

На правах рукописи



Сербинов Дмитрий Владимирович

**АППАРАТНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА МВН
ПО ВЫСОКОТОЧНОМУ ИЗМЕРЕНИЮ
КОСМИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ФОНА**

Специальность:
01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена
в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)

Научный руководитель: **Семена Николай Петрович**
доктор технических наук ИКИ РАН,
заведующий лабораторией астрофизических
рентгеновских детекторов и телескопов

Официальные оппоненты: **Ненарокомов Алексей Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), профессор кафедры
«Космические системы и ракетостроение»

Рунцо Михаил Федорович
кандидат физико-математических наук,
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ,
доцент кафедры экспериментальных методов ядерной
физики

Ведущая организация: **Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН**

Защита диссертации состоится **13 сентября 2022 г. в 12 ч 00 мин**
на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 002.023.01 при Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН по
адресу: Москва, Профсоюзная, 84/32, подъезд А2, Институт космических
исследований РАН, зал семинаров (ком. 707).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, Ленинский проспект, 53. Автореферат
и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <https://www.lebedev.ru/> и АКЦ ФИАН <http://www.asc-lebedev.ru/> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «____» июня 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.023.01
кандидат физико-математических наук

Н. Н. Шахворостова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Космический рентгеновский фон представляет собой слабое диффузное излучение неба в рентгеновском диапазоне энергии. Открытие данного явления в 1962 г. стало одним из первых в области рентгеновской астрономии.

В настоящее время известно, что основной вклад в наблюдаемую поверхностную яркость космического рентгеновского фона (КРФ) дают активные ядра галактик (АЯГ) — аккрецирующие сверхмассивные чёрные дыры.

Ценность КРФ состоит в том, что его поверхностная яркость содержит в себе излучение всех сколь угодно слабых объектов во Вселенной, даже таких, которые невозможно наблюдать отдельно рентгеновскими телескопами из-за их конечной чувствительности. Это позволяет использовать знание о точном спектре КРФ для решения чрезвычайно значимых астрофизических задач, связанных с населённостью Вселенной активными ядрами галактик.

В настоящее время можно считать, что достаточно хорошо известна форма спектра КРФ, определяемая по измерениям в ограниченных полях зрения. Но абсолютный поток КРФ измерен со значительно меньшей точностью. Погрешность его измерений составляет 15–20 % (рис. 1).

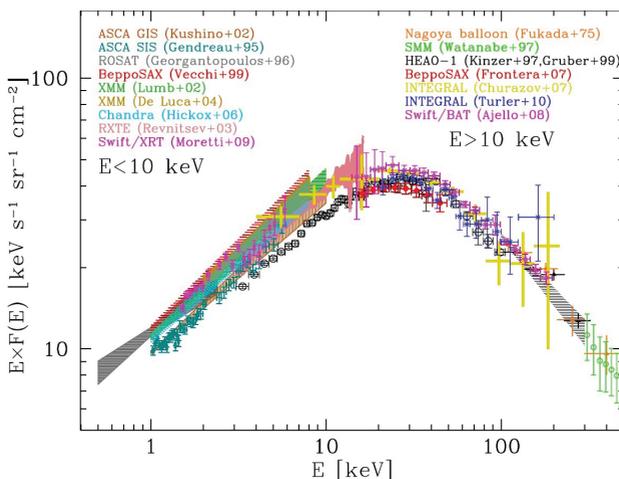


Рис. 1. Измерения КРФ различными обсерваториями.
Из работы (Gilli, 2013) (иллюстративный рисунок)

Однако для решения некоторых астрофизических задач требуется знание абсолютного потока КРФ в пределах единиц процентов по максимально широкому полю зрения, желательно по всей сфере. Такая информация, например, даст возможность уточнить модели эволюции сверхмассивных чёрных дыр, находящихся в центрах галактик.

Таким образом, можно заключить, что задача высокоточного измерения поверхностной яркости КРФ является значимой задачей в области экспериментальной астрофизики, а разработка средств и методов для космического эксперимента, позволяющего осуществить эти измерения — крайне актуальная задача экспериментальной астрофизики.

Основные проблемы высокоточного измерения КРФ заключаются в выделении сигнала, относящегося к КРФ, из общих измеренных данных и необходимости прецизионной калибровки регистрирующего прибора как по спектру, так и по абсолютному потоку.

В представленной диссертационной работе предлагается набор аппаратных и методических средств, позволяющий решить данные проблемы. Этот набор реализован в рентгеновском мониторе, предназначенном для эксперимента на Международной космической станции (МКС). Кроме того, представлены результаты математического и экспериментального моделирования, подтверждающие возможность высокоточного измерения КРФ посредством данного эксперимента. Космический эксперимент получил название «Монитор всего неба» (МВН), а созданный прибор — СПИН-Х1-МВН.

Цели и задачи работы

Цель представленной работы заключается в создании аппаратно-методических средств для проведения космического эксперимента по высокоточному измерению космического рентгеновского фона.

Для достижения поставленной цели при создании предназначенного для измерения КРФ монитора были решены следующие научные задачи:

- разделения КРФ и внеапертурного фона прибора;
- учёта апертурного фона прибора;
- обеспечения возможности точной энергетической и абсолютной калибровки прибора;
- адаптации прибора к условиям на внешней поверхности МКС.

Научная новизна

Научная новизна состоит в создании аппаратных и методических средств, позволяющих в процессе космического эксперимента измерить поверхностную яркость КРФ со значительно более высокой точностью по сравнению с предыдущими измерениями.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы состоит в том, что выполненное с помощью созданного монитора высокоточное измерение поверхностной яркости КРФ будет иметь большое значение для решения задач, требующих

знания населённости АЯГ, таких как уточнение моделей эволюции чёрных дыр во Вселенной или анализ популяции чёрных дыр в ближней Вселенной. В частности, современное качество измерения КРФ в области энергий 10–60 кэВ позволяет оценить долю так называемых «поглощённых» активных ядер галактик лишь с фактором 2–3, а с улучшением качества измерений, ожидаемых в проекте МВН, эта неопределённость может быть в значительной степени снята.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные методики и технические решения могут быть использованы для рентгеновских астрофизических приборов различных типов. В частности, разработанные в рамках МВН блоки калибровочных источников, были применены в первом российском рентгеновском зеркальном телескопе ART-XC (Astronomical Roentgen Telescope — X-ray Concentrator) имени М. Н. Павлинского, функционирующем с 2019 г. в точке либрации L_2 в составе космической обсерватории «Спектр-РГ».

Методология и методы исследования

В диссертационной работе использована следующая методология:

- в первой главе использован метод анализа и синтеза для определения путей решения проблемы измерения поверхностной яркости КРФ с высокой точностью при размещении аппаратуры на МКС;
- во второй главе применялись методы математического моделирования: Монте-Карло — для расчёта поля зрения прибора; HEALPix — для построения карты экспозиции неба; математической статистики — для определения погрешностей измерения;
- в третьей главе для расчёта теплового режима прибора применён метод конечных элементов и узловый метод; для определения качественных и количественных характеристик разработанного монитора и его систем использованы методы экспериментального исследования физических характеристик;
- в четвёртой главе для экспериментального исследования характеристик рентгеновского монитора использованы методы поглощённого лучистого потока и воспроизведения поля температур.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- разработано аппаратно-методическое обеспечение космического эксперимента по высокоточному измерению КРФ с борта МКС, позволяющее решить три основные проблемы измерения: проблему разделения КРФ и внеапертурного фона прибора, проблему учёта апертурного фона и проблему точной энергетической и абсолютной калибровки прибора;
- для решения проблемы разделения КРФ и внеапертурного фона прибора на базе имеющихся рентгеновских детекторов разработан адаптированный для работы на МКС монитор с вращающимся экраном, реализующим метод модуляции апертуры;

- для решения проблемы учёта апертурного фона разработана методика отбора данных, обеспечивающая снижение суммарной ошибки измерения КРФ до целевого уровня в 1 % за три года непрерывных наблюдений;
- в обеспечение решения проблемы точной энергетической и абсолютной калибровки монитора разработаны прецизионная система термостабилизации рентгеновских детекторов и система их полётной калибровки;
- расчётные параметры основных систем рентгеновского монитора подтверждены экспериментальными исследованиями.

Личный вклад

В части аппаратного обеспечения эксперимента автором разработана общая компоновка рентгеновского монитора; созданы для него отдельные системы: модуляции апертюры, прецизионной термостабилизации детекторов, полётной калибровки; проведено математическое и экспериментальное моделирование характеристик этих систем, осуществлена адаптация конструкции монитора к условиям работы на МКС.

В части методического обеспечения эксперимента автором разработана методика отбора наблюдательных данных, позволяющая достичь целевого показателя ошибки измерения КРФ в 1%, для обоснования которой проведены оптимизация поля зрения детектора и моделирование результатов эксперимента при разных наборах используемых наблюдательных данных.

Апробация работы

Работа апробирована на следующих конференциях:

- VIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2011 (*Сербинов Д. В.* Космический эксперимент на МКС «Монитор всего неба»);
- XII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2015 (*Сербинов Д. В., Семена Н. П.* Имитатор внешних тепловых условий на основе термоэлектрических модулей для испытаний космической аппаратуры);
- XIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2016 (*Сербинов Д. В., Семена Н. П.* Термостабилизация научной аппаратуры в условиях сильнопеременных внешних тепловых потоков на поверхности Международной космической станции);
- XV Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2018 (*Сербинов Д. В., Семена Н. П.* Влияние факторов космического пространства на проведение астрофизических экспериментов на борту орбитальных станций);
- Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, ИКИ РАН, Москва, 2021 (*Семена Н., Сербинов Д., команда МВН «Эксперимент по высокоточному измерению космического рентгеновского фона с борта МКС»*).

Объём диссертации

Объём диссертационной работы составляет 134 страницы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она включает 83 рисунка и 11 таблиц. В состав библиографии входят 55 литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена аналитическому обзору способов и проблем высокоточного измерения поверхностной яркости КРФ. В ней рассмотрены задача измерения, способы её решения, аппаратные проблемы измерения, подробно проанализированы возможности и ограничения МКС как площадки для измерения КРФ.

Задача высокоточного измерения КРФ состоит в том, чтобы, во-первых, отделить фотоны КРФ от побочного фона, не относящегося к КРФ, и обеспечить точный счёт и измерения энергии фотонов КРФ, попадающих на детектор.

Побочный фон можно разделить на апертурный и внеапертурный. К первому относятся заряженные частицы, небесные рентгеновские источники и галактический рентгеновский фон, попадающие на детектор через открытую апертуру детектора. Ко второму относятся частицы и фотоны, попадающие на детектор со стороны конструкции прибора.

Таким образом, для высокоточного измерения КРФ должны быть решены три проблемы: отделения КРФ от внеапертурного фона, учёт апертурного фона и точная энергетическая и абсолютная калибровка прибора.

Первая из вышеперечисленных проблем считается основной и наиболее трудно решаемой. Способами её решения выступают пассивная или антисовпадательная защита, фильтрация по скорости роста фронта сигнала, перекрытие апертуры Землёй, модуляция (периодическое перекрытие) поля зрения прибора. В частности, посредством модуляции проводились измерения КРФ на эксперименте НЕАО1 (1977–1979), которые до сих пор считаются одними из самых надёжных в диапазоне энергий 2–60 кэВ.

Для решения проблем энергетической и абсолютной калибровок прибора требуются обеспечение стабильных температурных условий для детекторов, а также их прецизионные наземные и полётные калибровки.

Стабильная оптимальная температура полупроводниковых детекторов обеспечивает минимальный уровень утечек и шумов, что в свою очередь поддерживает на максимальном уровне энергетическое разрешение детекторов. Первоначальная наземная калибровка обеспечивает правильную интерпретацию событий, фиксируемых детекторами, периодическая полётная калибровка позволяет учесть деградацию их параметров.

МКС — достаточно специфическая площадка для проведения астрофизических экспериментов. Поэтому для адаптации аппаратуры, предназначенной для высокоточного измерения КРФ, потребовался подробный анализ влияния условий размещения монитора на аппаратуру МВН.

Преимуществом МКС для решения задачи эксперимента представляется наличие участков орбиты с низким радиационным фоном, что даёт инструмент для уменьшения статистической ошибки измерения.

Однако размещение аппаратуры на МКС создаёт и некоторые серьёзные проблемы. В частности, на прибор, размещённый на внешней поверхности МКС, воздействуют сильно переменные по времени тепловые потоки, что резко усложняет проблему строгой термостабилизации детекторов. Это привело к необходимости разработки новых технических решений для системы термостабилизации детекторов монитора МВН и к значительному объёму математического и экспериментального моделирования тепловых режимов монитора.

Анализ позволил выявить и нейтрализовать менее очевидные, но при этом достаточно опасные проблемы, такие как недопустимая деградация некоторых покрытий под воздействием атомарного кислорода.

В конечном итоге проведённый анализ позволил полностью адаптировать аппаратуру эксперимента к условиям работы на МКС.

Вторая глава посвящена описанию аппаратуры эксперимента, решению проблемы отделения КРФ от внеапертурного фона аппаратными средствами и решению проблемы учёта апертурного фона методическими средствами.

Комплекс научной аппаратуры МВН (КНА МВН) включает два прибора: рентгеновский монитор СПИН-Х1-МВН и блок управления (БУ МВН). СПИН-Х1-МВН — основной прибор комплекса научной аппаратуры, он устанавливается на внешней поверхности МКС. БУ МВН размещается внутри герметичного отсека МКС. Оба прибора соединяются друг с другом посредством кабельной сети МКС. В табл. 1 приведены основные характеристики КНА МВН.

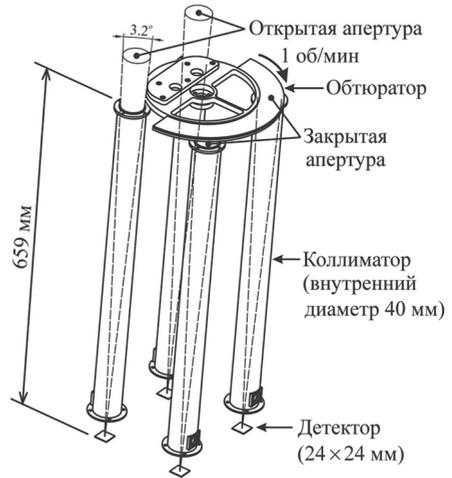
Таблица 1. Основные характеристики КНА МВН

Характеристика	СПИН-Х1-МВН	БУ МВН
Размеры, мм	940×661×425	222×178,2×130
Масса, кг	51	3,2
Энергопотребление (max), Вт	144	20
Энергетический диапазон, кэВ	6–70	-
Количество детекторов	4	-
Площадь открытых детекторов, см ²	9,16	-
Поле зрения (FWM), град ²	8,55	-
Оперативная память, МБ	—	256

Для отделения КРФ от внеапертурного фона в мониторе используется метод модуляции поля зрения. Этот способ для МВН предложил известный астрофизик Михаил Геннадьевич Ревнивцев. Аппаратная реализация этого способа основана на использовании вращающегося обтюлятора (рис. 2).

Рис. 2. Аппаратная реализация способа измерения КРФ в МВН (совместный результат из работы Serbinov et al., 2021)

В мониторе вращающийся рентгенопрозрачный трёхслойный (4 мм алюминия, 1 мм меди, 1 мм олова) обтюратор периодически перекрывает поля зрения четырёх детекторов, сформированных трёхслойными цилиндрическими коллиматорами. Обтюратор вращается постоянно в течение всего эксперимента со скоростью 1 об/мин. В каждый момент времени (за исключением периодов частичного перекрытия) два детектора открыты и два закрыты.



Очевидно, что детектор через открытую апертуру будет облучаться не только фотонами КРФ, но и другими источниками рентгеновского излучения и заряженными частицами. Таким образом, сигнал $S_{open}(t)$ от открытого детектора имеет вид

$$S_{open}(t) = CXB(t) + B(t) + LS(t) + P(t), \quad (1)$$

где $CXB(t)$ — космический рентгеновский фон; $B(t)$ — внеапертурный фон на детекторе; $LS(t)$ — рентгеновское излучение локальных источников и диффузного излучения центральной области Галактики; $P(t)$ — заряженные частицы, попавшие в открытую апертуру; t — время.

На закрытом детекторе есть только внеапертурный фон и сигнал $S_{close}(t)$ от закрытого детектора имеет вид:

$$S_{close}(t) = B(t). \quad (2)$$

Как известно, орбита МКС проходит через области высокого радиационного фона: Южно-Атлантическую аномалию и высокие географические широты. Исключение этих областей из обзора сводит к нулю количество заряженных частиц в диапазоне от 6 до 70 кэВ, попадающих в открытую апертуру: $P(t) = 0$. Области с яркими локальными источниками и центральная область Галактики также могут быть исключены из обзора, тогда $LS(t) = 0$.

Таким образом, оптимальная стратегия измерений состоит в выборе орбитальных областей с низким фоном, исключении временных интервалов с яркими рентгеновскими источниками в поле зрения и в получении усреднённого «полезного» сигнала $S_{CXB}(t)$ в виде:

$$S_{CXB}(t) = \sum_{i=1}^4 \left(S_{open_i} - S_{close_i} \right), \quad (3)$$

где i — номер детектора.

Период вращения обтюлятора выбран таким образом, чтобы с одной стороны фон детектора можно было считать постоянным, а с другой стороны данный период должен быть достаточен для накопления сигнала на детекторе.

Рентгеновский монитор СПИН-Х1-МВН будет установлен с зенитной ориентацией на универсальном рабочем месте Российского сегмента МКС. При этом монитор сможет обзирать ~80 % небесной сферы каждые 73 дня. После исключения из обзора высоких широт ($b > |40^\circ$) и области ЮАА останется ~66 % небесной сферы.

Погрешность измерения поверхностной яркости КРФ складывается из двух составляющих: статистической и систематической погрешностей. Статистическая погрешность ST учитывает влияние внеапертурного фона и рассчитывается по формуле:

$$ST = \frac{\sqrt{4N_{IB} + 2N_{CXB}}}{2N_{CXB}}, \quad (4)$$

где N_{IB} — фотоны от внеапертурного фона на один детектор; N_{CXB} — фотоны КРФ на один детектор.

Фотоны от внеапертурного фона N_{IB} рассчитываются по формуле:

$$N_{IB} = S_D T (E_2 - E_1) B_{ISS}, \quad (5)$$

где T — время, с; S_D — чувствительная площадь одного детектора, $S_D = 4,58 \text{ см}^2$; $E_1 = 6 \text{ кэВ}$ — нижний порог детектора; $E_2 = 70 \text{ кэВ}$ — верхний порог детектора; $B_{ISS} = 0,02 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{кэВ}^{-1}$ — средний радиационный фон на орбите МКС.

Средний радиационный фон на орбите МКС B_{ISS} получен с использованием программы SPENVIS (*англ.* Space Environment, Effects, and Education System), которая использует модели АЕ-8 (Vette, 1991) и АР-8 (Sawyer, Vette, 1976).

Фотоны КРФ N_{CXB} рассчитываются по формуле:

$$N_{CXB} = F_{CXB} T, \quad (6)$$

где $F_{CXB} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ — поток фотонов КРФ на один детектор МВН.

Для оценки потока фотонов КРФ в настоящей работе использовалась модель КРФ, полученная на эксперименте НЕАО-1 (Gruber et al., 1999):

$$3-60 \text{ кэВ: } 7,877 E^{-0,29} \cdot e^{-E/41,13} \text{ кэВ} \cdot (\text{кэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1};$$

$$\begin{aligned} >60 \text{ кэВ: } 0,0259 (E/60)^{-5,5} + 0,504 (E/60)^{-1,58} + \\ + 0,0288 (E/60)^{-1,05} \text{ кэВ} \cdot (\text{кэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}. \end{aligned}$$

Систематическая погрешность обусловлена попаданием точечных рентгеновских источников в поле зрения МВН, поэтому для её уменьшения эти источники необходимо исключать из обзора. В первую очередь, не-

обходимо исключить галактическую плоскость в диапазоне широт от -10 до $+10^\circ$, так как она очень насыщена различными источниками, которые составляют галактический рентгеновский фон. Затем должны быть исключены все галактические источники, так как КРФ формируется только внегалактическими источниками — активными ядрами галактик. Однако очень яркие внегалактические источники также необходимо исключить из обзора, поскольку они будут «засвечивать» поле зрения.

Систематическая погрешность рассчитывается по формуле:

$$SY = \frac{\sum_{G=1}^{10} L_G}{2N_{СХВ}}, \quad (7)$$

где L_G — количество фотонов от группы источников, зарегистрированное открытыми детекторами МВН за всё время проведения эксперимента; G — номер группы рентгеновских источников.

Для расчёта потоков фотонов от рентгеновских источников в работе использовался каталог Swift BAT. Каталог содержит 1632 источника. После исключения галактической плоскости на карте экспозиции остаётся 756 источников (из них 104 галактических), которые в данной работе были разбиты на десять групп по формам спектра.

Нормировочные коэффициенты n_j для j -го источника рассчитаны по формуле:

$$n_j = \frac{6,24 \cdot 10^8 D_j}{195 \int_{14} FE dE}, \quad (8)$$

где D_j — плотность потока j -го источника из каталога Swift BAT, эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$; E — энергия, кэВ; $6,24 \cdot 10^8$ — переводной коэффициент (эрг → кэВ).

Количество фотонов L_G от группы источников, зарегистрированное открытыми детекторами МВН за всё время проведения эксперимента:

$$L_G = \int_6^{70} F dE \cdot 2S_D \sum_{j=1}^N (n_j T_j), \quad (9)$$

где N — количество источников в группе G ; T_j — время экспозиции j -го источника, с.

Уровни значимости регистрируемого потока от каждого источника на фоне потока КРФ и среднего радиационного фона на орбите МКС рассчитаны в диапазоне от 6 до 15 кэВ. Такой диапазон выбран из-за того, что эти источники больше доминируют над внеапертурным фоном в этом диапазоне. Расчёт показал, что кроме галактических источников необходимо исключить из обзора три внегалактических источника (рис. 3).

После исключения ярких рентгеновских источников остаётся ~50 % неба для измерения поверхностной яркости КРФ (рис. 4).

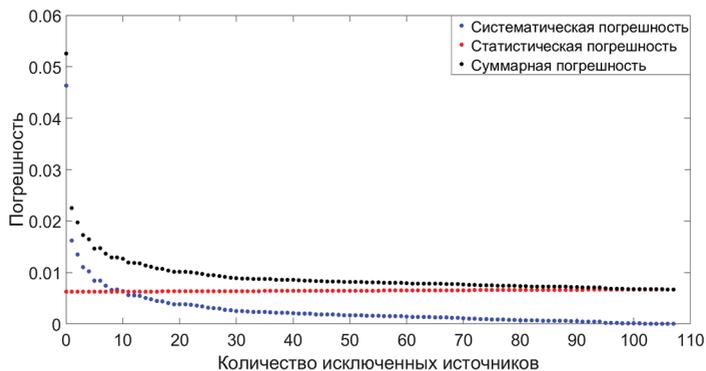


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения поверхностной яркости КРФ от количества исключённых источников, начиная с самого яркого (результат диссертанта из работы Serbinov et al., 2021)

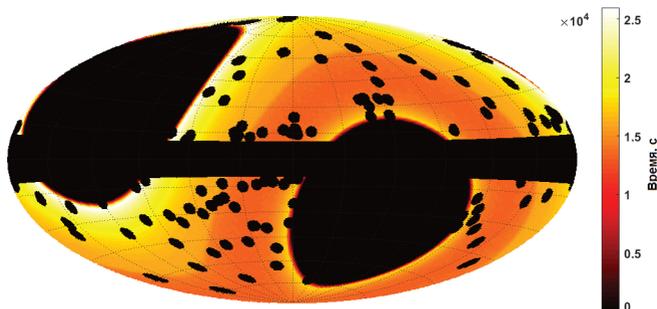


Рис. 4. Карта экспозиции неба в эксперименте МВН после исключения ярких рентгеновских источников (104 галактических и 3 внегалактических) (результат диссертанта из работы Serbinov et al., 2021)

С исключением рентгеновских источников систематическая погрешность будет уменьшаться, а статистическая погрешность — увеличиваться. В результате суммарная погрешность за три года составит $\sim 1\%$ (см. рис. 3).

В *третьей главе* описаны конструкция и состав рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН (рис. 5).

Модуляция внешнего сигнала в СПИН-Х1-МВН обеспечивается вращением непрозрачного для рентгеновского излучения obturator со скоростью 1 об/мин. Obturator имеет трёхслойный экран, аналогичный покрытию коллиматора.

Obturator должен вращаться непрерывно в течение трёх лет, поэтому от надёжности его привода зависит успех всего эксперимента. В связи с этим был разработан привод с дублированными электродвигателями (рис. 6).



Рис. 5. Основные составные части СПИН-Х1-МВН (совместный результат из работы Сербинов и др., 2022)

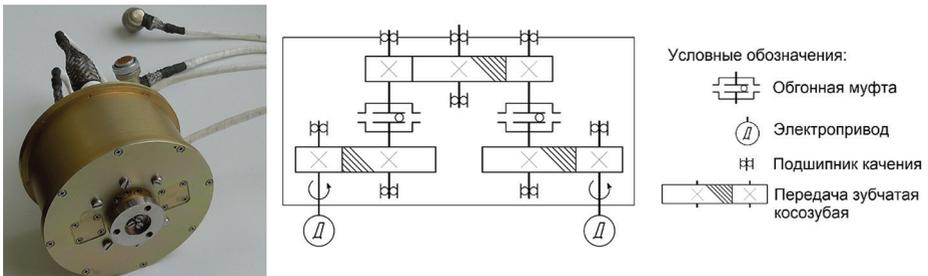


Рис. 6. Привод обтюлятора (результат диссертанта из работы Сербинов и др., 2022)

В разработанном приводе обтюлятора вращение передаётся на один выходной вал, при этом любой отказ (заклинивание или потеря крутящего момента) любого из задающих вращение электроприводов не приводит к остановке данного устройства благодаря наличию обгонных муфт.

Одной из ключевых систем рентгеновского монитора выступает система термостабилизации детекторов, поскольку от неё зависит стабильность характеристик детекторов, т. е. приборная точность измерений.

Для того чтобы компенсировать сильно переменные тепловые потоки на орбите МКС в СПИН-Х1-МВН была применена двухрадиаторная СОТР (система обеспечения теплового режима) и разработана методика расчёта наиболее оптимальной ориентации радиаторов. Она основана на выравнивании суммарного поглощённого теплового потока за счёт сдвига фазы ырами при их повороте относительно внешнего источника тепла. На рис. 7

представлен результат оптимизационного расчёта такой схемы применительно к СПИН-Х1-МВН.

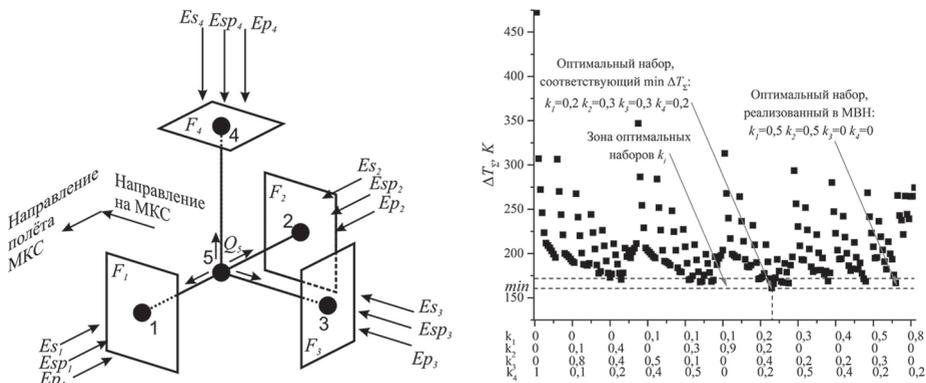


Рис. 7. Оптимизационная тепловая модель и график результатов расчёта (совместный результат из работы Serbinov et al., 2017)

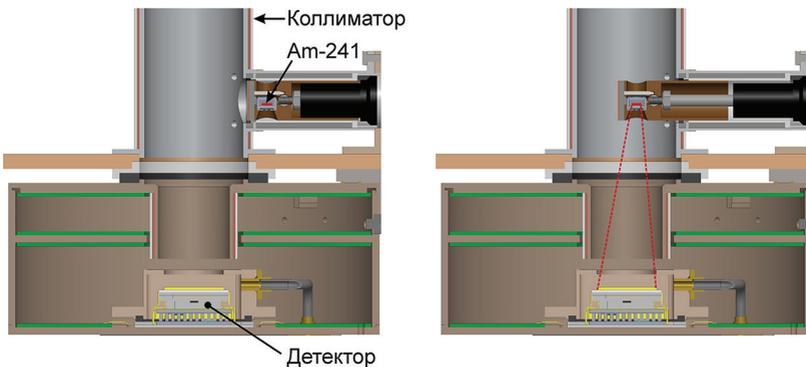
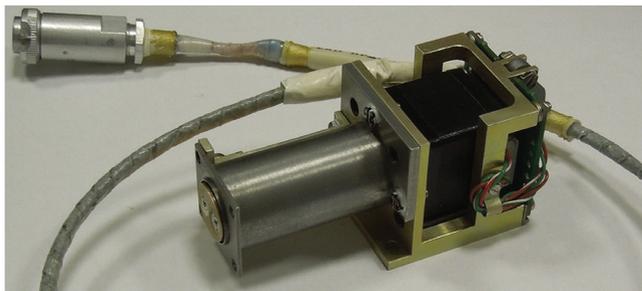


Рис. 8. Блок калибровочного источника и его работа (результат диссертанта из работы Serbinov et al., 2021)

Система полётной калибровки СПИН-Х1-МВН включает блок управления и четыре блока калибровочного источника (БКИ), вводящих в поле зрения каждого детектора радионуклидный рентгеновский источник на базе америций-241.

БКИ представляет собой линейный привод, который по команде вводит внутрь коллиматора калибровочный источник Am-241 (рис. 8).

Описанный выше блок калибровочного источника был заимствован из аппаратуры МВН в телескоп ART-ХС имени М. Н. Павлинского. В настоящее время семь таких блоков успешно работают на борту астрофизической обсерватории «Спектр-РГ» с 2019 г. (Pavlinsky et al., 2021).

Четвёртая глава посвящена экспериментальной отработке рентгеновского монитора и его составных частей.

Для подтверждения разработанной концепции СОТР был проведён тепловой эксперимент в условиях, имитирующих тепловые факторы космического пространства и воздействия внешних лучистых потоков на радиаторы МВН на «холодной» и «тёплой» орбите. Эксперимент проводился в рамках термовакуумных испытаний (ТВИ) образца МВН для конструкторско-доводочных испытаний в 2,5-кубовой термовакуумной камере с азотными криогенными экранами.

Имитация воздействия внешних лучистых потоков и поддержание стабильной температуры посадочных мест рентгеновского монитора осуществлялась с помощью специально разработанного комплекса обеспечения ТВИ.

Результаты проведённого эксперимента, представленные на рис. 9, показали правильность всех технических решений в конструкции СОТР СПИН-Х1-МВН.

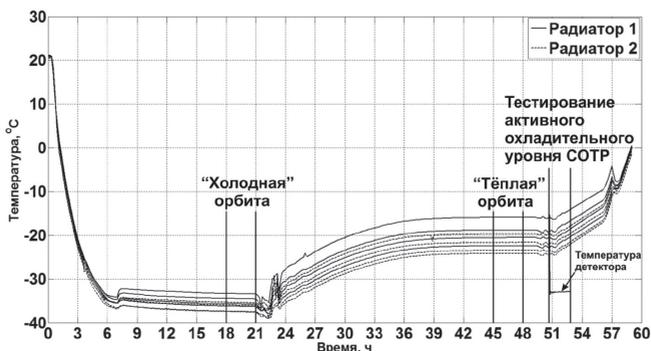


Рис. 9. Результаты термовакуумных испытаний МВН (совместный результат из работы Serbinov et al., 2017)

Для наземной экспериментальной отработки БКИ была создана вакуумная установка с имитатором внешних тепловых условий на базе термоэлектрических модулей (рис. 10).

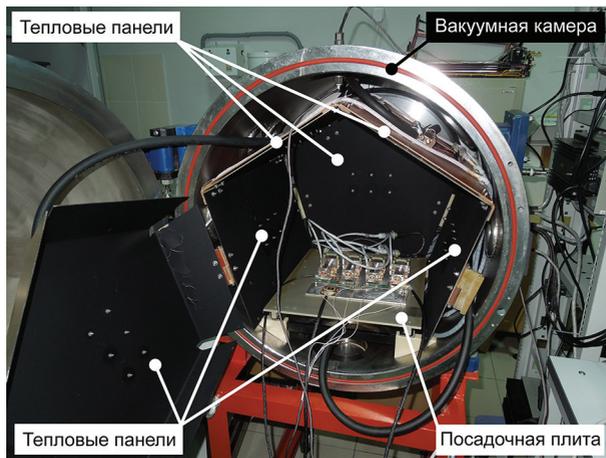


Рис. 10. Имитатор внешних тепловых условий в вакуумной камере (результат диссертанта из работы Сербинов и др., 2022)

Имитатор состоит из шести теплоизолированных друг от друга тепловых панелей и посадочной плиты. Изнутри тепловые панели покрыты чёрной эмалью ЭКОМ-2, имеющей степень черноты, близкую к единице.

Имитатор устанавливается внутри вакуумной камеры на четырёх карпролоновых тепловых развязках. На каждой тепловой панели и под посадочной плитой установлены по два термоэлектрических модуля, тепловыделяющие поверхности которых охлаждаются водой.

В данной камере были испытаны четыре БКИ. Каждый БКИ отработал 2000 циклов «выдвинут – задвинут» при температуре посадочных мест и окружающей конструкции от -30 до -25 °С. Для автоматического осуществления циклограммы и фиксации положения штока БКИ была разработана система управления экспериментом.

Значения температуры посадочных мест БКИ и динамика роста циклов их срабатывания приведены на рис. 11. Давление в вакуумной камере во время испытаний не превышало 0,3 мм рт. ст.

За время работы телескопа ART-XC имени М. Н. Павлинского с 2019 г. в реальных условиях космоса было осуществлено более 90 полётных калибровок детекторов посредством данных БКИ, сбояв их работы не зафиксировано.

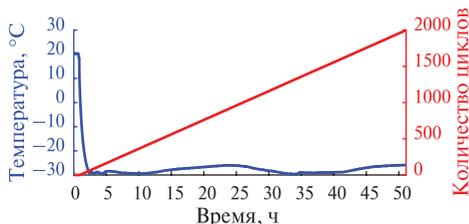


Рис. 11. Температура посадочных мест и количество циклов БКИ во время испытаний (результат диссертанта из работы Сербинов и др., 2022)

Заключение

В диссертационной работе решена актуальная научная проблема по созданию аппаратно-методических средств для проведения космического эксперимента, позволяющего измерить космический рентгеновский фон с гораздо более высокой точностью по сравнению с предшествующими измерениями.

Для достижения данной цели решён комплекс следующих взаимосвязанных и одноцелевых задач:

- проведён аналитический обзор методов, средств высокоточного измерения космического рентгеновского фона и проанализированы проблемы измерения;
- проанализирована пригодность МКС для проведения эксперимента по высокоточному измерению КРФ;
- создана общая компоновка рентгеновского монитора, пригодная для решения поставленной задачи;
- создана система модуляции апертуры, позволяющая отделить КРФ от внеапертурного фона;
- разработана методика отбора данных, дающая возможность учесть апертурный фон;
- созданы система термостабилизации детекторов монитора и система полётной калибровки, обеспечивающие точную энергетическую и абсолютную калибровку детекторов;
- проведено математическое и экспериментальное моделирование характеристик монитора, подтвердившее возможность достижения поставленной цели диссертации.

Список основных публикаций

Основные результаты диссертационной работы изложены в 5 научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. *Serbinov D. V., Pavlinsky M. N., Semena A. N., Semena N. P., Lutovinov A. A., Molkov S. V., Buntov M. V., Arefiev V. A., Lapshov I. Y.* MVN experiment — All Sky Monitor for measuring cosmic X-ray background of the Universe onboard the ISS // *Experimental Astronomy*. 2021. 51, 493-514 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09699-8>.
2. *Serbinov D. V., Semena N. P., Pavlinsky M. N.* Opposite Radiators Used for Thermostabilizing of X-Ray Detectors of the All-Sky Monitor to be Installed on the ISS // *J. Engineering Thermophysics*. 2017. V. 26. No. 3. P. 366–376.
3. *Сербинов Д. В., Семена Н. П., Семена А. Н., Лутовинов А. А., Левин В. В., Мольков С. В., Кривченко А. В., Ротин А. А., Кузнецова М. В.* «Монитор Всего Неба» для высокоточного измерения космического рентгеновского фона с борта МКС // Письма в *Астрономический журн.* 2022. Т. 48. № 4. С. 243–264.
4. *Сербинов Д. В., Семена Н. П., Павлинский М. Н., Арефьев В. А.* Возможности и ограничения орбитальных космических станций для проведения астрофизических экспериментов // *Инженерная физика*. 2018. № 4. С. 33–48.
5. *Pavlinsky M., Tkachenko A., Levin V., Alexandrovich N., Arefiev V., Babyshkin V., Batanov O., Bodnar Yu., Bogomolov A., Bubnov A., Buntov M., Burenin R., Chelovekov I., Chen C.-T., Drozdova T., Ehlert S., Filippova E., Frolov S., Gamkov D.,*

Garanin S., Garin M., Glushenko A., Gorelov A., Grebenev S., Grigorovich S., Gureev P., Gurova E., Ilkaev R., Katasonov I., Krivchenko A., Krivonos R., Korotkov F., Kudelin M., Kuznetsova M., Lazarchuk V., Lomakin I., Lapshov I., Lipilin V., Lutovinov A., Mereminskiy I., Molkov S., Nazarov V., Oleinikov V., Pikalov E., Ramsey B. D., Roiz I., Rotin A., Ryadov A., Sankin E., Sazonov S., Sedov D., Semena A., Semena N., Serbinov D., Shirshakov A., Shtykovsky A., Shvetsov A., Sunyaev R., Swartz D. A., Tambov V., Voron V., Yaskovich A. The ART-XC telescope on board the SRG observatory // *Astronomy and Astrophysics*. 2021. V. 650. Art. No. A42. 18 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040265>.

Другие публикации по теме диссертации

1. *Revnitsev M., Semena N., Akimov V., Levin V., Serbinov D., Rotin A., Kuznetsova M., Molkov S., Buntov M., Tambov V., Lapshov I., Gurova E., Simonenkov D., Tkachenko A., Pavlinsky M., Markov A., Konoshenko V., Sibirtsev D.* MVN: x-ray monitor of the sky on Russian segment of ISS // *Proc. SPIE*. V. 8443. *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*. 2012. Art. Id. 844310. 11 p. <http://dx.doi.org/10.1117/12.925916>.

Список литературы

1. *Gilli R.* The cosmic X-ray background: abundance and evolution of hidden black holes // *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. 2013. V. 84. P. 647.
2. *Gruber D. E., Matteson J. L., Peterson L. E., Jung G. V.* The spectrum of diffuse cosmic hard x-rays measured with HEAO 1 // *The Astrophysical J*. 1999. V. 520 (1). P. 124–129.
3. *Pavlinsky M., Tkachenko A., Levin V., Alexandrovich N., Arefiev V., Babyshkin V., Batanov O., Bodnar Yu., Bogomolov A., Bubnov A., Buntov M., Burenin R., Che-lovekov I., Chen C.-T., Drozdova T., Ehlert S., Filippova E., Frolov S., Gamkov D., Garanin S., Garin M., Glushenko A., Gorelov A., Grebenev S., Grigorovich S., Gureev P., Gurova E., Ilkaev R., Katasonov I., Krivchenko A., Krivonos R., Korotkov F., Kudelin M., Kuznetsova M., Lazarchuk V., Lomakin I., Lapshov I., Lipilin V., Lutovinov A., Mereminskiy I., Molkov S., Nazarov V., Oleinikov V., Pikalov E., Ramsey B. D., Roiz I., Rotin A., Ryadov A., Sankin E., Sazonov S., Sedov D., Semena A., Semena N., Serbinov D., Shirshakov A., Shtykovsky A., Shvetsov A., Sunyaev R., Swartz D. A., Tambov V., Voron V., Yaskovich A.* The ART-XC telescope on board the SRG observatory // *Astronomy and Astrophysics*. 2021. V. 650. Art. No. A42. 18 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040265>.
4. *Sawyer D. M., Vette J. I.* AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum: Report. No. 77-18983. NASA-GSFC, 1976. V. 9(2). 176 p.
5. *Vette J. I.* The AE-8 Trapped Electron Model Environment: Technical Memorandum. NSSDC-91-24. NASA-GSFC, 1991. 138 p.

055(02)2

ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 26.05.2022

Заказ 4195

Формат 60×84/16

Тираж 100

0,93 усл.-печ. л.

