

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)

Сербинов Дмитрий Владимирович

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

ДИССЕРТАЦИЯ

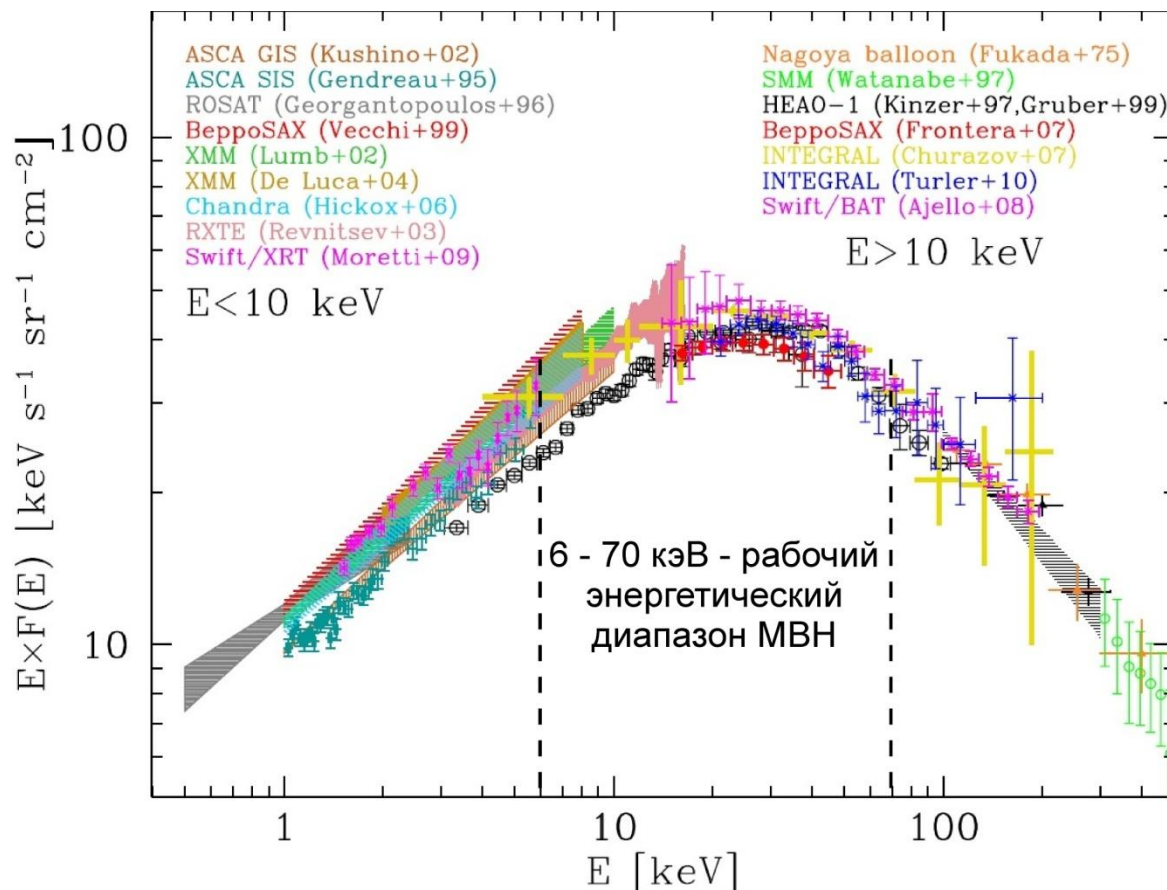
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Научный руководитель:
доктор технических наук
Н.П. Семена

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ

Актуальность задачи состоит в разработке средств и методов для космического эксперимента по высокоточному измерению КРФ. Систематическая погрешность измерения КРФ на сегодняшний день составляет $\sim 15\text{-}20\%$. Для уточнения моделей эволюции сверхмассивных чёрных дыр требуется уменьшить эту погрешность.



Gilli, R. *The cosmic X-ray background: abundance and evolution of hidden black holes.*
Memorie della Societa Astronomica Italiana, 2013, Vol. 84, 647

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы - создание аппаратно-методических средств для проведения космического эксперимента по высокоточному измерению космического рентгеновского фона

Для достижения поставленной цели создан рентгеновский монитор, при разработке которого решены следующие задачи:

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

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД ДИССЕРТАНТА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. ДЕТЕКТОР – ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ НА БАЗЕ КРИСТАЛЛА ИЗ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ
2. МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА – МЕЖДУНАРОДНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ
3. СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ КРФ – МОДУЛЯЦИЯ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ ПРИБОРА

ВКЛАД ДИССЕРТАНТА

ГЛАВА 1: ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ДЕТЕКТОРУ, УСЛОВИЯМ НА МКС И ПРОБЛЕМ ИЗМЕРЕНИЯ КРФ

ГЛАВА 2:

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. РАСЧЁТ И ОБОСНОВАНИЕ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ ПРИБОРА
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
3. МЕТОДИКА ОТБОРА ДАННЫХ

ГЛАВА 3:

АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ

1. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО МОНИТОРА:
 - СИСТЕМА МОДУЛЯЦИИ АПЕРТУРЫ
 - СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА
 - СИСТЕМА ПОЛЕТНОЙ КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТОРОВ
2. КОМПОНОВКА РЕНТГЕНОВСКОГО МОНИТОРА

ГЛАВА 4: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО МОНИТОРА И ЕГО СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВЫСОКОТОЧНОМУ ИЗМЕРЕНИЮ КРФ

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ МВН



**Рентгеновский монитор
СПИН-Х1-МВН
(лётный образец)**



БУ МВН

СПИН-Х1-МВН

Место установки	Внешняя поверхность МКС
Габаритные размеры	940 × 661 × 425 мм
Масса	51 кг
Потребляемая мощность	144 Вт (max)
Количество детекторов	4
Энергетический диапазон	6...70 кэВ
Рабочая температура детекторов	-30 ± 2 °С

БУ (Блок Управления) МВН

Место установки	Гермоотсек МКС
Габаритные размеры	222 × 178,2 × 130 мм
Масса	3,2 кг
Потребляемая мощность	20 Вт (max)
Процессор	AMD George LX800 500 МГц
Оперативная память	256 МБ
Энергонезависимая память	2 ГБ

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА



Параметры орбиты МКС

Высота 418 км

Наклонение 51,64°

Период обращения 93 мин

Период прецессии 73 сут

Место установки – универсальное рабочее место Российского сегмента МКС
Рентгеновский монитор крепится **неподвижно**, поле зрения направлено в **зенит**

ФОНОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ СЧЁТА ДЕТЕКТОРА

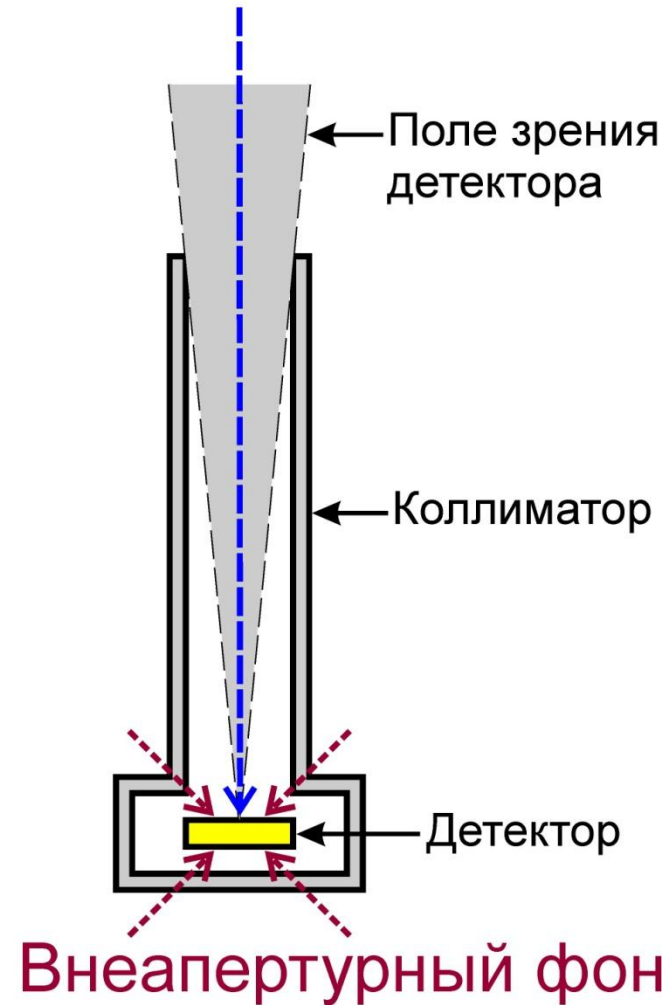
КРФ + апертурный фон

АПЕРТУРНЫЙ ФОН:

- Заряженные частицы
- Небесные рентгеновские источники
- Галактический рентгеновский фон (ГРФ)

ВНЕАПЕРТУРНЫЙ ФОН:

- Заряженные частицы
- Флуоресцентные рентгеновские фотоны
- Рентгеновское и гамма излучение Солнца, атмосферы Земли и других источников, в том числе рассеянное в элементах конструкции



РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КРФ

ПРОБЛЕМА	РЕШЕНИЕ В МВН
Отделение КРФ от внеапертурного фона детекторов	Модуляция поля зрения прибора
	Использование пассивной защиты детекторов
Учёт апертурного фона	Методика отбора полученных данных
Точная энергетическая и абсолютная калибровки детекторов	Использование на борту калибровочных источников
	Термостабилизация детекторов
	Наземные кросс-калибровки детекторов

АДАПТАЦИЯ МВН К РАБОТЕ НА БОРТУ МКС

ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МВН

ЕСТЕСТВЕННАЯ ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

ВАКУУМ

ПЕРЕМЕННЫЕ ВНЕШНИЕ
ТЕПЛОВЫЕ УСЛОВИЯ

ИОНИЗИРУЮЩАЯ РАДИАЦИЯ

МИКРОМЕТЕОРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

АТОМАРНЫЙ КИСЛОРОД

СРЕДА КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

СОБСТВЕННАЯ ВНЕШНЯЯ
АТМОСФЕРА

ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ОТ КОРПУСА
КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

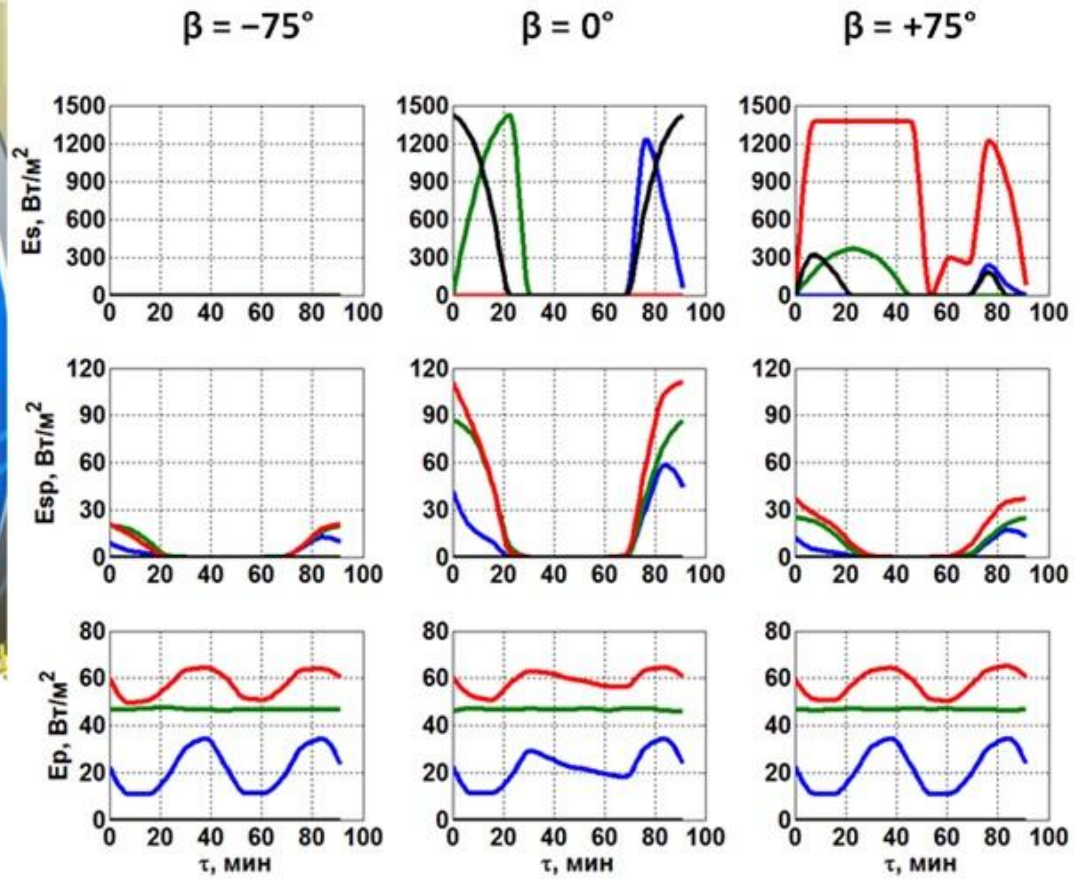
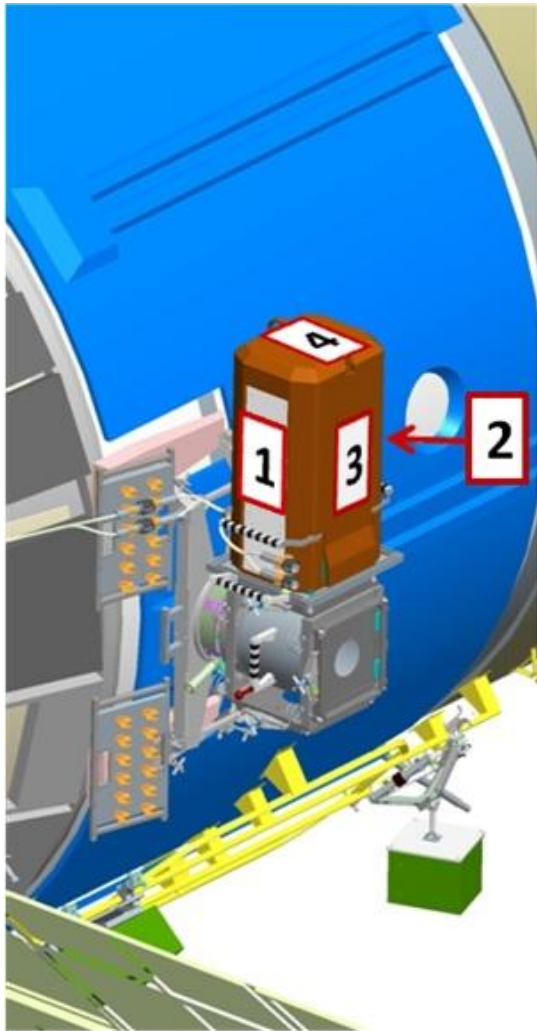
МИКРОГРАВИТАЦИЯ И
МИКРОВИБРАЦИЯ

ТРЕБОВАНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ:

- ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ
- ОРИЕНТАЦИЯ СТАНЦИИ
- ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ
- ЭРГОНОМИКА

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.

ВНЕШНИЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ



— 1 — 2 — 3 — 4

ОТДЕЛЕНИЕ КРФ ОТ ВНЕАПЕРТУРНОГО ФОНА

ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЯ: СХВ (t) – поток КРФ

$B(t)$ – внеапертурный фон

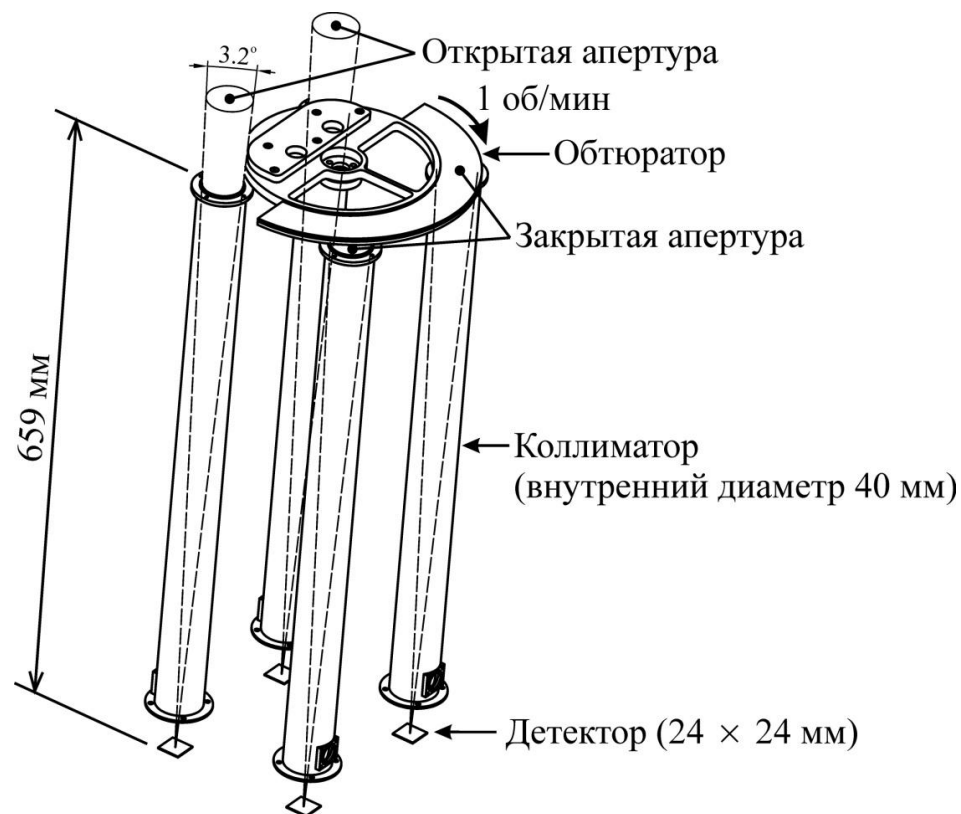
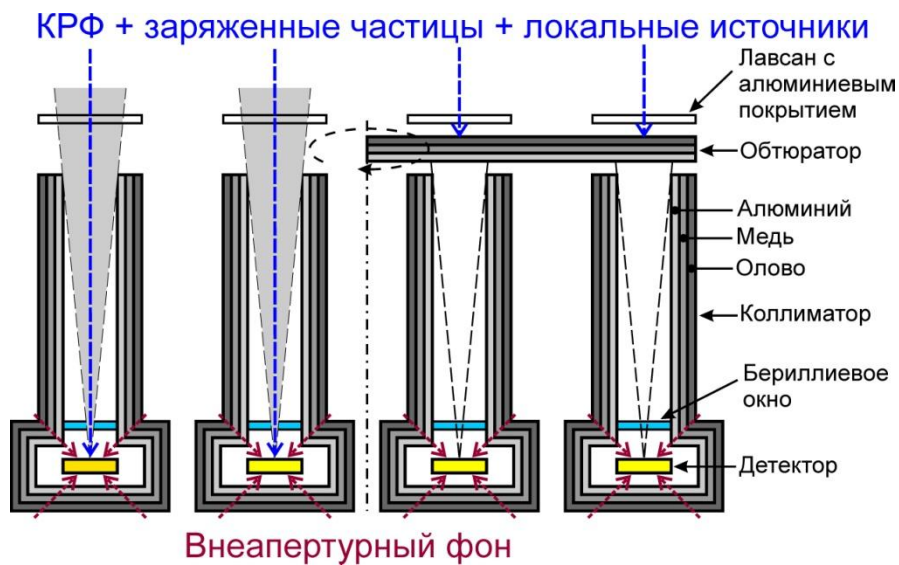
$P(t)$ – поток заряженных частиц в открытой апертуре

$LS(t)$ – небесные рентгеновские источники и ГРФ

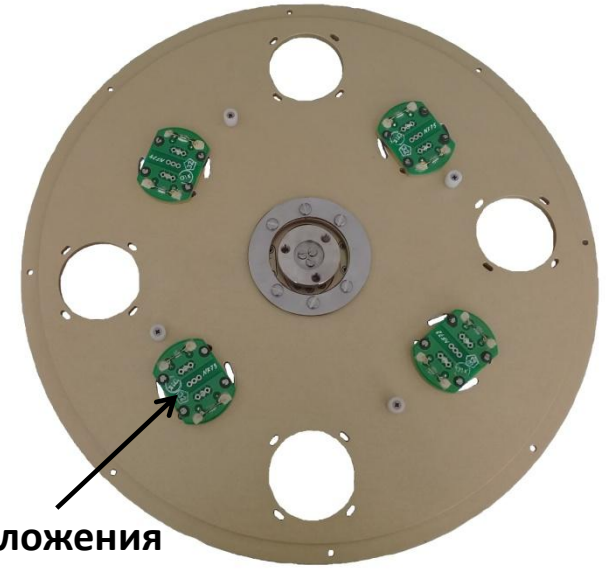
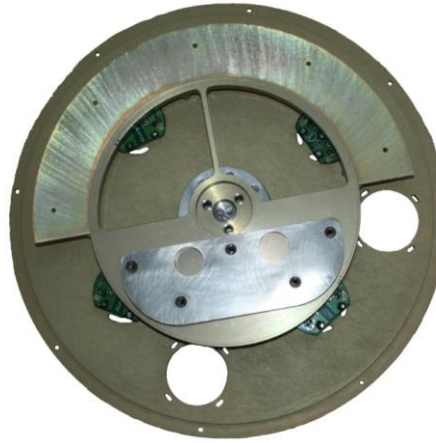
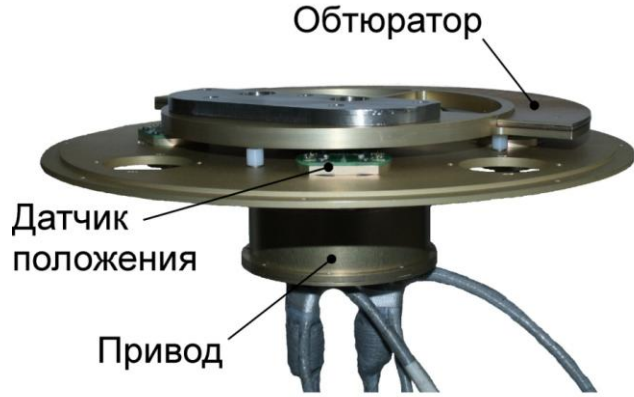
$$S_{\text{open}}(t) = \text{СХВ}(t) + B(t) + P(t) + LS(t)$$

$$S_{\text{close}}(t) = B(t)$$

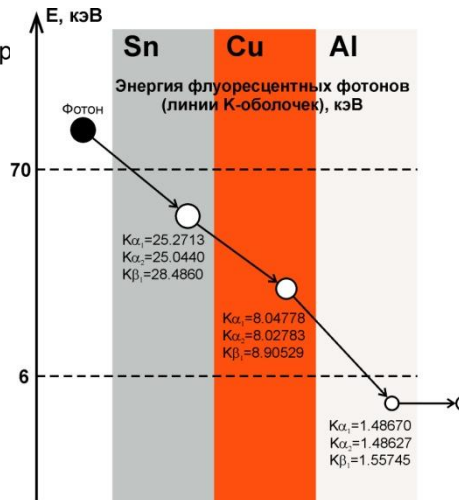
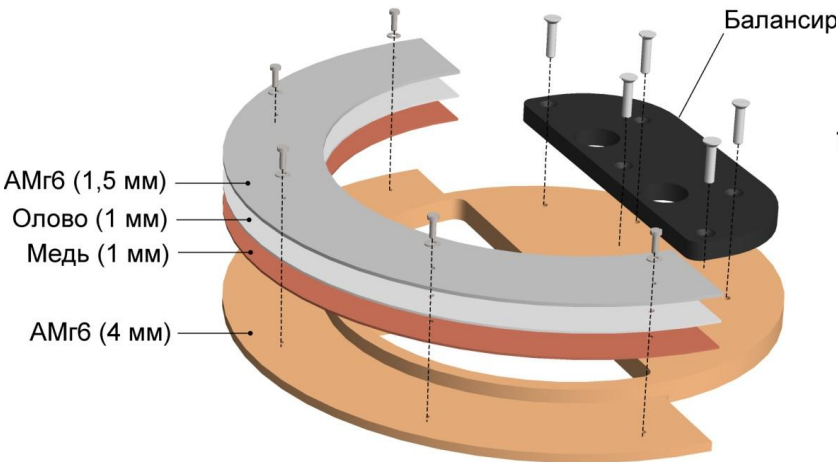
$$S_{\text{СХВ}+P+LS}(t) = \sum_{i=1}^4 (S_{\text{open } i} - S_{\text{close } i})$$



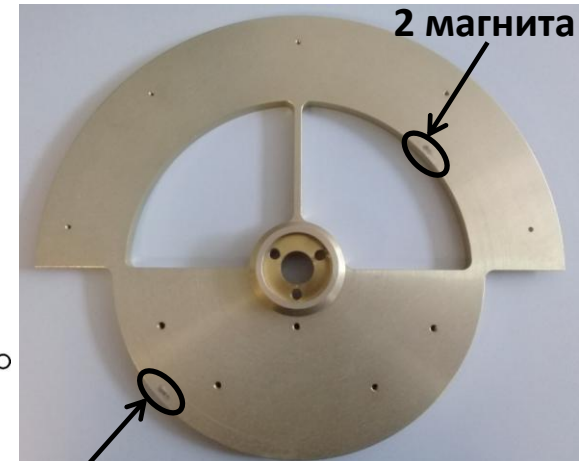
ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДУЛЯЦИИ ВНЕШНЕГО СИГНАЛА



Датчик положения с герконами

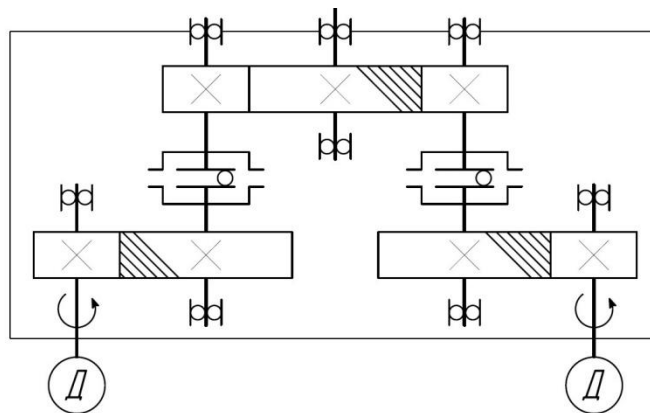
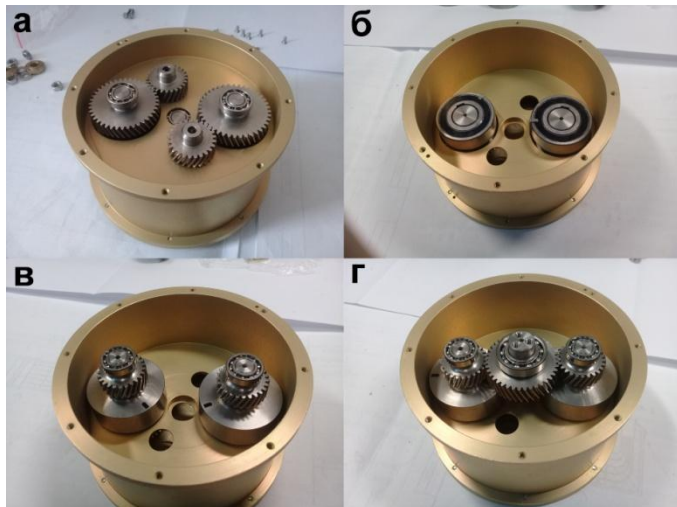
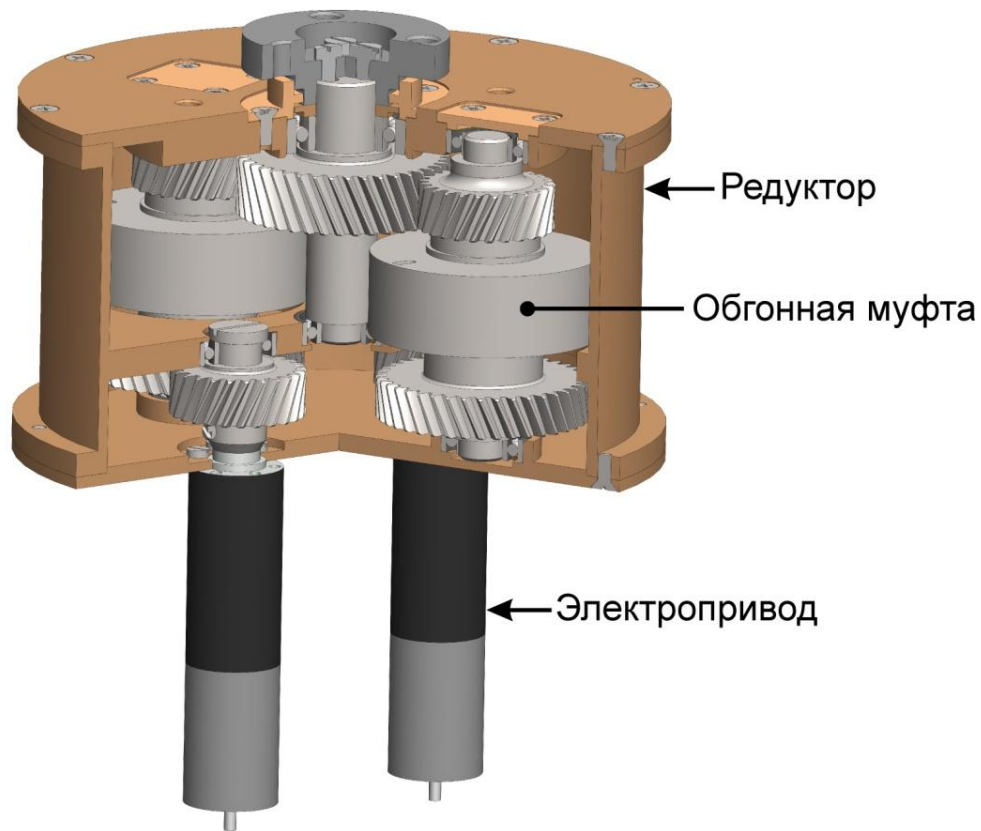


Принцип работы трёхслойной защиты



3 магнита

ПРИВОД ОБТЮРАТОРА



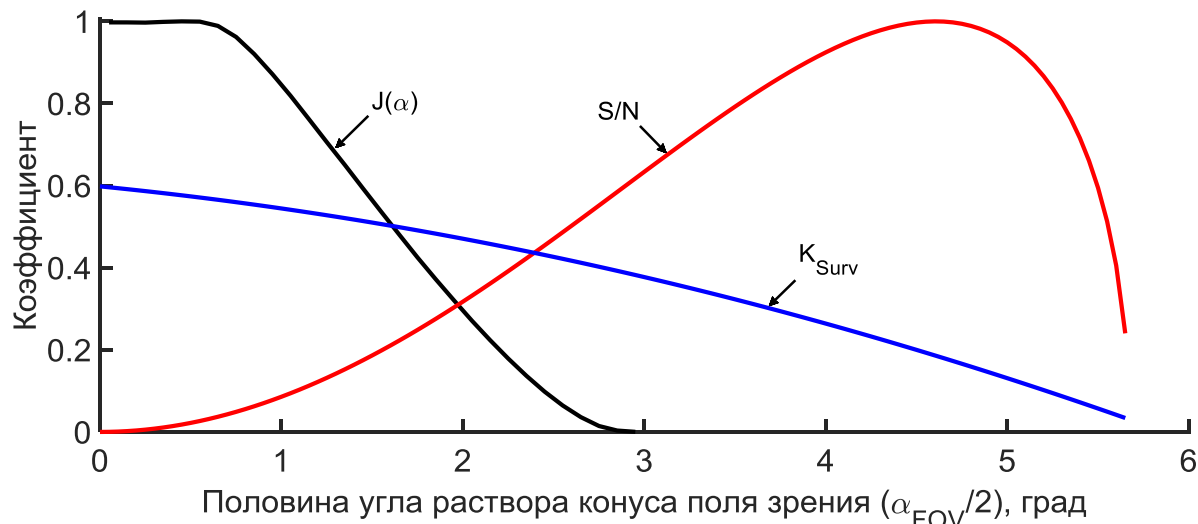
Условные обозначения:

-  Обгонная муфта
-  Электропривод
-  Подшипник качения
-  Передача зубчатая косозубая

УЧЁТ АПЕРТУРНОГО ФОНА

Разработка методики по отбору данных эксперимента, использование которой для измерения КРФ позволяет снизить ошибку измерения до 1 % за 3 года непрерывных измерений

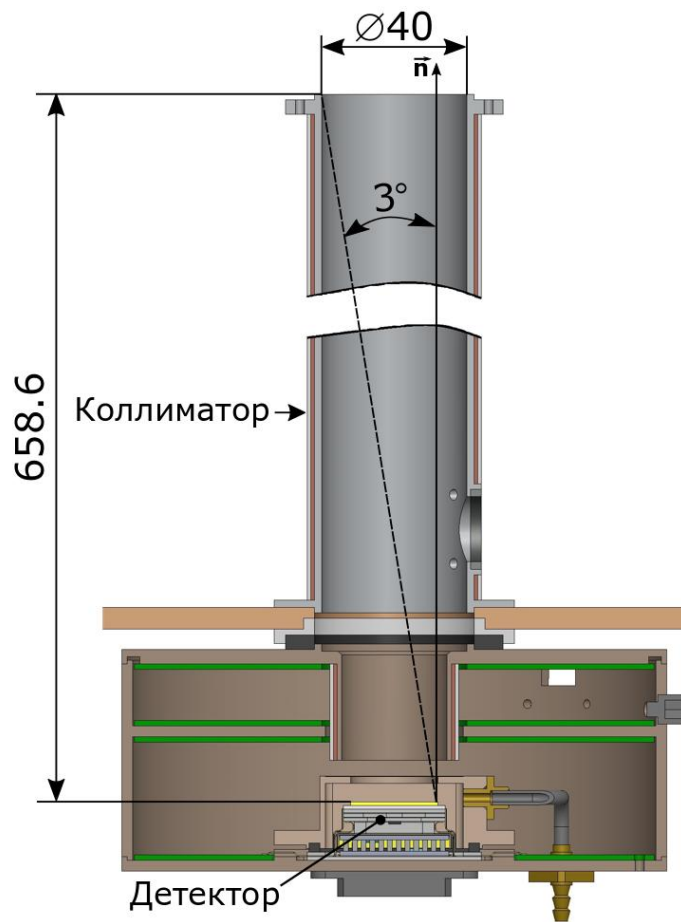
ЗНАЧИМОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ КРФ И ПОЛЕ ЗРЕНИЯ



S/N – значимость регистрации КРФ при исключении из обзора галактических рентгеновских источников

$J(\alpha)$ – относительная интенсивность потока

K_{Surv} – относительная доля неба

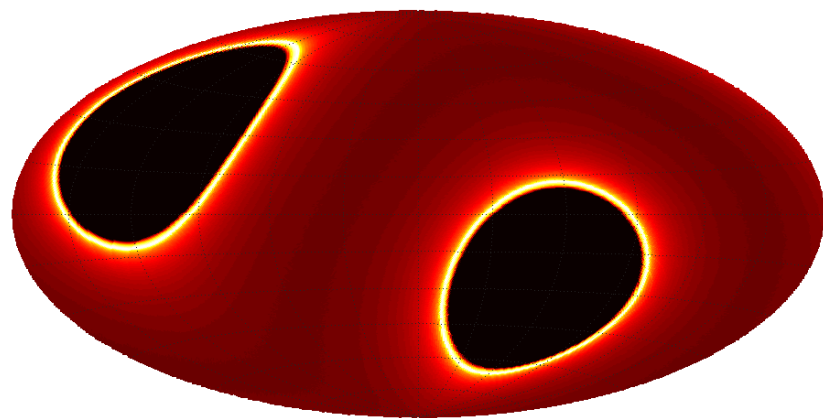


Поле зрения $\Theta = 8.55 \text{ град}^2$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЗОРА ВСЕГО НЕБА

1

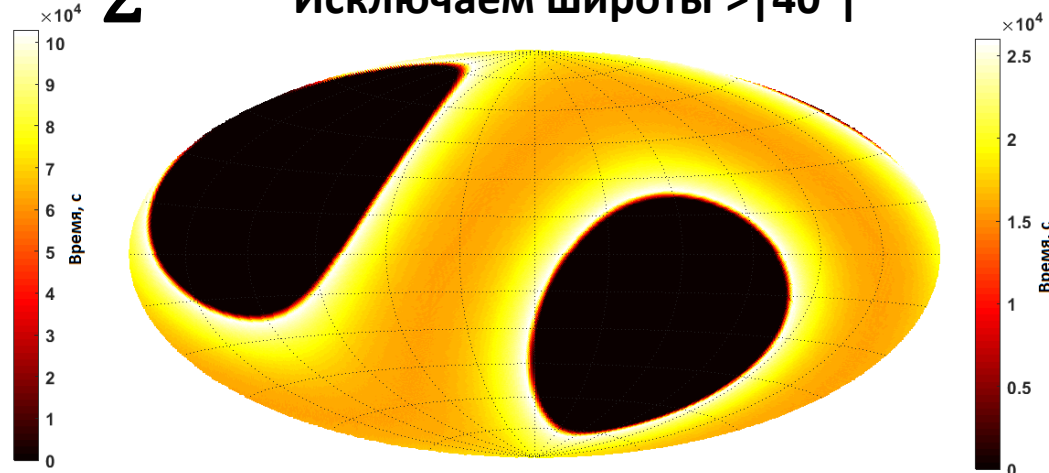
Карта экспозиции всего неба



~80 % небесной сферы

2

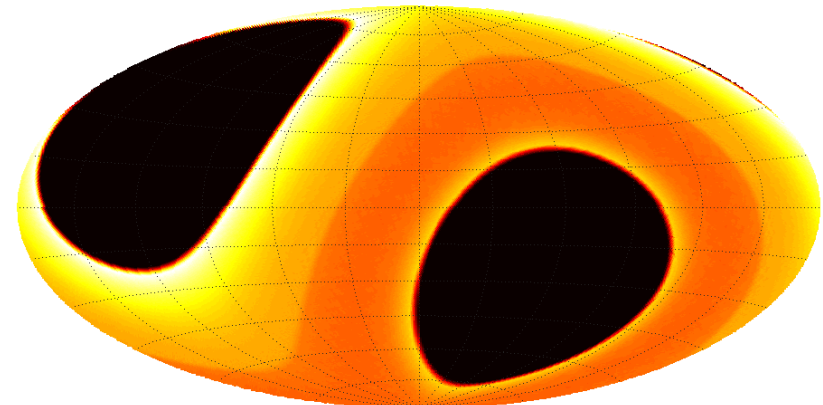
Исключаем широты $> |40^\circ|$



~66 % небесной сферы

3

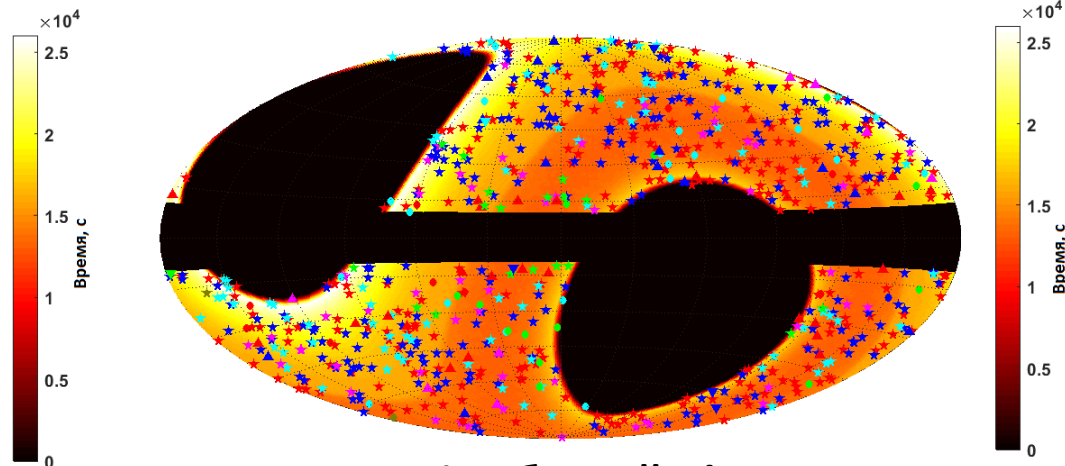
Исключаем Южно-Атлантическую аномалию



~66 % небесной сферы

4

Добавляем источники и исключаем галактическую плоскость (от -10° до $+10^\circ$)



~57 % небесной сферы

РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КРФ

Суммарная погрешность:

$$\text{ERROR} = ST + SY$$

Статистическая погрешность (влияние внеапертурного фона):

$$ST = \frac{\sqrt{4N_{IB} + 2N_{СХВ}}}{2N_{СХВ}}$$

N_{IB} – внеапертурный фон

$N_{СХВ}$ – фотоны КРФ

Модель КРФ [Gruber et al., 1999]:

3 – 60 кэВ: $7.877 E^{-0.29} e^{-\frac{E}{41.13}}$

кэВ

кэВ · см² · с · ср

>60 кэВ: $0.0259 \left(\frac{E}{60}\right)^{-5.5} + 0.504 \left(\frac{E}{60}\right)^{-1.58} + 0.0288 \left(\frac{E}{60}\right)^{-1.05}$

кэВ

кэВ · см² · с · ср

Систематическая погрешность (влияние небесных источников):

$$SY = \frac{\sum_{G=1}^{10} N_G}{2N_{СХВ}}$$

N_G – фотоны от источников

ИСТОЧНИКИ В ОБЗОРЕ ВСЕГО НЕБА SWIFT BAT

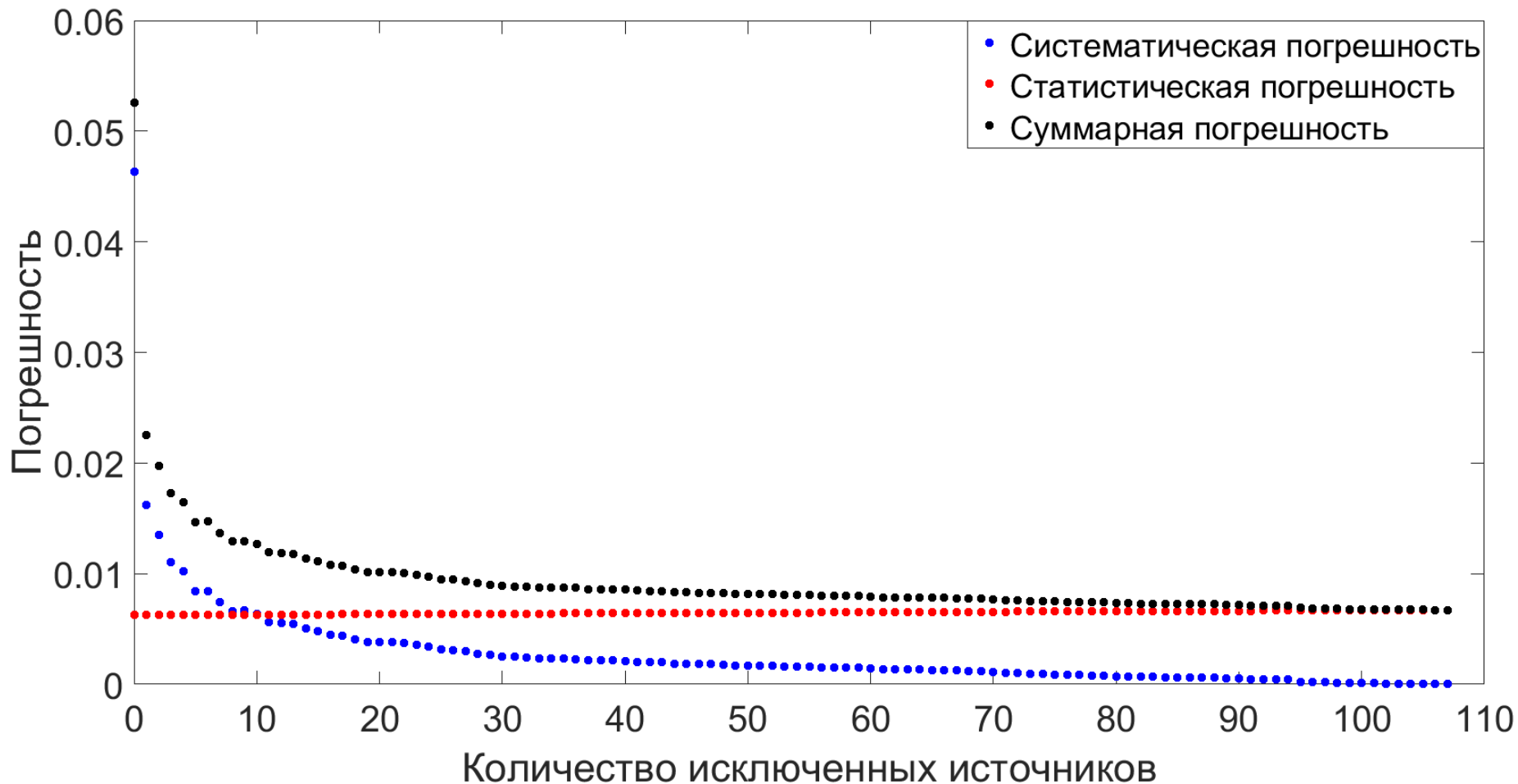
Группа	Класс источника	Кол.	Форма спектра
I	Sy1, Sy1.2, Sy1.5, Sy1 broad-line AGN, LINER, Beamed AGN, 50 % Unknown AGN	335	Таблица (Kendrah D. Murphy and Tahir Yaqoob «An X-ray spectral model for Compton-thick toroidal reprocessors», Mon. Not. R. Astron Soc. 397, 1549-1562, 2009)
II	Sy2, Sy1.8, Sy1.9, Sy2 candidate, 50 % Unknown AGN	302	
III	LMXB, U1, U3	51	$F = E^{-1.9}$
IV	HMXB (X Per)	1	$F = 0.11E^{-1.4} \exp((4.7 - E)/9.1) +$ $+ 0.002E^{-0.7} \exp((55 - E)/32.9)$ (Doroshenko, V. et al., 2012)
V	CV, Nova	28	$F = E^{-1.5} \exp(-E/15)$
VI	U2	11	$F = E^{-2.2}$
VII	Star, Confused source, Symbiotic star (T CrB)	12	$F = E^{-2.5}$
VIII	Compact group of Galaxies (ARP 318)	1	$F = E^{-1.41}$
IX	Open star cluster (Trapezium Cluster)	1	$F = E^{-4.26}$
X	Galaxy Cluster	14	$F = E^{-2} \exp(-E/10)$

САМЫЕ ЯРКИЕ ИСТОЧНИКИ В ОБЗОРЕ МВН

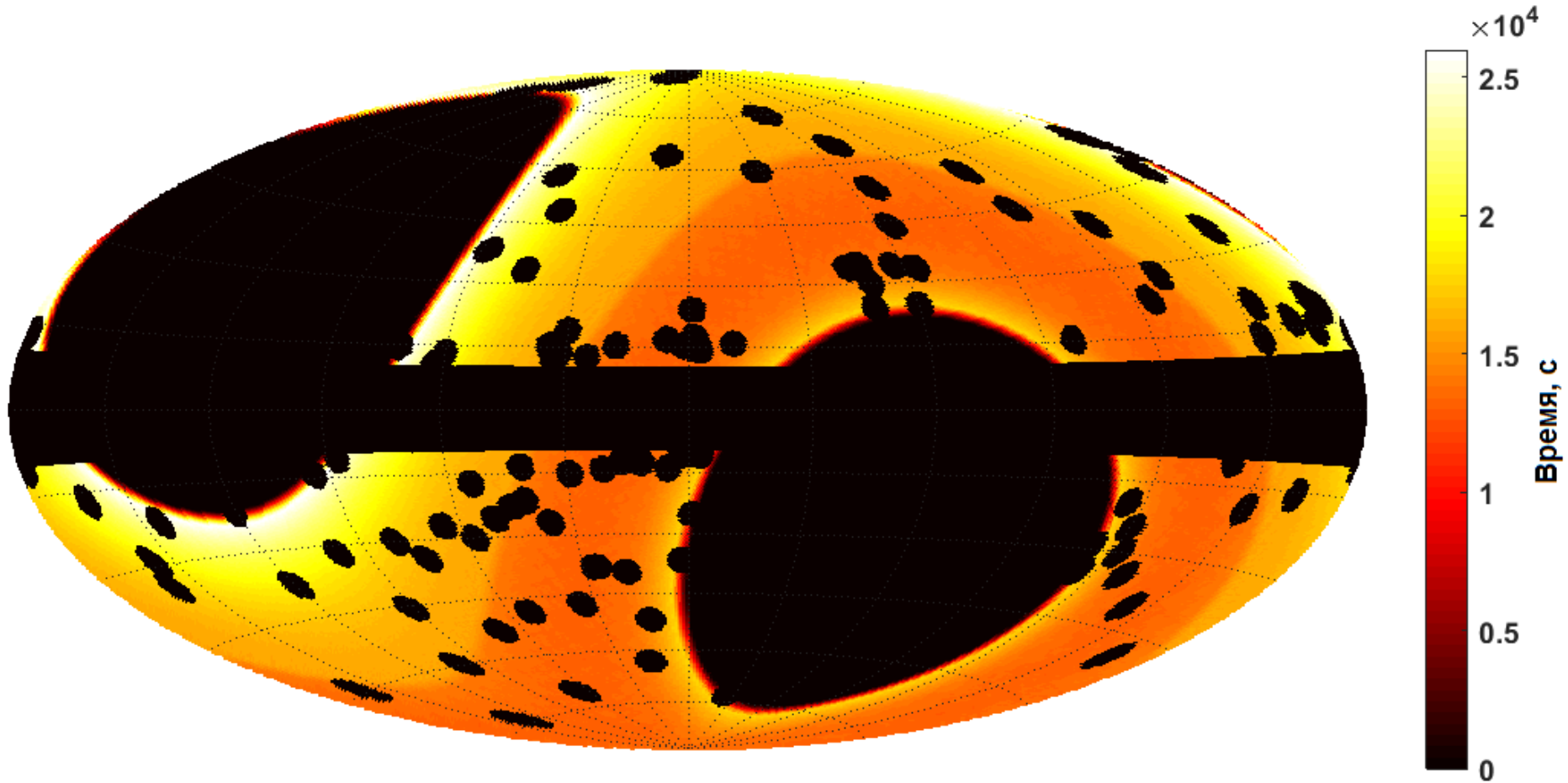
Наименование	Тип	Значимость в МВН за 3 года, σ	Примечание
Sco X-1	LMXB	181	галактический
SWIFT J1753.5-0127	LMXB	26	галактический
Her X-1	LMXB	19	галактический
Cyg X-2	LMXB	14	галактический
Coma Cluster	Galaxy Cluster	10	внегалактический
4U 1822-371	LMXB	9	галактический
V1223 Sgr	CV	9	галактический
HETE J1900.1-2455	LMXB	8	галактический
NGC 4151	Sy1.5	7	внегалактический
X Per	HMXB	6	галактический
3C 273	Beamed AGN	5	внегалактический
1RXS J173021.5-055933	CV	5	галактический

РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

За 3 года наблюдений суммарная погрешность измерения КРФ составит $\sim 1\%$ при исключении из обзора 107 источников



КАРТА ЭКСПОЗИЦИИ НЕБА

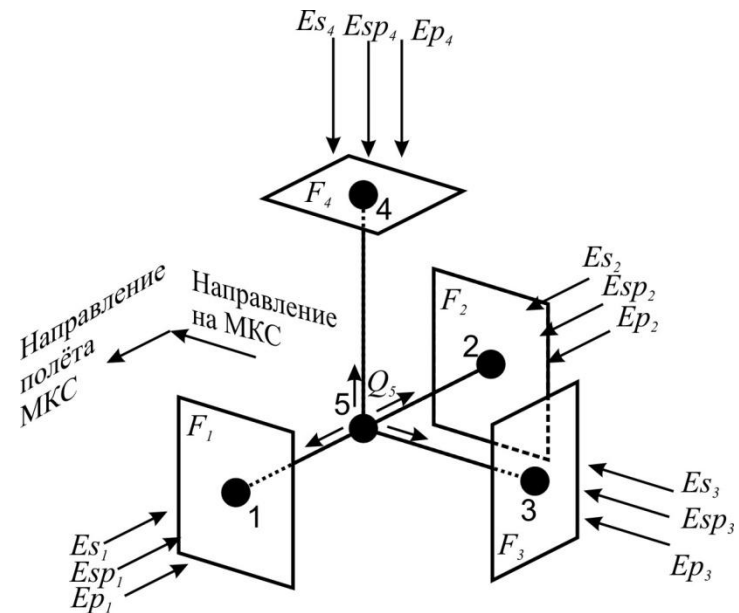


~50 % небесной сферы

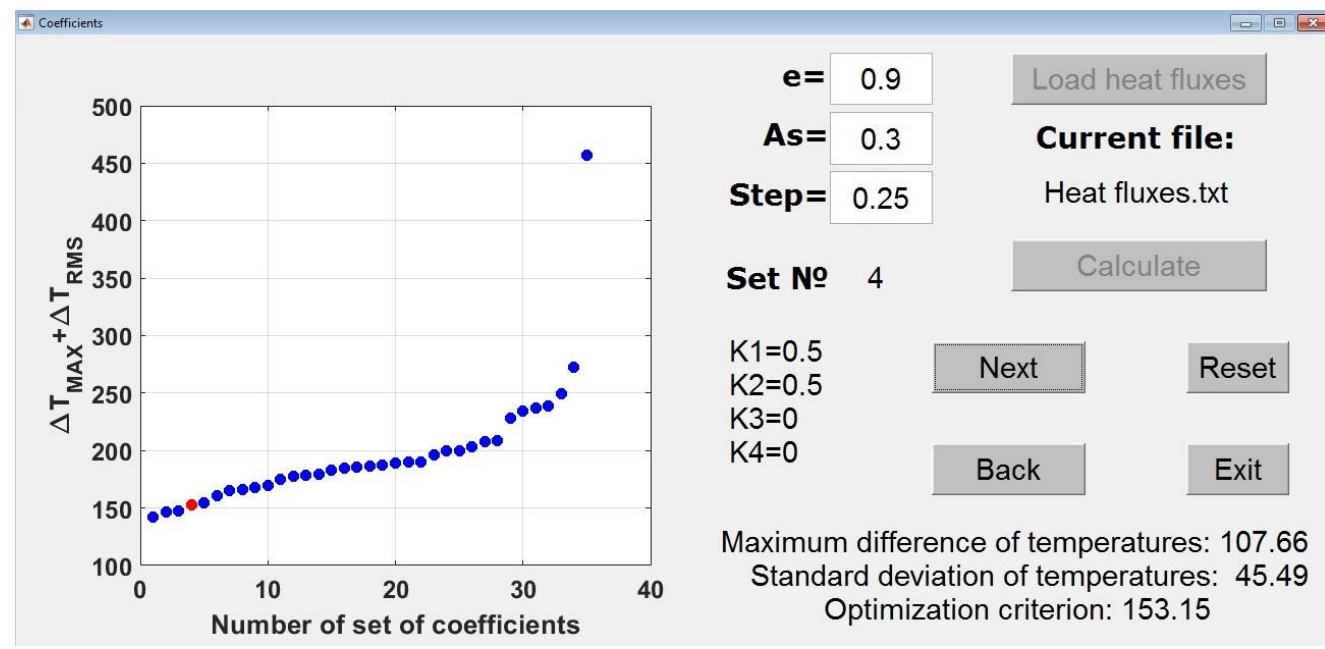
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА

- 1. Прецизионная термостабилизация детекторов**
- 2. Полётная калибровка**

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ



$$\begin{cases} \frac{dT_1(\tau)}{d\tau} \cdot C_1 = (As_1 \cdot (Es_1(\tau) + Esp_1(\tau)) + \varepsilon_1 \cdot Ep_1(\tau)) \cdot F_1 - \frac{T_1(\tau) - T_5(\tau)}{R_{1-5}} - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4(\tau) \cdot F_1, \\ \frac{dT_2(\tau)}{d\tau} \cdot C_2 = (As_2 \cdot (Es_2(\tau) + Esp_2(\tau)) + \varepsilon_2 \cdot Ep_2(\tau)) \cdot F_2 - \frac{T_2(\tau) - T_5(\tau)}{R_{2-5}} - \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4(\tau) \cdot F_2, \\ \frac{dT_3(\tau)}{d\tau} \cdot C_3 = (As_3 \cdot (Es_3(\tau) + Esp_3(\tau)) + \varepsilon_3 \cdot Ep_3(\tau)) \cdot F_3 - \frac{T_3(\tau) - T_5(\tau)}{R_{3-5}} - \varepsilon_3 \cdot \sigma \cdot T_3^4(\tau) \cdot F_3, \\ \frac{dT_4(\tau)}{d\tau} \cdot C_4 = (As_4 \cdot (Es_4(\tau) + Esp_4(\tau)) + \varepsilon_4 \cdot Ep_4(\tau)) \cdot F_4 - \frac{T_4(\tau) - T_5(\tau)}{R_{4-5}} - \varepsilon_4 \cdot \sigma \cdot T_4^4(\tau) \cdot F_4, \\ \frac{dT_5(\tau)}{d\tau} \cdot C_5 = Q_5 - \sum_{i=1}^4 \frac{T_5(\tau) - T_i(\tau)}{R_{i-5}}. \end{cases}$$



$$F = k_1 \cdot F + k_2 \cdot F + k_3 \cdot F + k_4 \cdot F$$

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1$$

$$\Delta T_{MAX} = T_{MAX} - T_{MIN}$$

$$\Delta T_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{\ell=1}^n (T_{\ell} - \bar{T})^2}$$

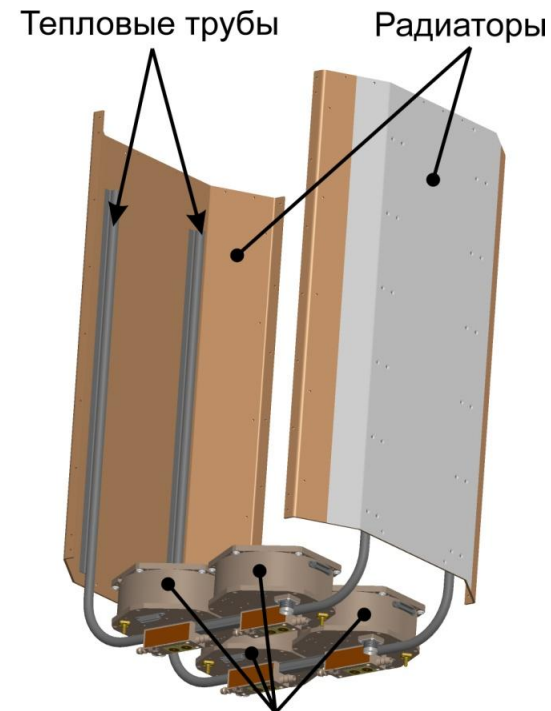
Критерий оптимизации:

$$\Delta T_{MAX} + \Delta T_{RMS} \rightarrow \min$$

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА



СПИН-Х1-МВН с экранно-вакуумной теплоизоляцией

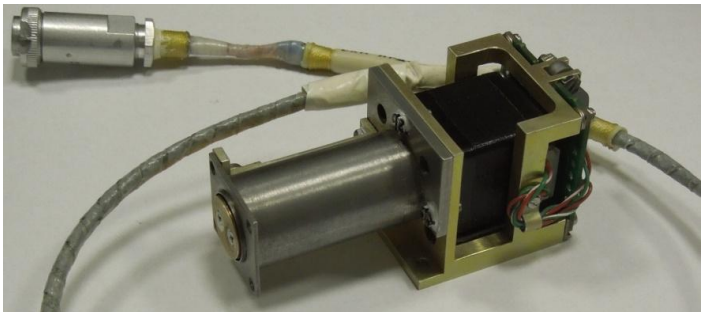


Блоки рентгеновских детекторов

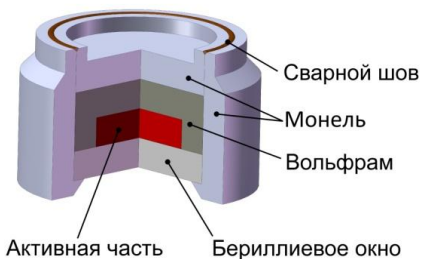
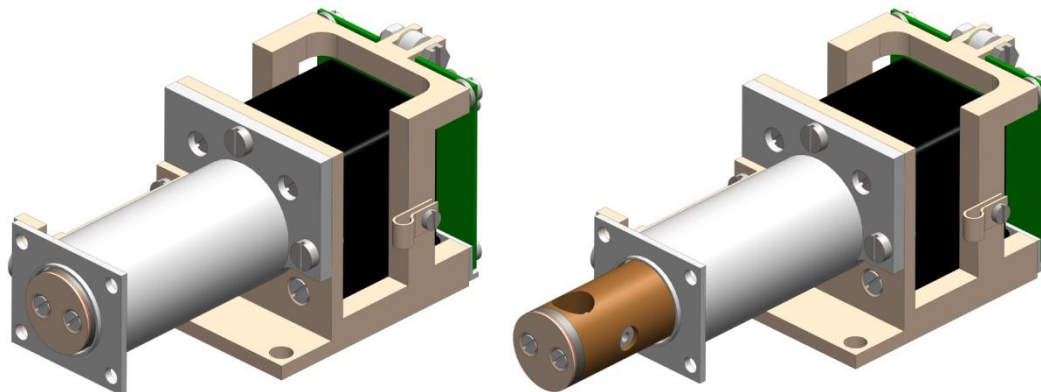
Наименование элемента СОТР	Основные параметры	Количество
Радиатор	Площадь $F = 0,2 \text{ м}^2$; покрытие – ЭКОМ-1	2
Экранно-вакуумная теплоизоляция	ОСТ 92-1380-83	1
Тепловая труба	Перепад температур $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ при мощности $W = 20 \text{ Вт}$	2
Электронагреватель	Мощность $W = 4,5 \text{ Вт}$	20
Термоэлектрический модуль	Холодопроизводительность $Q_{\text{MAX}} = 16,5 \text{ Вт}$; $\Delta T_{\text{MAX}} = 72 \text{ К}$	4

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛЕТНОЙ КАЛИБРОВКИ

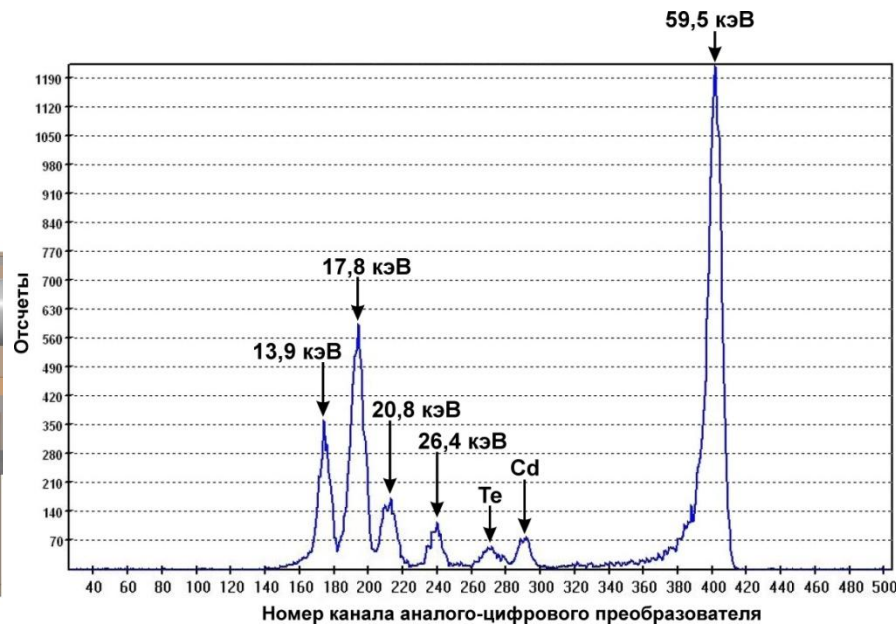
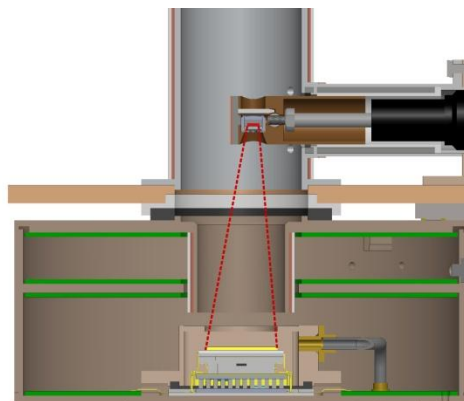
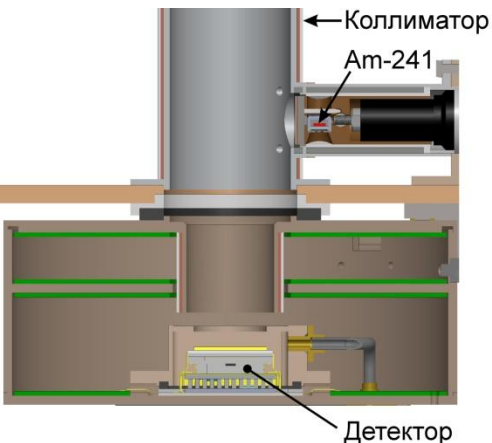
Блок калибровочного источника (БКИ)



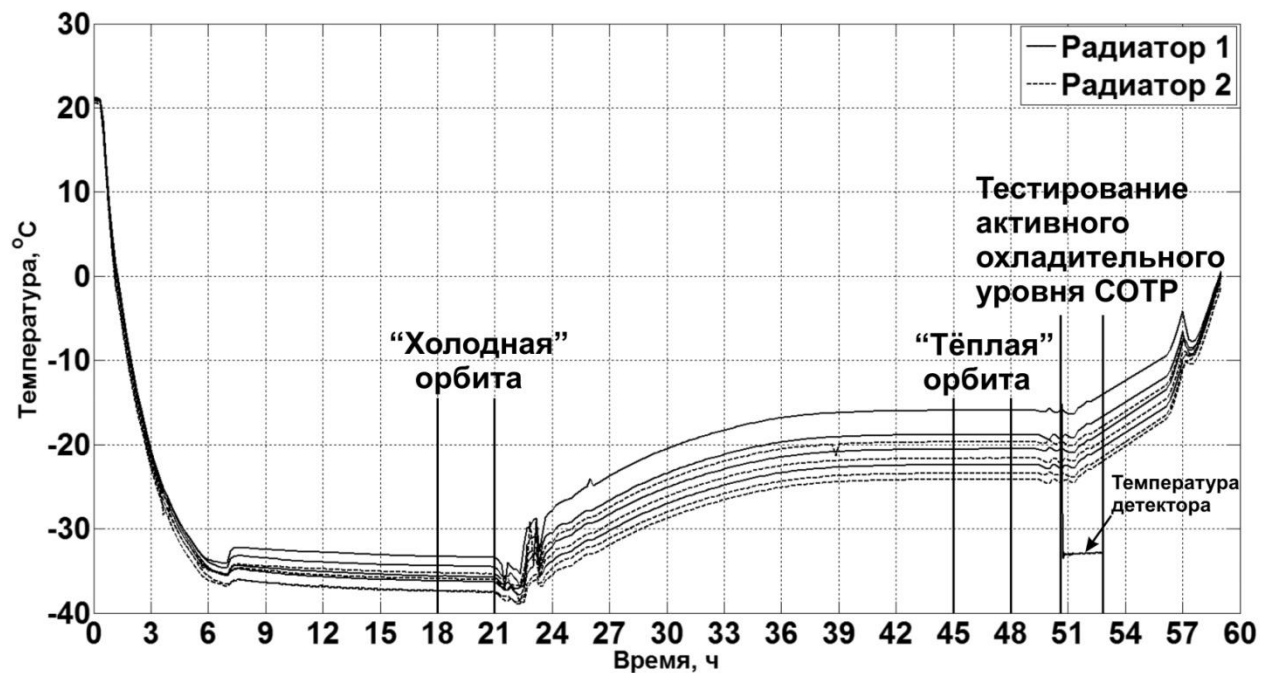
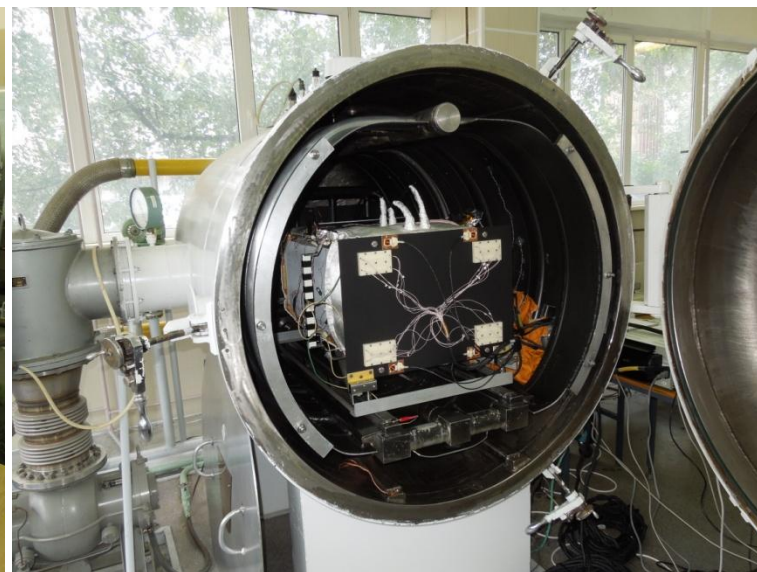
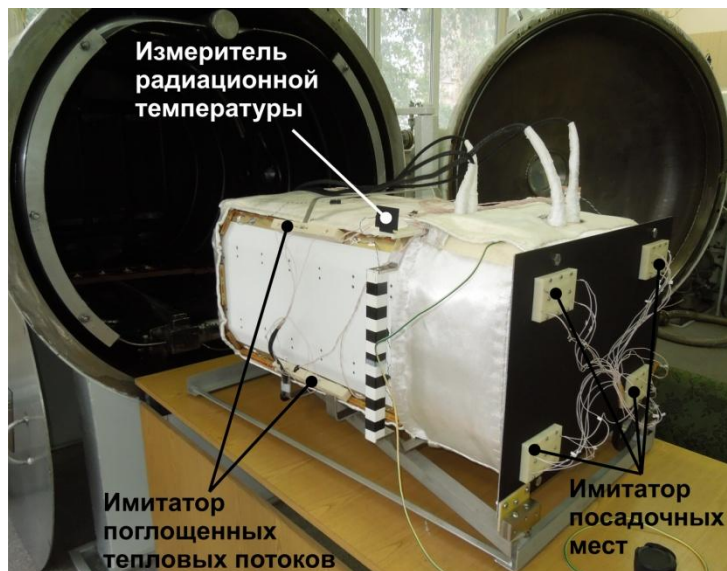
Размеры	105 × 52 × 42 мм
Масса	350 г



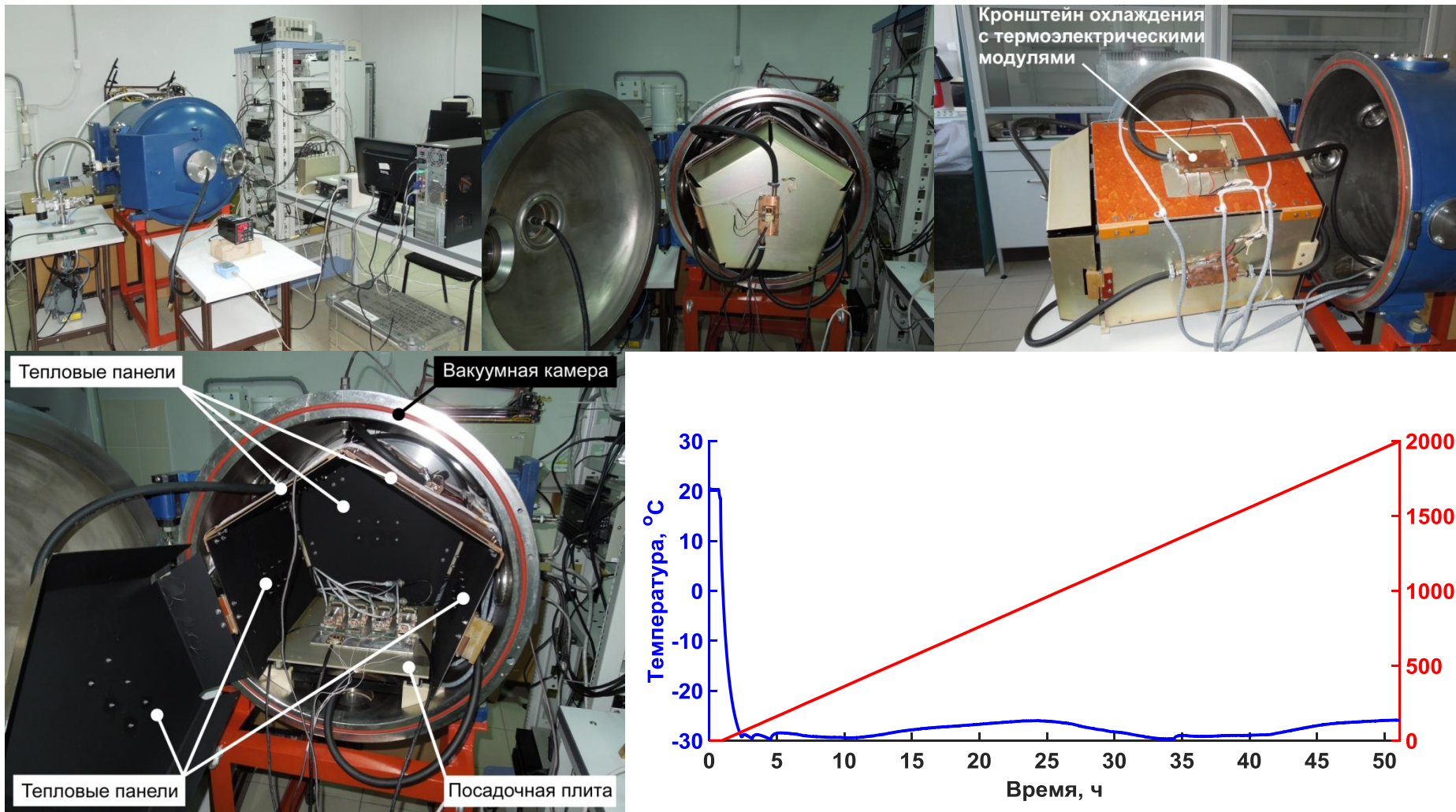
Калибровочный источник – Америций-241
 Активность источника – 400 кБк
 Период полураспада – 432,6 года



ТЕРМОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СПИН-Х1-МВН



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА БКИ



Ресурсные испытания БКИ для КА «Спектр-РГ» при $T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,1\text{ мм рт. ст.}$

Д. В. Сербинов, Н. П. Семена, А. Н. Семена, А. А. Лутовинов, В. В. Левин, С. В. Мольков, А. В. Кривченко, А. А. Ротин, М. В. Кузнецова
«Монитор Всего Неба для высокоточного измерения космического рентгеновского фона с борта МКС», Письма в *Астрономический Журнал*, № 4, 2022

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Научная новизна состоит в том, что впервые создан оригинальный рентгеновский монитор, предназначенный для измерения КРФ в диапазоне энергий от 6 до 70 кэВ, и разработана методика его использования. В результате это позволяет снизить ошибку измерения поверхностной яркости этого явления до ~1 %.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Научная значимость работы состоит в том, что выполненное с помощью созданного монитора высокоточное измерение поверхностной яркости КРФ будет иметь большое значение для моделей эволюции черных дыр во Вселенной и для анализа популяции черных дыр в ближней Вселенной.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные методики и технические решения могут быть использованы для рентгеновских астрофизических приборов различных типов.

ВНЕДРЕНИЕ

➤ 7 блоков калибровочных источников (БКИ) с 2019 года успешно работают на борту телескопа ART-XC имени М.Н. Павлинского обсерватории «Спектр-РГ» в точке L2

Pavlinsky, M. et al. “The ART-XC telescope on board the SRG observatory”, A&A 650, A42 (2021), <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040265>

➤ Лётный образец комплекса научной аппаратуры МВН собран, успешно прошёл приёмо-сдаточные испытания и передан в РКК «Энергия»

ПУБЛИКАЦИИ И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Работа апробирована на следующих конференциях:

1. VIII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2011
2. XII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2015
3. XIII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2016
4. XV Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2018
5. Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», ИКИ РАН, Москва, 2021.

Основные результаты работы опубликованы в статьях:

- 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* 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. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, Vol. 26, №3, pp. 366-376.
- 3). **Д. В. Сербинов**, Н. П. Семена, А. Н. Семена, А. А. Лутовинов, В. В. Левин, С. В. Мольков, А. В. Кривченко, А. А. Ротин, М. В. Кузнецова «Монитор Всего Неба для высокоточного измерения космического рентгеновского фона с борта МКС», *Письма в Астрономический Журнал*, № 4, 2022
- 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). Revnivtsev, 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 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*, 844310 (17 September 2012); doi: 10.1117/12.925916; <http://dx.doi.org/10.1117/12.925916>.
- 6). 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. and Yaskovich, A. “The ART-XC telescope on board the SRG observatory”, *A&A* 650, A42 (2021), <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040265>.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

- 1). 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.
- 2). 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.
- 3). Для решения проблемы учёта апертурного фона разработана методика, обеспечивающая такой баланс между статистической ошибкой измерения и вызываемой внешними факторами систематической ошибкой, при котором суммарная ошибка измерения КРФ снижается до уровня менее 1 % за три года непрерывных наблюдений.
- 4). В обеспечение решения проблемы точной энергетической и абсолютной калибровки монитора разработаны прецизионная система термостабилизации рентгеновских детекторов и система их полетной калибровки.
- 5). Расчетные параметры основных систем рентгеновского монитора подтверждены экспериментальными исследованиями.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

1. Из рис. 2.20 текста диссертации следует, что целевой показатель по погрешности измерений достигается уже при 20 исключенных источниках и дальнейшее увеличение их числа не приводит к его существенному улучшению. В то же время, практическое число исключенных источников составляет более 100, что показывает, что погрешность измерений не является определяющей в вопросе о выборе экспозиций для дальнейшей обработки и оценки величины и спектра КРФ: более важным вопросом является исключение из поля зрения МВН ярких источников галактического и внегалактического происхождения.

ОТВЕТ:

При выборе стратегии отбора событий мы руководствуемся необходимостью сохранения формы спектра. Систематическая ошибка может приводить как к изменению абсолютной нормировки, так и формы спектра. Поэтому предпочтительным является вариант с наименьшей систематической ошибкой.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

2. На стр. 8 диссертации говорится о том, что измерение потока излучения от Крабовидной туманности с помощью МВН на уровне 3-5% могло бы способствовать кросс-калибровке других инструментов, наблюдавших этот объект в разные эпохи, однако исследования последних лет говорят о том, что этот источник обладает переменностью, амплитуда и характерное время которой, вероятно, недооценены, потому подобная кросс-калибровка вряд ли возможна. Кроме того, точность измерения потока от такого яркого источника достаточно высока и у детекторов, не обладающих, подобно МВН, механизмом точной оценки внеапертурного фона. Также в пределах 4° с лишним градусов (половина апертуры МВН) от Крабовидной туманности могут располагаться (или возникать) рентгеновские источники, вклад которых в наблюдаемый МВН поток излучения в диапазоне 6-70 кэВ может находиться на уровне порядка 10^{-3} от потока Крабовидной туманности и таким образом, систематически влиять на оценку потока от этого объекта.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Ответ:

МВН будет видеть Крабовидную туманность в течение одних суток каждые 73 дня с общей экспозицией ~1200 с. За это время МВН регистрирует примерно 10000 фотонов от этого источника, то есть ошибка измерения потока Крабовидной туманности составит 1%. Эти измерения могут быть использованы другими обсерваториями для кросс-калибровки. Вклад других источников, попадающих в поле зрения вместе с Крабовидной туманностью, меньше статистической ошибки измерения. В случае возникновения транзиентных источников, близких к Крабовидной туманности, соответствующие данные будут исключены.

Действительно, из-за переменности потока Крабовидной туманности кросс-калибровка возможна только с приборами, которые наблюдают её квазиодновременно с МВН.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

3. В тексте диссертации не обсуждается влияние транзientных рентгеновских источников на качество и ошибку измерения поверхностной яркости КРФ. Можно было бы ожидать хотя бы оценки количества таких источников с яркостью выше некоторой и их вклада в измеряемые МВН потоки рентгеновского излучения.

Ответ:

При анализе систематических и статистических погрешностей для моделирования вклада ярких источников использовался каталог Swift BAT, который содержит большинство известных ярких рентгеновских транзientов. Из графика на рисунке 2.20 видно, что источники с потоком менее 10 мкб не вносят значимого вклада в систематическую погрешность. Более яркие транзientы будут найдены мониторами всего неба и могут быть исключены в анализе уже полученных данных МВН. Число новых (не наблюдавшихся ранее) транзientов с потоком более десяти милликраб должно быть мало.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

4. В тексте диссертации не обсуждается возможность исключения из анализа экспозиций с яркими источниками, в том числе, транзиентами, на основе пространственного распределения сигнала по 32 рабочим пикселям каждого из детекторов, а также между двумя открытыми детекторами. Также не обсуждается возможность использования спектрального анализа накопленного сигнала КРФ (при том, что спектральный анализ калибровочного сигнала успешно производится, то есть, детектор и система снятия данных это допускают).

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Ответ:

Прибор МВН имеет достаточно низкую эффективную площадь. Моделирование засветки в отдельных пикселях за отдельные проходы будет осуществимо только для ярчайших рентгеновских источников. При этом необходимость оценки потока источника из этих же данных будет приводить к сравнимой потере статистической точности измерения КРФ как и при исключении экспозиции.

Все четыре детектора МВН имеют одно и то же поле зрения и потому засветка от ярких источников в различных детекторах одинакова.

Спектральный анализ данных МВН действительно возможен, однако его следует проводить совместно с измерениями других обсерваторий и это должно быть задачей отдельного исследования.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

5. На стр. 8 автореферата указан средний радиационный фон на орбите МКС (В_ISS), но не указано, к какому диапазону относится этот фон (к полному диапазону МВН 6-70 кэВ?).

Ответ:

Да, фон относится к полному диапазону МВН (6-70 кэВ).

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ РУНЦО М.Ф.

1. Не указано, каким способом (измерение, расчет) получены данные по переменности падающих на прибор тепловых потоков.

Ответ:

Тепловые потоки получены от РКК «Энергия».

2. Ошибочно пронумерован рисунок 18 (который очевидно должен нумероваться как рисунок 2.7).

Ответ:

Согласен, это ошибка.

3. Не указано, является ли приведенная на странице 54 матрица А заимствованием из какого-либо источника или результатом работы диссертанта.

Ответ:

Источник: Жаров В.Е. Сферическая астрономия. – Фрязино, 2006. – 480 с.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ РУНЦО М.Ф.

4. На странице 83 не описана методика измерения (или расчета) функции поглощения рентгеновского излучения слоями пассивной защиты, представленной на рисунке 3.10.

Ответ:

Рисунок 3.10 взят из работы Serbinov et al., 2021. Источник данных, по которым построены графики поглощения: X-Ray Mass Attenuation Coefficients, <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>.

5. На странице 84 не проанализирован возможный вклад балансира, расположенного на обтюраторе (прерывателе потока рентгеновского излучения) на фоновые условия измерения и даже не указаны материалы и размеры этой детали.

Ответ:

Балансир в поле зрения детектора не попадает. Материал балансира – нержавеющая сталь (12Х18Н10Т), размеры 156×56×8 мм.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ РУНЦО М.Ф.

6. На странице 121 на рисунке 4.7 указано сокращение ТЭМ, которое не расшифровано в тексте или подписи к рисунку, хотя из текста следует, что это сокращение обозначает «термоэлектрический модуль».

Ответ:

Действительно, ТЭМ – это термоэлектрический модуль.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ НЕНАРОКОМОВА А.В.

1. Автор не указал по каким количественным показателям осуществляется оптимальная стратегия измерений, состоящая в выборе орбитальных областей с низким фоном, исключении временных интервалов с яркими рентгеновскими источниками (стр. 45).

Ответ: Границы областей с высоким фоном частиц (в области высоких широт и ЮАА) достаточно хорошо известны по данным других обсерваторий, работающих на околоземных орбитах. В пределах этих зон фон частиц растет на порядок, а граница перехода к высокому фону достаточно резкая. При выборе зоны, для исключения данных, использована достаточно простая геометрическая модель, которая, тем не менее, надежно исключает области высокого фона. Эта модель может быть улучшена при помощи более аккуратного анализа данных других приборов (таких как детектор фона MAXI), что приведет к незначительному выигрышу в накопленной экспозиции. Для ярких внегалактических источников количественным показателем является значимость 5σ за три года наблюдений.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ НЕНАРОКОМОВА А.В.

2. Непонятно как все-таки выбирается оптимальное число пикселей (2.28) - (2.30).

От этого зависит и точность, и трудоемкость вычислений.

Ответ: Размер пикселя сравним с угловым разрешением прибора. При этом вычисления выполняются за приемлемое время.

3. Почему автор использует Пуассоновское распределение суммарного сигнала (стр. 63), этот вопрос требует дополнительного обоснования.

Ответ: МВН подсчитывает реальное число фотонов, которое подчинено Пуассоновскому распределению.

4. Параметры внешнего теплообменника (стр. 98) оптимизировались при фиксированной ориентации на МКС, целесообразно было бы ввести в математическую модель угловое положение теплообменника.

Ответ: В математической модели положение радиаторов определяется значениями падающих тепловых потоков, которые выданы РКК «Энергия».