть телескопа СОДАРТ состоит из шарнирно связанных между собой оптического блока (ОБ) и фермы телескопа, а также приводов раскрытия с механизмами фиксации телескопа. В транспортном положении оптический блок телескопа располагается внутри фермы. В рабочем положении

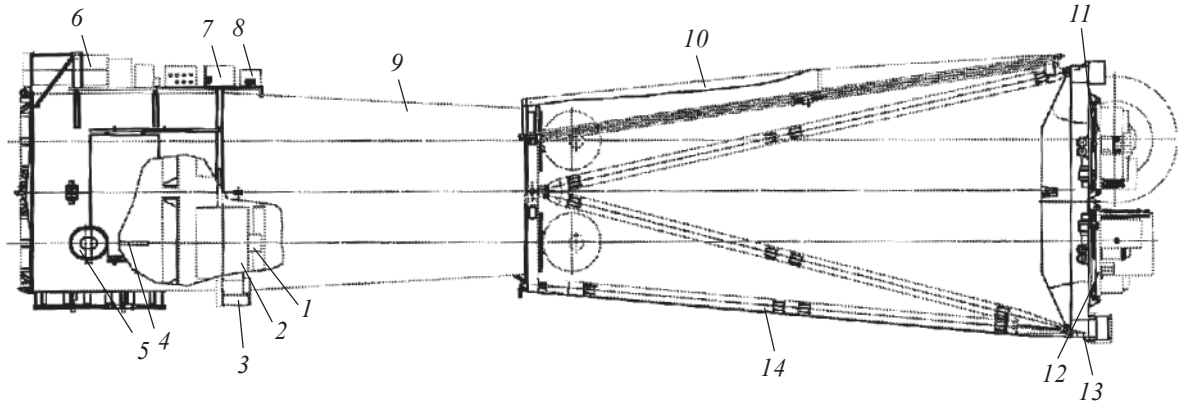

Рис. 2. Схематическая конструкции телескопа СОДАРТ. *1* – САЮ, *2* – зеркальная система, *3* – блок управления приводами брэгговского спектрометра (БС), *4* – панель БС, *5* – узлы подвеса панели БС, *6* – оптический модуль TAUVEX, *7* – СОТР, *8* – БУСС, *9* – корпус, *10* – экран, *11* и *12* – каретки А и Б, *13* – платформа с научной аппаратурой, *14* – углепластиковая ферма телескопа.

оптический блок развернут относительно своего транспортного положения на 180°.

Оптический блок телескопа состоит из центральной плиты с установленными на нее двумя зеркальными системами (XSPECT), двух верхних, связанных верхней панелью углепластиковых труб – кожуха брэгговского спектрометра (BXSPECT) и кожуха зеркальной системы – и двух одинаковых конических углепластиковых тубусов. Сбоку имеется апертура BXSPECT, закрываемая многоразовой крышкой. На боковых стенках кожуха на двух специальных узлах подвеса, содержащих систему вращения и датчики угла поворота, устанавливается панель BXSPECT. На верхней панели установлены две крышки: многоразовая над BXSPECT и одноразовая над XSPECT.

Внутри каждого кожуха над XSPECT-системами устанавливаются три ряда крестовых тепловых коллиматоров, нижний из которых является активным и имеет в своем составе пленочные электронагреватели. Снаружи ОБ устанавливается панель систем с оптическим монитором TAUVEX и электронными блоками различных систем.

Нижние конические углепластиковые обечайки ОБ являются конструктивными элементами, формирующими оптическую скамью телескопа. Внутри каждой обечайки под зеркальными системами также установлены три ряда крестовых тепловых коллиматоров, верхний из которых имеет пленочные электронагреватели. В своей нижней части обечайки соединены панелью с двумя одноразовыми защитными крышками и механизмами фиксации телескопа.

На всех этапах работы с ОБ – с момента его окончательной сборки и проверки в чистом помещении и до начала проведения научных наблюдений – он находится в ампулизированном состоянии, т. е. все крышки герметично закрыты, а сообщение внутренней полости с окружающей средой осуществляется через клапан-фильтр и клапан сброса давления. Открытие внутренней полости ОБ не в условиях чистого помещения проводится лишь однажды с использованием воздушной завесы вокруг юстировочных лючков в нижних защитных крышках при проведении окончательной сборки телескопа с использованием САЮ, установленной на зеркальных системах.

Ферма телескопа формирует большую часть оптической скамьи телескопа и выполнена из углепластиковых труб диаметром 120 мм с низкими коэффициентами термического линейного расширения. В верхней части фермы расположен подковообразный шпангоут, замыкаемый для большей жесткости трубой, ось которой совпадает с осью вращения телескопа при его раскрытии. На шпангоуте расположен механизм фиксации, срабатывающий после полного открытия телескопа. Ферма телескопа снаружи закрывается многослойным (металл–полимер) защитным экраном для ослабления рентгеновского фона и предотвращения засветок фокальных приборов отраженным солнечным излучением. Для размещения защитного экрана с той стороны, в которую раскрывается телескоп, используется легкая рамная конструкция, открывающаяся только на период приведения телескопа в рабочее положение. Для раскрытия телескопа используются дублирующие друг друга приводы, размещенные соответственно на ОБ и ферме телескопа.

Фокальная плоскость рентгеновского телескопа СОДАРТ

При проектировании механизма смены фокальных приборов (МСФП) к нему были предъявлены требования, обеспечивающие возможность независимой смены фокальных приборов под каждой зеркальной системой.

Для выполнения этих требований был предложен механизм смены фокальных приборов, состоящий из двух кареток, перемещающихся по направ-

ляющим, расположенным параллельно оси Z АКА СРГ. Выбранная схема перемещения кареток определялась числом устанавливаемых на каретках фокальных приборов, а также необходимостью размещения на одной из кареток пассивной радиационной криогенной системы охлаждения Si(Li)-спектрометра SIXA.

Кинематическая схема МСФП представляет собой две независимые системы, каждая из которых состоит из каретки с фокальными приборами, перемещающейся по направляющим. Смена фокальных приборов и их юстировка по оси Z осуществляется перемещением каретки по направляющим с помощью блока приводов продольного перемещения и тросовой системы.

Часть фокальных приборов на каретках имеет срывные мембраны, предназначенные для защиты входных окон детекторов от различных внешних воздействий. Размещение радиоактивных источников для калибровки детекторов предусмотрено под платформой. На каретках располагается также СОТР, состоящая из тепловых труб, проложенных под фокальными приборами, и радиаторов-охладителей на каждой из кареток с системой газорегулируемых тепловых труб, автоматически поддерживающих температуру фокальных приборов в диапазоне от 5 до 35 °C.

Скорость перемещения каретки в режиме смены фокальных приборов 2 мм/с. Зона перемещения кареток по оси z 900–1040 мм. Погрешность позиционирования 0,5 мм.

Точностной анализ конструкции телескопа СОДАРТ

Телескоп СОДАРТ содержит большое количество элементов, требующих обеспечения высоких точностей в процессе сборки и стабильности этих параметров при его функционировании на орбите.

Точностные требования при сборке телескопа по взаимной привязке его конструктивных элементов, оптического монитора, фокальных приборов (т. е. основных элементов телескопа) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Точности привязки основных оптических элементов телескопа СОДАРТ

Элемент	Угловое отклонение, угл. мин	Уход по оси, мм		
		X	*Y*	*Z*
Зеркальная система А – зеркальная система Б	0,4	0,05	0,1	0,1
Зеркальная система Б – панель брэгговского спектрометра	1	±1	±1	±1
Зеркальная система Б – монитор TAUVEX	2	±1	±1	±1
Зеркальные системы – оптические элементы САЮ фокальных приборов (кроме поляриметра)	45	±0,25	±0,25	±0,25
Зеркальная система Б – оптические элементы САЮ поляриметра	1,5	±1,0	±1	±1
Фокальные детекторы – оптические элементы САЮ на каретках	1,5	0,05	0,1	0,1

Таблица 2. Уходы точки фокуса зеркальной системы Б в зависимости от ориентации телескопа относительно Солнца, вызванные температурными воздействиями

Угол между осью $-Z$ и направлением на Солнце, град	Угол между осью $-Z$ и направлением на Солнце, град	Уход точки фокуса по оси, мм		
Плоскость *YOZ*	Плоскость *XOZ*	*X*	*Y*	*Z*
–10	–40	0,495	0,054	–0,064
	0	0,707	0,077	–0,092
	40	0,551	0,060	–0,072
0	–40	0,504	0,001	–0,151
	0	0,720	0,001	–0,215
	40	0,562	0,001	–0,168
10	–40	0,517	0,181	–0,216
	0	0,739	0,258	–0,308
	40	0,576	0,201	–0,240

После выведения телескопа на орбиту возможна деформация оптической скамьи телескопа в пределах погрешностей системы обезвешивания, используемой при сборке телескопа. Для контроля возможных деформаций, а также температурных деформаций при изменении ориентации телескопа относительно Солнца предусмотрена система лазерного контроля (САЮ) телескопа, позволяющая выставлять фокальные приборы в точку фокуса с заданной точностью. Выбор диапазона передвижения фокальных приборов проводится с учетом всех этих возмущающих факторов.

При определении возможных температурных деформаций оценивались максимальные температурные перепады на солнечной и теневой сторонах элементов конструкции, формирующих оптическую скамью телескопа.

В качестве примера в табл. 2 приведены уходы точки фокуса в зависимости от ориентации телеско-

па относительно Солнца для зеркальной системы Б, под которой устанавливается поляриметр (SXRP), к которому предъявляются наиболее высокие точностные требования.

Методика сборки телескопа СОДАРТ

Сборка телескопа СОДАРТ проводится в несколько этапов в помещениях, имеющих 2 и 5-й классы чистоты. На первом этапе в стапеле в помещении 5-го класса чистоты проводится сборка фермы телескопа и МСФП. Одновременно с этим в помещении 2-го класса чистоты проводится сборка ОБ, которая включает следующие технологические операции: установку зеркальных систем (XSPECT) на общую плиту; подстыковку к плите XSPECT секции брэгговского спектрометра, верхнего тубуса, верхней и нижней панелей, нижних тубусов; установку тепловых коллиматоров зеркальных систем; взаимную юстировку зеркальных систем и брэгговского спектрометра; установку оптического ультрафиолетового монитора и его юстировку относительно базовой зеркальной системы (Б); установку на верхней панели с крышкой зеркальных систем; установку нижних крышек ОБ; проверку ОБ на герметичность.

После сборки оптического блока в помещении 2-го класса чистоты проводится установка моноблоков детекторов LEPC/HEPC на каретки А и Б и рентгеновского поляриметра на каретку Б.

Все последующие операции по сборке телескопа проводятся в помещениях 5-го класса чистоты. Собранный и полностью ампулизированный ОБ помещается на стенд, где осуществляется его стыковка с фермой телескопа, установка приводов раскрытия телескопа и механизмов фиксации. На стенде смонтирована система обезвешивания телескопа, необходимая для проведения его раскрытия и проверки срабатывания механизмов его фиксации. На этом же стенде с помощью САЮ определяются имеющиеся разбросы по положению оптической оси телескопа при его многократных раскрытиях.

Установку кареток телескопа и его юстировку проводят в помещении 5-го класса чистоты в стапеле, оборудованном системой обезвешивания ОБ и МСФП. Верхнюю часть телескопа и каретки устанавливают на платформу АКА “Спектр-Рентген-Гамма”.

Поскольку наиболее жесткие точностные требования предъявляются к установке поляриметра, привязка каретки Б к зеркальной системе проводится при рабочем положении поляриметра, а привязка каретки А к соответствующей зеркальной системе – при рабочем положении крайнего фокального прибора – Si(Li)-спектрометра SIXA.

После проведения юстировки каретки арретируются в транспортном положении, ОБ складывается внутрь фермы и фиксируется пироболтами в транспортном положении.

Заключительная операция – установка защитного экрана на ферму телескопа и проверка раскрытия створки защитного экрана. После завершения всех операций телескоп СОДАРТ поступает на сборку с космическим аппаратом.

Приведение телескопа в рабочее состояние и логика его функционирования

После отделения АКА СРГ от разгонного блока и прохождения соответствующей команды включаются бортовая информационная управляющая система (БИУС), БУСС телескопа и через него СОТР зеркальных систем и брэгговского спектрометра.

До построения режима постоянной солнечной ориентации по команде с блока управления пиропатронами проводится расчековка верхней части телескопа и двери защитного экрана. Раскрытие телескопа осуществляется двумя электроприводами по команде с БУСС.

При полном раскрытии (развороте на 180°) верхней части телескопа по команде срабатывает пирочека механизма осевой фиксации. В случае непрохождения команды на механизмы фиксации после анализа всех данных о положении верхней части телескопа выдача данной команды проходит через магистральный радиокомплекс по командам с Земли. После фиксации телескопа в рабочем положении закрывается дверь защитного экрана.

Функционирование телескопа начинается после полной дегазации экранно-вакуумной теплоизоляции и перехода спутника в режим постоянной солнечно-звездной ориентации. При этом по команде с БУСС открываются нижние крышки ОБ. Поддержание теплового режима зеркальных систем и брэгговского спектрометра осуществляется за счет работы электронагревателей на плите XSPECT и встроенных электронагревателей BXSPECT.

Общие принципы взаимодействия научного и служебного комплексов телескопа

Электронные устройства телескопа СОДАРТ можно разбить на две большие подсистемы: научный комплекс (НК) и служебный комплекс (СК). В НК входят все научные приборы телескопа (КФРД, HEPC, LEPC, SIXA, SXRP, TAUVEX), а в СК – все устройства, обеспечивающие работоспо-

собность телескопа и функционирующие в большей степени независимо от систем собственно АКА.

Взаимодействие между НП и СП осуществляется опосредованно: при нормальной работе – через циклограммы, определяемые на Земле для обоих комплексов, а при нештатных ситуациях – непосредственно на борту через магистральный радиокомплекс. При этом циклограммы хранятся в основном в упомянутых управляющих блоках, частью в программно-временной системе (ПВС), а синхронизация работы НК и СК осуществляется по единому бортовому времени. При нештатных ситуациях оба комплекса формируют аварийные сигналы на ПВС, которая в этом случае на базе стандартных команд управления и с активным использованием БУСС и БИУС обеспечивает адекватную реакцию различных подсистем АКА и телескопа.

Служебный комплекс СОДАРТ, как указывалось ранее, предназначен для обеспечения работы научных приборов телескопа. В состав СК входят: СОТР, САЮ для точной юстировки положения кареток, которые подводят фокальные приборы к точке фокуса; система управления МСФП, которая обеспечивает перемещение кареток, а также раскрытие верхней части телескопа; система управления приводом панели брэгговского спектрометра; блок управления многоразовыми крышками телескопа.

Все приборы разделены на две группы (по местоположению) и соединяются с БУСС последовательными магистралями, причем БУСС расположен рядом с самой большой группой приборов (в верхней части телескопа). Это, а также использование последовательного канала позволяет сэкономить значительную массу на информационных кабелях. Приборы СК, расположенные внизу конструкции телескопа (в том числе и на каретках), также соединены с БУСС последовательной магистралью. В данном случае такая магистраль позволяет уменьшить давление гибкого кабеля на каретки. Связь с телеметрической и с программно-временной системами осуществляется по последовательному каналу. Практически все вычислительные элементы служебного комплекса имеют возможность смены программ во время функционирования на орбите.

(а)



(б)

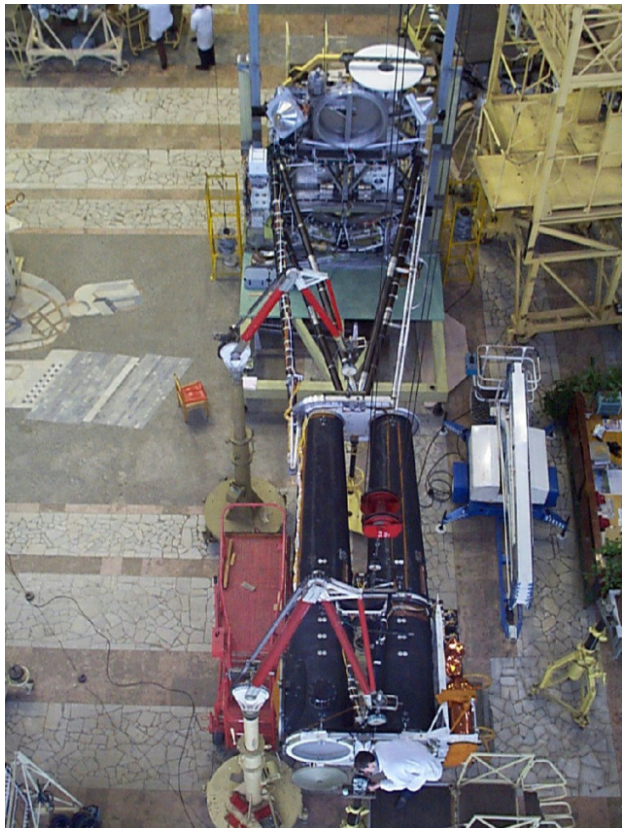

Рис. 3. Классификационный макет телескопа СОДАРТ: а – процесс раскрытия телескопа, б – раскрытый телескоп.

Заключение

Характеристики создаваемого рентгеновского телескопа СОДАРТ находятся в ряду параметров лучших проектов рентгеновских телескопов космических обсерваторий XMM, AXAF. Успешная реализация проекта телескопа связана с реализацией всего комплекса космической обсерватории “Спектр-Рентген-Гамма”. В настоящее время начато изготовление этого телескопа в виде как отдельных функционирующих узлов и систем, так и полноразмерно собранной конструкции в виде функционирующего макета, фотографии которого представлены на рис. 3.

Проведенные вибротепловые испытания классификационного макета рентгеновского телескопа СОДАРТ показали успешную работу всех узлов и механизмов, сохранение точностных параметров столь большой конструкции. Успешная сборка летного ОБ данного телескопа позволит надеяться на успешную реализацию проекта “Спектр-Рентген-Гамма”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grazing Incidence // Appl. Opt. 1988. V. 27. № 8. P. 1397–1563.
2. *Aschenbach B., Citterie O., Ellwood Y.M., Zensen P., de Korte P., Paecock A., Willingole R*. The high-throughput *X*-ray spectroscopy mission // Report of the Telescope Working Group. ESA. SP 1084. 1987. P. 1–47.
3. Современные телескопы // Под ред. Бербиджа Дж., Хьюста А. М.: Мир, 1984. С. 312.
4. *Москаленко В.М*. Методы внеатмосферной астрономии. М.: Наука, 1984. С. 350.
5. *Kovtunenko V.M., Kremnev R.S., Sysoev V.K*. Spectrum-*X*-gamma-A space observatory of high energy astrophysics // Abstr. 27th plenary meeting of the committee on space research. Finland, 1988. P. 182.
6. *Byrna K.B., Christensen F.E., Jonansson P., Madsen M., Nogaard-Nielsen H.V., Shnopper H.W., Wesregaard N.J., Orup P.* XSPECT – an *X*-ray spectroscopy and timing mission consept // Preprint, DSRI. 1987. 43 p.