

МОНИТОР ВСЕГО НЕБА

Москва, 25 декабря 2009 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВЕДЕНИЕ	4
2. КОНСТРУКЦИЯ МВН	5
3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	7
4. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ	8
4.1 Диффузный РЕНТГЕНОВСКИЙ ФОН	8
4.2 ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ ДИФфуЗНОГО ФОНА.....	9
4.2.1 <i>Спектр рентгеновского фона</i>	14
4.3 АНИЗОТРОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЯРКОСТИ КРФ В БЛИЖНЕЙ ВСЕЛЕННОЙ	15
4.3.1 <i>6 – 16 кэВ</i>	17
4.4 МОНИТОРИНГ НОВЫХ ТРАНЗИЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ	17
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ	18
6. ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ.....	19
6.1 КАРТЫ ЭКСПОЗИЦИЙ	19
6.2 ЯРКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ И МВН	22
6.2.1 <i>Crab</i>	23
6.3 КАРТЫ IRAS И INTEGRAL И ЗОНЫ ВИДИМОСТИ МВН	24
7. ДЕТЕКТОР.....	27
7.1 БЛОК РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА	27
7.1.1 <i>Пример энергетических спектров Am^{241}</i>	30
7.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА	31
7.3 КОРПУС ДЕТЕКТОРА.....	32
7.3.1 <i>Прозрачность корпуса для фонового излучения</i>	33
7.3.2 <i>Интегральный поток протонов и спектральное разрешение</i>	33
7.4 КОЛЛИМАТОР	35
7.4.1 <i>Диаграмма направленности</i>	36
7.5 КАЛИБРОВОЧНЫЙ ИСТОЧНИК	38
8. БЛОК ЭЛЕКТРОНИКИ	40
8.1 УЗЕЛ 01.....	40
8.2 УЗЕЛ 02.....	41
8.3 УЗЕЛ 03.....	41
9. БЛОК УПРАВЛЕНИЯ	42
10. ИНФОРМАТИВНОСТЬ.....	44
11. ЭТАПЫ РАБОТ В 2010 – 2015 ГГ.....	45
12. СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	46
13. ССЫЛКИ.....	47
14. ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТАБЛИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ГРАФИКА.....	48
15. ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СОТР МВН.....	49
16. ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА.....	57

16.1 CdTe.....	57
16.2 ПРИНЦИП РАБОТЫ	57
16.2.1 Диод Шоттки.....	59
16.2.2 Поляризация.....	60

1. ВЕДЕНИЕ

МВН – **М**онитор **В**сего **Н**еба, астрофизический эксперимент, предназначенный для периодического обзора ~80% небесной сферы в рентгеновских лучах каждые 72 дня в течение трех лет (всего предполагается выполнить 15 таких обзоров).

Эксперимент проводится на российском сегменте МКС.

МВН входит в программу «Наука на МКС» РКК «Энергия», генеральным заказчиком программы является Роскосмос.

Прибор разрабатывается ИКИ РАН по договору с РКК «Энергия».

РФЯЦ-ВНИИЭФ является основным соисполнителем работ ИКИ РАН по изготовлению элементов конструкции МВН.

Основные этапы работ:

- разработка и изготовление прибора – 2007 – 2012 гг.;
- запуск на орбиту – конец 2012 г.;
- проведение ЛКИ – 2013 – 2015 гг.

2. КОНСТРУКЦИЯ МВН

Эксперимент МВН состоит из двух блоков:

- Блок детектирования, содержащий детекторную часть, устанавливается на универсальное рабочее место снаружи МКС;
- Блок управления – устанавливается внутри МКС.

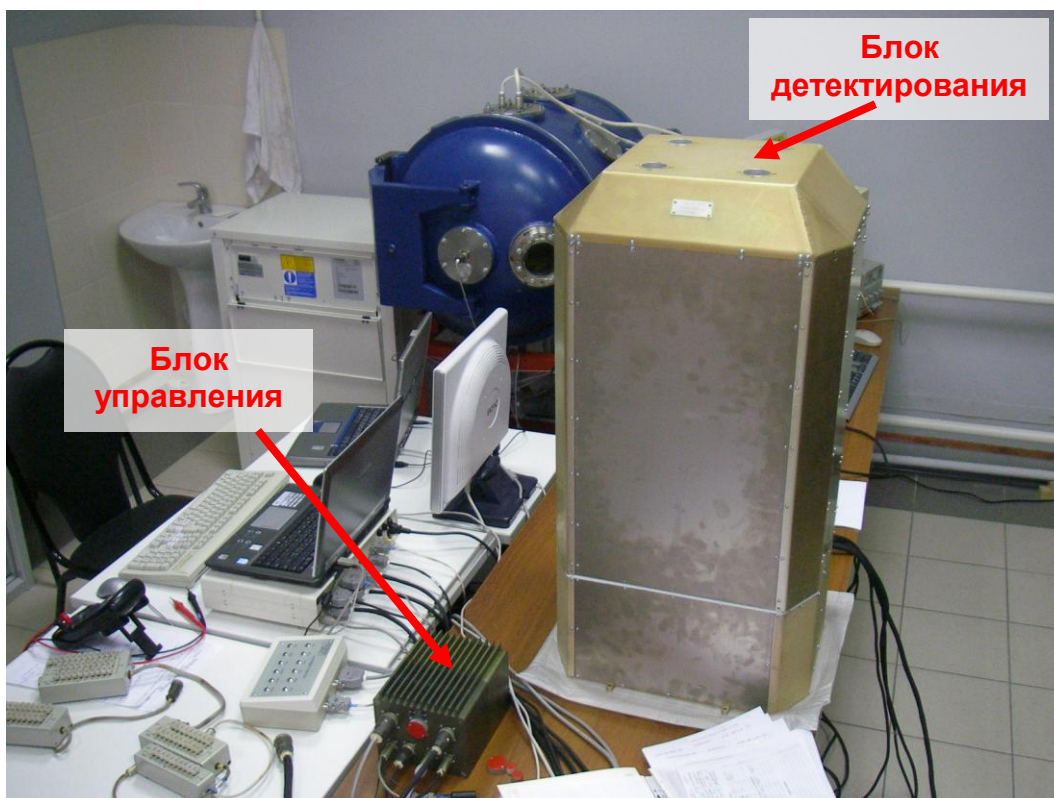


Рис. 2.1. Фотография макета МВН для лабораторно-отрабочных испытаний (ЛОИ) во время наземной отработки в корпусе Б8.

На рис. 2.2. показана иллюстрация блока детектирования МВН и на рис. 2.3 – иллюстрация универсального рабочего места (УРМ) на МКС, на которое будет ставиться блок детектирования МВН.

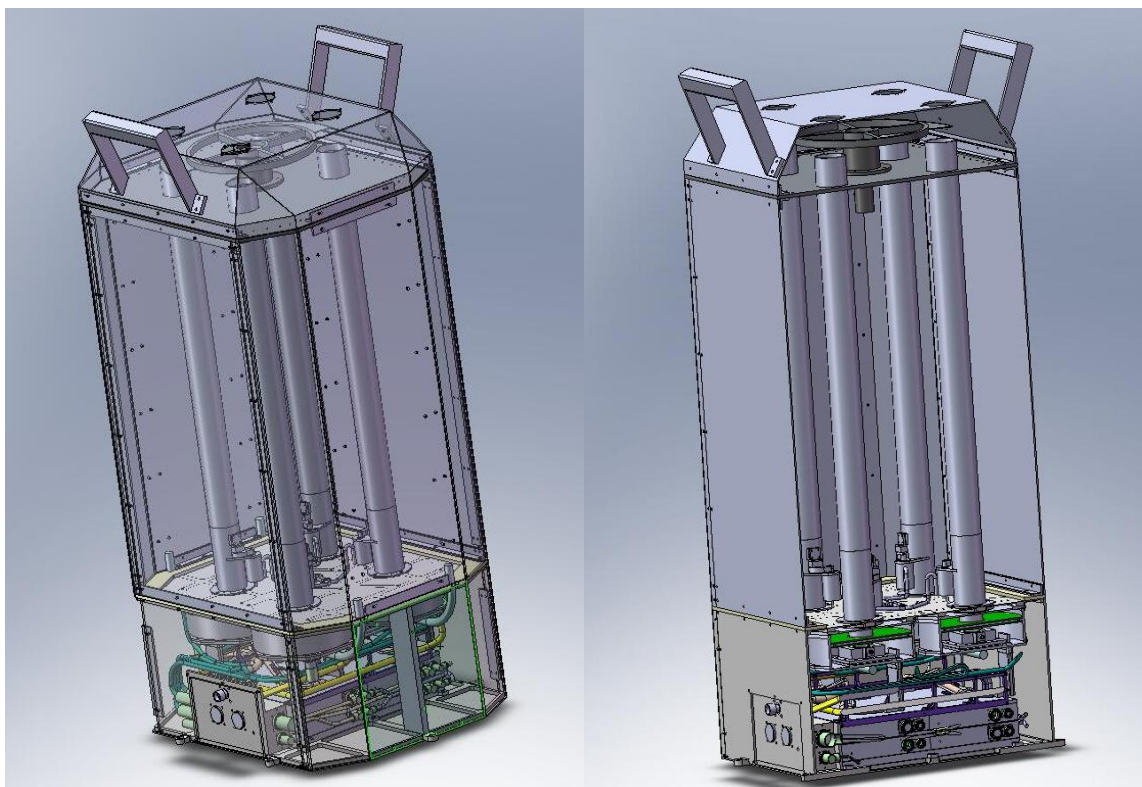


Рис. 2.2. Иллюстрация блока детектирования, устанавливаемого снаружи МКС на универсальное рабочее место, слева – блок с полупрозрачными стенками, справа – блок в разрезе. В состав блока входит четыре канала измерений, в каждом канале – 32-х пиксельный рентгеновский детектор на основе кристаллов CdTe, поле зрения которого ограничено коллиматором. Температура детекторов обеспечивается элементами Пельтье, тепловыми трубами и радиаторами. У каждого детектора есть свой блок электроники. Апертура каналов периодически закрывается вращающимся в верхней части колесом с экраном, непрозрачным для рентгеновского излучения.

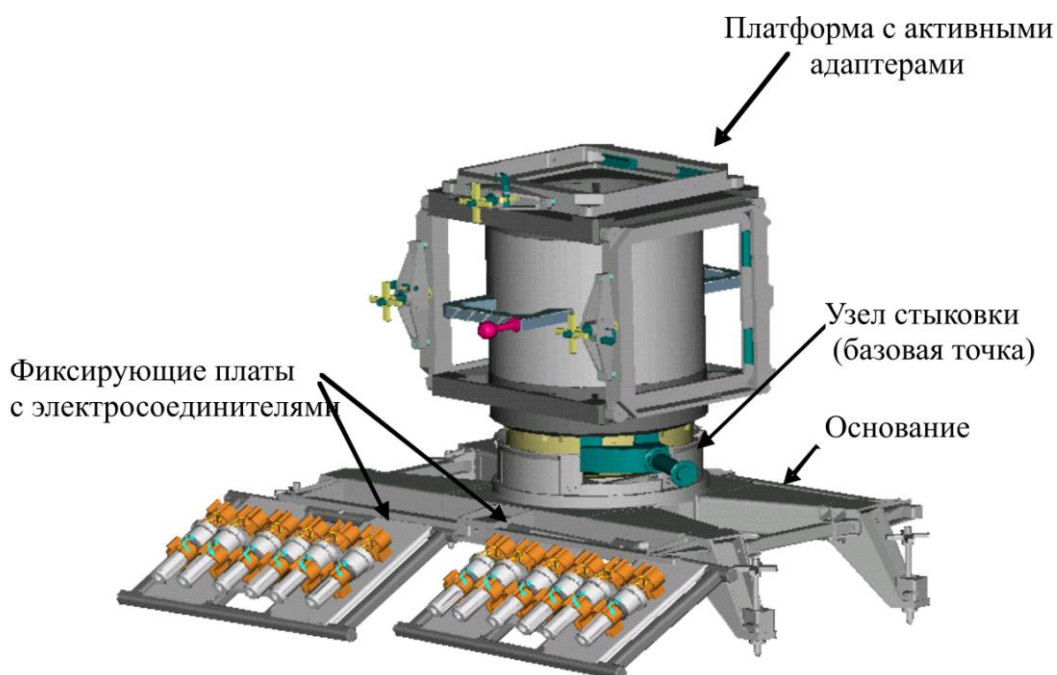


Рис. 2.3. Универсальное рабочее место на МКС.

3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основные характеристики МВН приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Энергетический диапазон	6 – 70 кэВ
Энергетическое разрешение	≤ 1.6 кэВ @ 14 кэВ ≤ 1.8 кэВ @ 60 кэВ
Поле зрения, FWHM	$\sim \varnothing 3.3^\circ$
Геометрическая площадь 32-х пиксельного детектора	2.88 см ²
Число детекторов	4
Временное разрешение	1 мс
Габариты блока детектирования, мм:	
Высота	976
Ширина	497
Длинна	478
Масса	32 кг
Потребление	40 Вт
Габариты блока управления, мм:	
Высота	114
Ширина	225
Длинна	175
Масса	3.5 Кг
Потребление	20 Вт

Масса межблочных кабелей не учитывается.

4. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

4.1 Диффузный рентгеновский фон

Главной научной задачей МВН является исследование диффузного рентгеновского фона с высокой точностью, а именно – измерение поверхностной яркости космического рентгеновского фона.

Открытие космического рентгеновского фона (КРФ) было одним из первых открытий в истории рентгеновской астрономии. С тех пор практически все рентгеновские обсерватории мира проводили измерения поверхностной яркости КРФ. После того, как было показано (Giaccopi, et. al., 1979), что излучение КРФ складывается из излучения большого количества отдельных точечных источников – сверхмассивных черных дыр – активных ядер галактик (АЯГ), интерес к КРФ возрос многократно. Основной интерес к изучению КРФ обусловлен тем, что КРФ содержит в себе информацию об истории аккреции на сверхмассивные черные дыры во всей Вселенной.

Наибольшее количество измерений КРФ приходится на так называемый стандартный рентгеновский диапазон энергий 1 – 10 кэВ (см. рис. 4.1.1). В энергетическом диапазоне 10 – 100 кэВ измерения КРФ очень немногочисленны. Фактически в этом диапазоне энергий существует всего несколько измерений, и наиболее значимые из них получены на спутнике серии Космос (Mazets, et. al., 1975) и на обсерваториях HEAO-1 (Kinzer, et. al., 1997) и INTEGRAL (Churazov, et. al., 2007).

Значение поверхностной яркости КРФ, полученное в указанных выше экспериментах, отличается на 10 – 15% и эта неопределенность оказывается весьма существенной при проверке современных моделей эволюции сверхмассивных черных дыр во Вселенной. Диапазон энергий 10 – 100 кэВ важен еще и потому, что пик КРФ расположен в области энергий 20 – 40 кэВ.

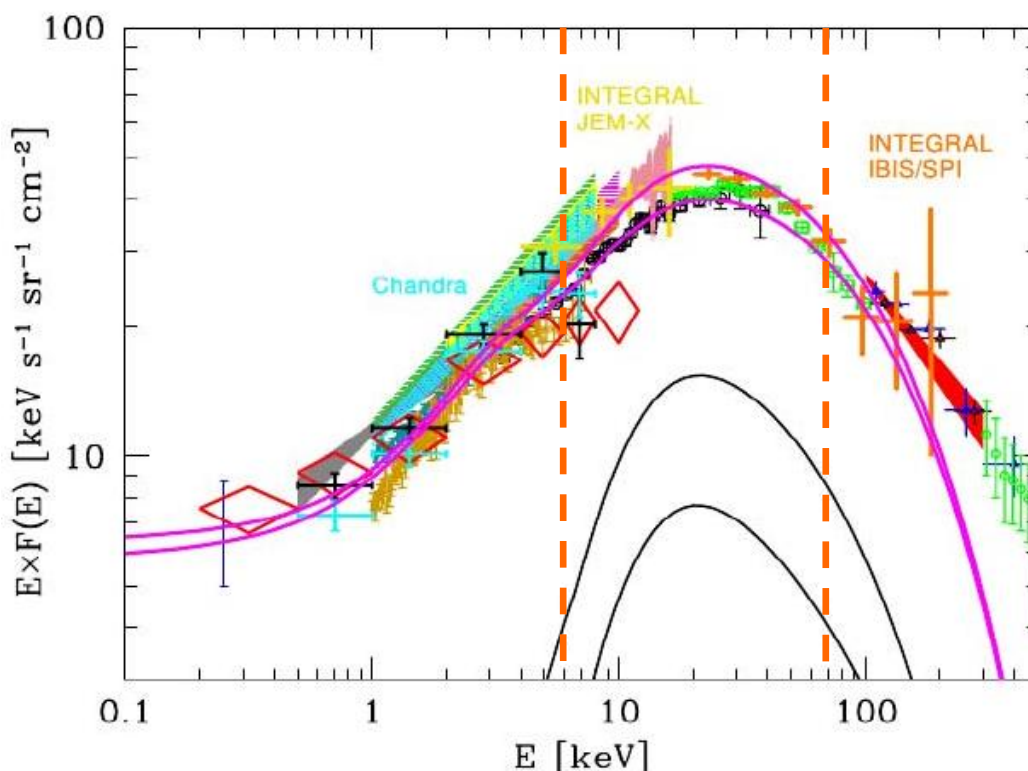


Рис. 4.1.1. Измерения космического рентгеновского фона различными обсерваториями. Хорошо видно, что на энергиях 20 – 40 кэВ фактически существует всего пара измерений – обсерватории HEAO-1 (черные и зеленые точки) и INTEGRAL (желтые и оранжевые точки). Оранжевые пунктирные линии обозначают диапазон МВН 6 – 70 кэВ.

Поверхностная яркость КРФ в области энергий 20 – 40 кэВ складывается из излучения далеких (на красных смещениях $z = 1 - 2$) активных ядер галактик (АЯГ) без газопылевых торов (так называемые Сейфертовские галактики первого типа) и с газопылевыми торами (Сейфертовские галактики второго типа), которые имеют сильно различную форму спектров из-за большого фотопоглощения мягких фотонов в спектрах Сейфертовских галактик второго типа. Соотношение числа АЯГ во Вселенной с поглощением и без поглощения в рентгеновских спектрах, определяемое по моделям, сильно зависит от формы спектра КРФ в области энергии 20 – 40 кэВ (см. рис. 4.1.1), т.е. как раз в области работы МВН. Таким образом, дополнительное высокоточное определение поверхностной яркости космического рентгеновского фона при помощи МВН будет иметь большое значение для моделей эволюции черных дыр во Вселенной и для анализа популяции черных дыр в ближней Вселенной.

4.2 Оценка чувствительности наблюдений диффузного фона

МВН будет наблюдать диффузный рентгеновский фон через узкий коллиматор, ограничивающий поле зрения телесным углом ~ 8.55 град² (FWHM). В поле зрения МВН будут попадать яркие галактические рентгеновские источники, в основном это двойные системы, и Galactic Ridge – протяженная область вдоль Галактической плоскости, очень насыщенная различными источниками. В один из 72 дней МВН будет «чиркать» по Солнцу, при этом суммарное время видимости Солнца не превысит 18 минут.

Чувствительность наблюдений, как правило, определяется уровнем фона в детекторе. В скорости счета детектора МВН будет доминировать внутренний фон, который генерируется:

- первичными космическими лучами;
- протонами и электронами, захваченными радиационными поясами Земли и Южной Атлантической Аномалией;
- распадом различных радиоактивных материалов, которые могут присутствовать в корпусе станции и МВН, и которые будут активироваться при прохождении ЮАА и в высоких широтах;
- излучением, идущим от атмосферы Земли – так называемым альбедным излучением;
- диффузным излучением и излучением ярких рентгеновских источников, прошедшим через пассивную защиту детектора вне поля зрения коллиматоров.

Внутренний фон будет сильно переменным и зависящим от широты. В ЮАА он будет настолько высок, что проведение каких-либо наблюдений при пролете ЮАА будет бессмысленным.

Для разделения диффузного излучения, идущего через коллиматор, от внутреннего детекторного фона в МВН предлагается применить технику одновременного измерения излучения и фона при помощи временного перекрытия поля зрения коллиматоров МВН непрозрачным для излучения экраном. Перекрытие поля зрения осуществляется каждые 30 секунд в минутном временном интервале, т.е. 50/50 (см. рис. 4.1.2). Предполагается, что на минутном временном интервале, уровень детекторного фона не изменяется.

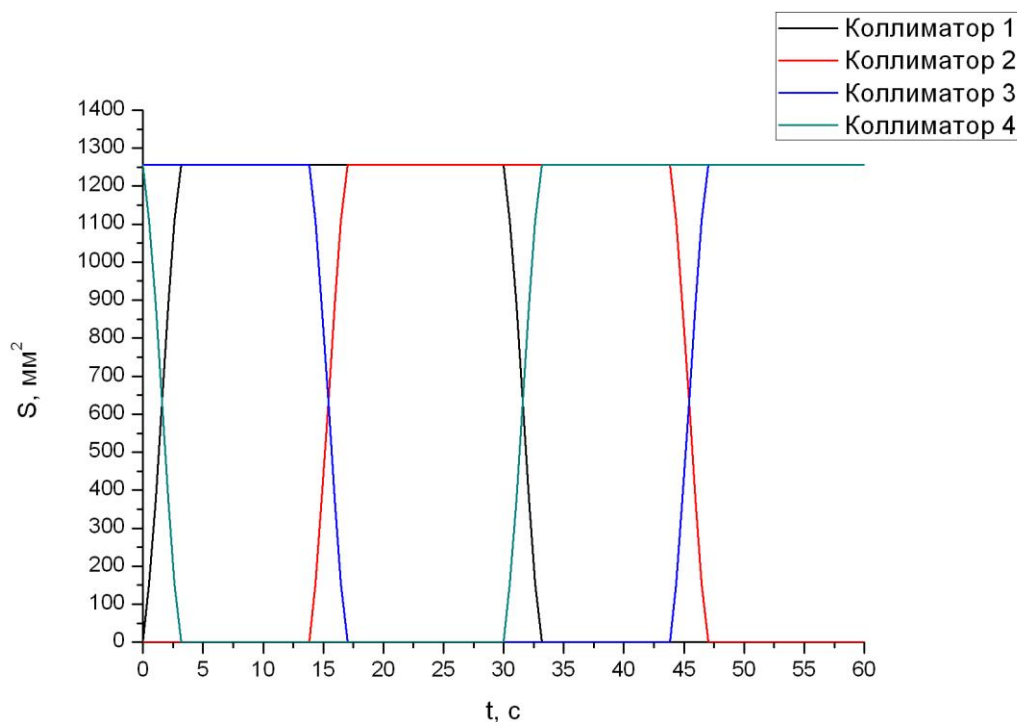


Рис. 4.2.1. Циклограмма последовательного перекрытия и открытия поля зрения четырех коллиматоров МВН вращающимся колесом, которое в любой момент времени

постоянно перекрывает поле зрения двух коллиматоров, период вращения колеса 60 секунд.

При таком подходе задача сводиться к следующему, выбрать участки орбиты, где будет относительно низкий фон, исключить временные интервалы, когда яркие Галактические рентгеновские источники, область Galactic Ridge и Солнце попадают в поле зрения коллиматоров МВН и получить усредненный полезный сигнал по диффузному фону в виде:

$$\overline{CXB} = \sum_{i=1}^{i=4} \overline{CXB_i + B_i} - \sum_{k=1}^{k=4} \overline{B_k}$$

Где CXB – диффузный рентгеновский фон, B – внутренний фон детектора, i – номер детектора от 1 до 4 в интервале времени, когда поле зрения открыто и k – номер детектора в интервале времени, когда поле зрения закрыто.

Диффузный рентгеновский фон изотропен, каноническим спектром фона принято считать эмпирическую комбинацию из двух компонент – экспоненциальной и степенной, полученную на эксперименте HEAO-1 (Gruber, et. al., 1999):

$$\begin{aligned} 3 - 60 \text{ кэВ: } & 7.877E^{-0.29} e^{-E/41.13}, \text{ кэВ}^2 (\text{кэВ см}^2 \text{ с ср})^{-1}, \\ > 60 \text{ кэВ: } & 0.0259 \cdot \left(\frac{E}{60}\right)^{-5.5} + 0.504 \cdot \left(\frac{E}{60}\right)^{-1.58} + 0.0288 \cdot \left(\frac{E}{60}\right)^{-1.05}, \text{ кэВ}^2 (\text{кэВ см}^2 \text{ с ср})^{-1}, \end{aligned}$$

где E – энергия фотона в кэВ.

Поток фотонов космического фона в диапазоне энергий 6 – 70 кэВ составляет 5.078 фот $\text{с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$, т.е. для одного детектора с площадью 2.88 см^2 и эффективным телесным углом $\Omega = 8.55 \text{ град}^2$ ($2.6 \times 10^{-3} \text{ стер}$) поток будет порядка $3.8 \times 10^{-2} \text{ фот с}^{-1}$, и для двух детекторов $7.6 \times 10^{-2} \text{ фот с}^{-1}$ соответственно.

Согласно оценкам, внутренний фон на детекторе, вызванный космическими лучами, будет варьироваться в пределах от 10^{-3} (на экваторе) до 10^{-1} (в высоких широтах) отсчета $\text{с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$ и $\geq 10^2$ отсчета $\text{с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$ в Южной Атлантической Аномалии.

Потери времени при пролете станции через ЮАА составляют в целом примерно 5 орбит по 20 минут, т.е. за сутки потери времени составят $\sim 7\%$. В районе высоких широт над Австралией и Северной Америкой в областях с низким геомагнитным обрезанием также будет высокий фон.

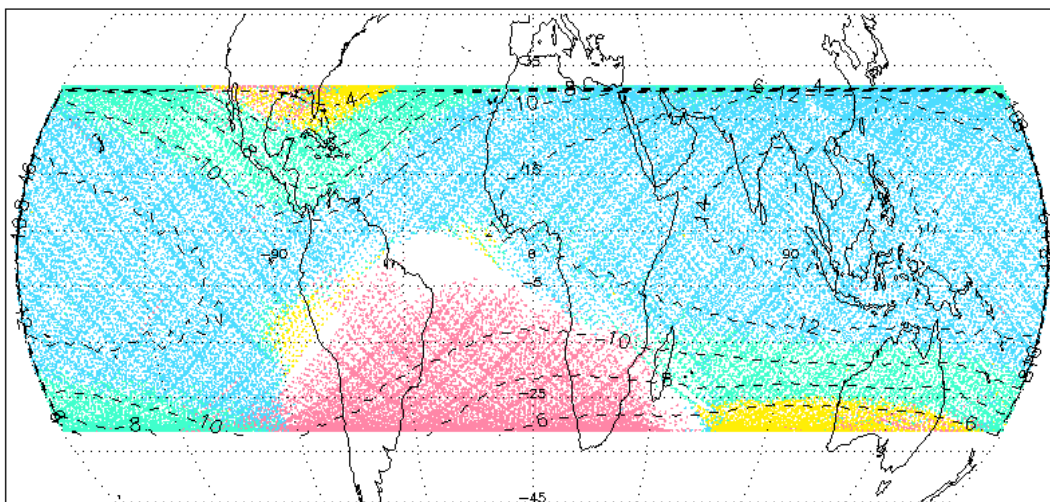


Рис. 4.2.1.1. На данной карте изолиниями показан уровень магнитной жесткости в пределах широт $\pm 31.5^\circ$. Цветом показан уровень фона для орбиты с высотой 580 км, которая использовалась для японского спутника ASCA. Хорошо видна ЮАА в розовом цвете, в которой фон был за пределами и наблюдения не велись, а также области желтого цвета в районах Северной Америки над Флоридой и Австралии, где уровень фона был неблагоприятен ($R \leq 6 \text{ ГэВ с}^{-1}$) для наблюдений.

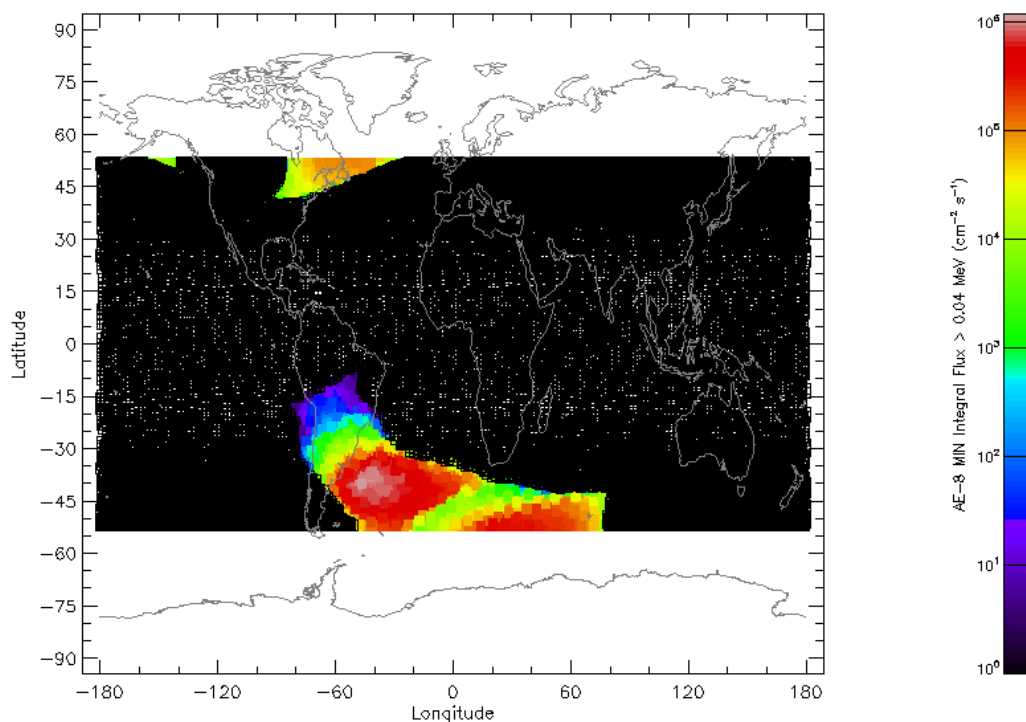


Рис. 4.2.1.2. Оценки интегрального потока электронов с энергиями $> 40 \text{ кэВ}$ для орбиты МКС в модели AE-8, полученные при помощи программы SPENVISE.

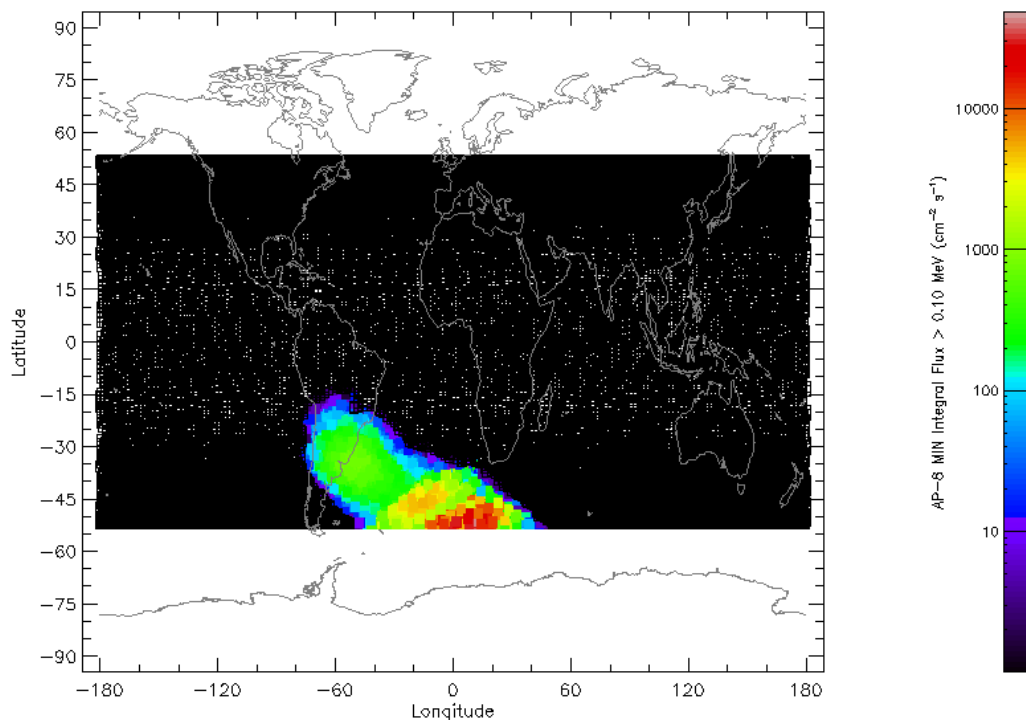


Рис. 4.2.1.3. Оценки интегрального потока протонов с энергиями >100 кэВ для орбиты МКС в модели AE-8, полученные при помощи программы SPENVISE.

Программа SPENVISE недостаточно хорошо адаптирована для орбиты МКС, тем не менее, если использовать эти данные, суммарные оценки потери времени в зонах с уровнем фона ≥ 10 частиц $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ не превышают 20% общего времени.

Исходя из изложенного можно сделать следующие предположения:

- полезное время для наблюдений МВН на орбите МКС будет составлять 80%, соответственно 20% времени будет теряться, из них 7% будет связано с пролетом МКС над ЮАА и 13% с полетом МКС в высоких широтах;
- в пределах широт $\leq |30^\circ|$ усредненная скорость счета в МВН, вызванная заряженными частицами, не будет превышать 5×10^{-3} отсчета $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$, при этом 40% от общего времени МКС будет находиться в пределах этих широт;
- в пределах широт $> |30^\circ|$ усредненная скорость счета в МВН, вызванная заряженными частицами, не будет превышать 5×10^{-2} отсчета $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$, при этом 60% от общего времени МКС будет находиться в пределах этих широт.

При таком предположении МВН зарегистрирует за сутки в открытых каналах от диффузного фона $0.8 \times 86400 \times 7.6 \times 10^{-2} = 5253$ «полезных» фотонов на фоне $0.8 \times 86400 \times (0.4 \times 5 \times 10^{-3} + 0.6 \times 5 \times 10^{-2}) \times 64 \times 2 \times 2.88 = 815372$ «шумовых» отсчетов (~ 2 отсчета $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$) от заряженных частиц и для получения полезного сигнала из $5253 + 815372 = 820625$ отсчетов надо будет вычесть столько же 815372 «шумовых» отсчетов, зарегистрированных в закрытых каналах МВН.

В результате уровень полезного сигнала при использовании данных со всех широт $\leq |51.5^\circ|$ за сутки составит не многим более 4.1σ :

$$\approx \frac{5253}{\sqrt{2 \times 815372}} = 4.11 \sigma$$

- за один период прецессии орбиты, равный 72 дням, уровень сигнала достигнет 34.9σ ;
- за 1 год 78.6σ ; и
- за 2 года 111.1σ соответственно.

Если же брать область широт $\leq |30^\circ|$, где уровень «шумового» фона наиболее низкий, то уровень сигнала за сутки составит уже 6.5σ

$$\approx \frac{0.4 \times 5253}{\sqrt{2 \times 0.8 \times 86400 \times 0.4 \times 5 \times 10^{-3} \times 64 \times 2 \times 2.88}} = 6.57 \sigma$$

- за один период прецессии орбиты – 55.7σ ;
- за 1 год 125.5σ ; и
- за 2 года 177.6σ соответственно.

4.2.1 Спектр рентгеновского фона

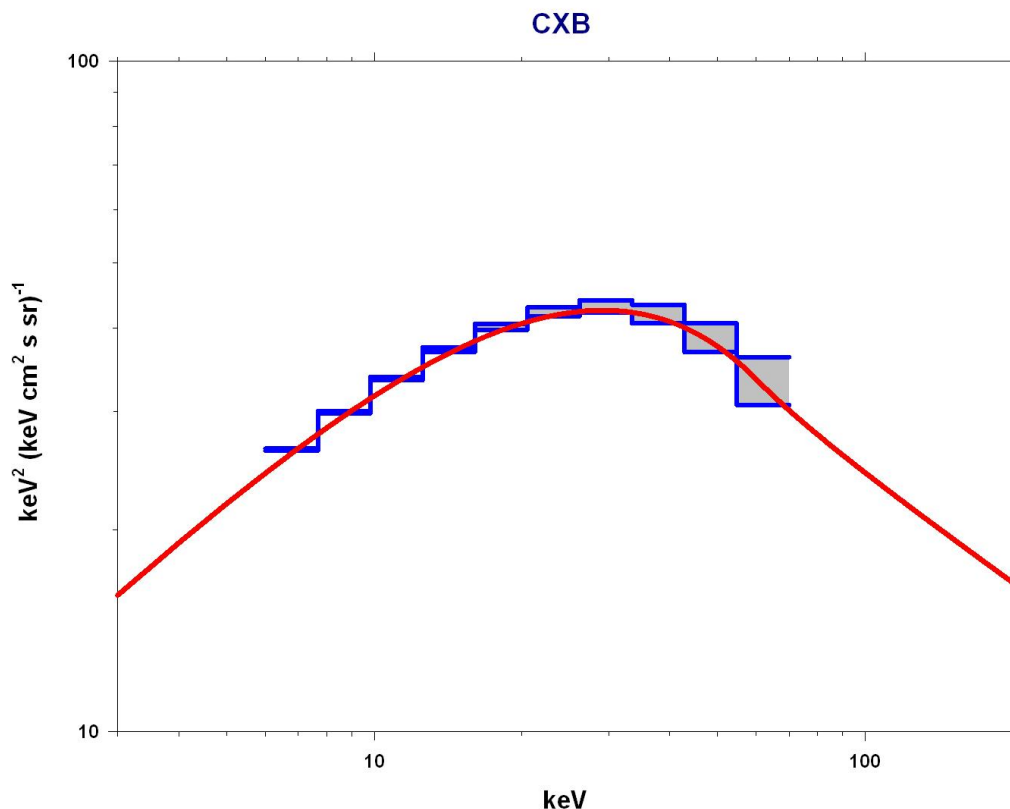


Рис. 4.2.1.1. Спектр диффузного фона $E \times F(E)$, красная линия – эмпирический спектр (Gruber, et. al., 1999), две синих кривых ограничивают серую область шириной $\pm \sigma$, которая может быть получена по данным МВН в диапазоне энергий 6 – 70 кэВ за 10^3

суток наблюдений, при этом предполагается использование данных, только когда МКС будет находиться в широтах $\leq 30^\circ$.

4.3 Анизотропия поверхностной яркости КРФ в ближней Вселенной

Предполагается, что измерения МВН позволят проверить существование крупномасштабной в угловом выражении анизотропии поверхностной яркости фона в ближней Вселенной на уровне $\sim 1\%$. В этом случае станет возможным сделать оценки полной излучательной способности ближней Вселенной в рентгеновском диапазоне, включая вклад всех сколь угодно слабых источников. В эксперименте МВН планируется зарегистрировать суммарное излучение больших масс, сосредоточенных в ближней Вселенной в скоплениях галактик, без необходимости детектирования отдельных источников, дающих вклад в это суммарное излучение.

Основная идея измерения состоит в том, чтобы «увидеть» небольшую разницу в поверхностной яркости космического рентгеновского фона между направлениями на концентрации массы в ближней Вселенной и на пустоты, средняя плотность галактик в которых может отличаться в десятки раз. Следуя разумному предположению, что рентгеновские источники расположены в местах скоплений материи, можно связать отклонения в поверхностной яркости космического рентгеновского фона с поверхностной плотностью галактик в ближней Вселенной. Яркие источники в ближней Вселенной можно будет увидеть непосредственно, например, результаты обсерваторий INTEGRAL, (Krivonos, et. al., 2007) и SWIFT (Tueller, et. al., 2009), а слабые источники, до которых не позволит «дотянуться» чувствительность МВН, создадут на карте неба протяженные «выпуклости», амплитуда которых будет прямо пропорциональна суммарной светимости всех таких рентгеновских объектов в ближней Вселенной.

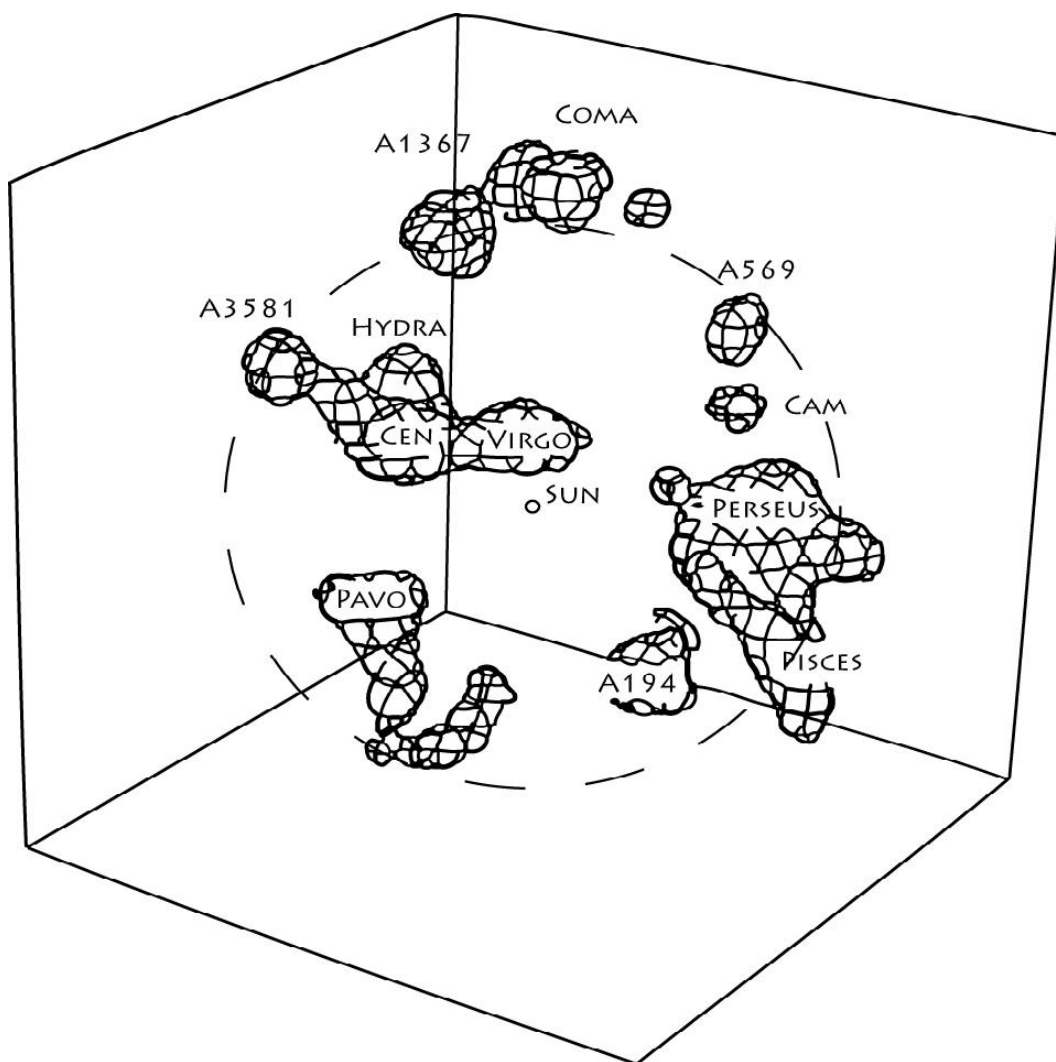


Рис. 4.3.1. Схематичное изображение концентраций массы вещества в ближайшей Вселенной по результатам обзора неба в инфракрасных лучах обсерватории IRAS (из статьи Hudson, 1993). Ожидается, что суммарное излучение рентгеновских источников в этих концентрациях массы создают вариации поверхностной яркости КРФ с амплитудой около 1 – 2%.

Таблица 4.3.1. Список объектов на рис. 4.3.1.

Источник	Созвездие	Галактические координаты, град	
		L	B
Coma Cluster	Волосы Вероники	58.079104	87.957724
Pisces Cluster	Рыбы	124.705533	-32.194659
A194		142.219798	-62.936623
Camelopardalis	Жираф	143.496037	23.960920
Perseus Cluster	Персей	150.572472	-13.261736
A569		168.573271	22.806721

Hydra	Гидра	225.496271	29.407840
A1367		235.313974	73.014178
Virgo Cluster	Дева	279.676298	74.459619
Centaurus Cluster	Кентавр	302.412030	21.563316
A3581		323.133806	32.851276
Pavo Cluster	Павлин	324.147356	-32.596095

Анализ численных моделей распределения вещества во Вселенной показывает, что вклад скоплений и пустот, расположенных на больших расстояниях ($>100 - 200$ Мпк), усредняется и не дает вариации поверхностной яркости более чем на 0.1% , в то время как галактики, расположенные в ближней Вселенной, могут дать вариации поверхностной яркости до $1 - 2\%$ в разных направлениях на небе. Для того чтобы вариации поверхностной яркости космического фона за счет пуассоновского шума количества источников в исследуемых областях не оказывало значительного влияния на результат измерений необходимо усреднять измерения поверхностной яркости КРФ в больших телесных углах, например, с углом раствора $\sim 25^\circ$, т. е. на площадке ~ 2000 град², что является очень сложной задачей для всех существующих орбитальных обсерваторий.

Ввиду достаточно жестких требований к точности измерений КРФ ($\leq 1\%$) и к необходимости покрытия большей части неба для измерения излучательной способности ближней Вселенной, можно сказать, что МВН практически идеально подходит для этих измерений.

4.3.1 6 – 16 кэВ

На рис.4.2.1.1. видно, что максимальная значимость достигается в диапазоне энергий 6 – 16 кэВ, и доходит до $\sim 360 \sigma$ за 10^3 суток. Если построить карту анизотропии КРФ с ячейкой $\sim 2 \times 10^3$ град² в 50% области неба с низким фоном, когда МКС будет находиться в широтах $\leq |30|^\circ$, то получается ~ 10 площадок в которых поверхностная яркость КРФ будет видна на уровне значимости $\frac{360}{\sqrt{10}} \approx 114 \sigma$ или $\sim 0.88\%$, что удовлетворяет требованию $\leq 1\%$.

4.4 *Мониторинг новых транзиентных источников*

МВН позволит проводить периодический мониторинг новых рентгеновских транзиентных источников, которые могут вспыхивать на небе, в том числе регистрацию гигантских вспышек от магнетаров. Чувствительность по точечным ярким источникам см. п.6.2.

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

МВН является новой и достаточно сложной разработкой, проводимой в ИКИ РАН. При помощи МВН планируется отработать следующие технологические задачи:

- проверка полупроводниковых CdTe детекторов в реальных условиях открытого космоса, проведение ресурсных испытаний и испытаний на радиационную стойкость, изучение влияния накопленной дозы на спектральные характеристики детектора;
- изучение эффектов поляризации CdTe кристаллов: скорости поляризации, её влияние на спектральные характеристики детектора, проверка эффективности методов по снятию поляризации;
- измерение фоновых условий на МКС, его составляющих – космического фона и фона заряженных частиц, исследование активации используемых материалов, проверка работоспособности прибора в высоких широтах и влияние ЮАА на свойства детектора;
- проверка системы обеспечения температурного режима детектора в реальных условиях открытого космоса;
- отработка информационного тракта: 32-х пиксельный CdTe детектор – ASIC VA32TA – предварительная электроника – цифровая электроника – радиокomплекс – наземная станция – архив данных.

6. ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ

6.1 Карты экспозиций

Каждые 72 дня из-за прецессии орбиты МКС МВН будет осматривать большой круг на небе, который покрывает ~80% небесной сферы. За год МВН просмотрит эту область 5 раз, за 3 года – 15.

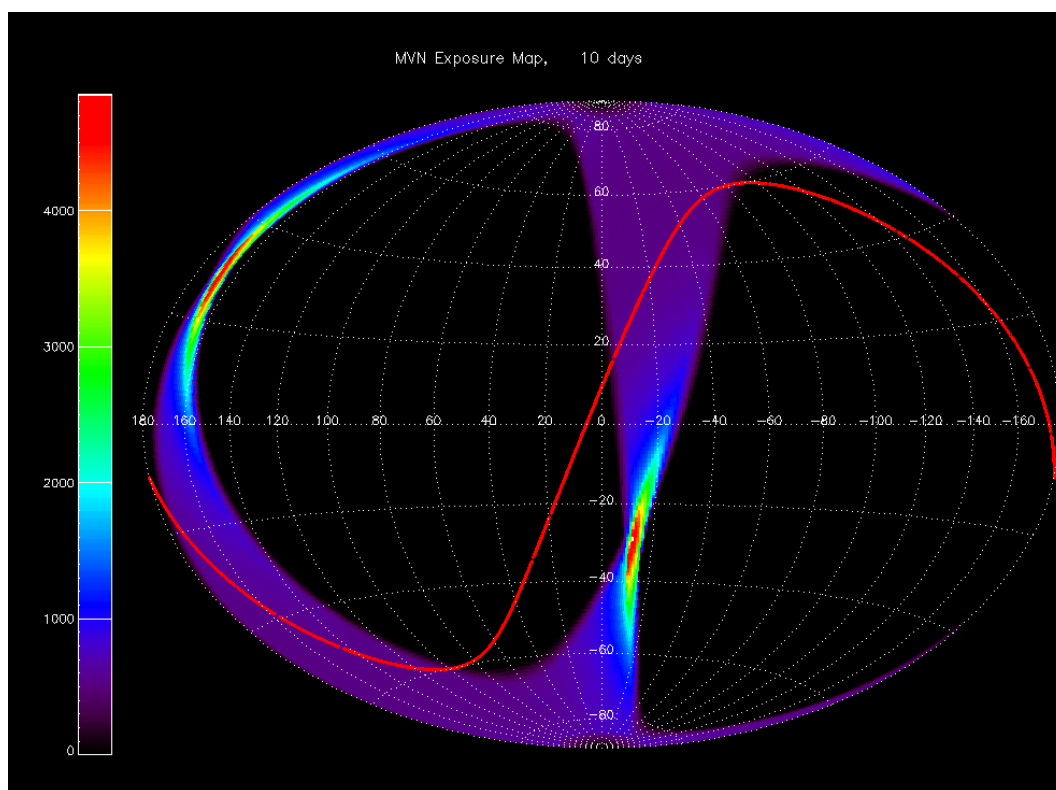


Рис. 6.1.1. Карта времени экспозиции в секундах на поле зрения МВН $\sim 8.55 \text{ град}^2$ (FWHM) за 10 дней обзора неба в галактических координатах. 20% потери времени на прохождение через ЮАА и высокие широты не учитывались. Красная линия – плоскость эклиптики.

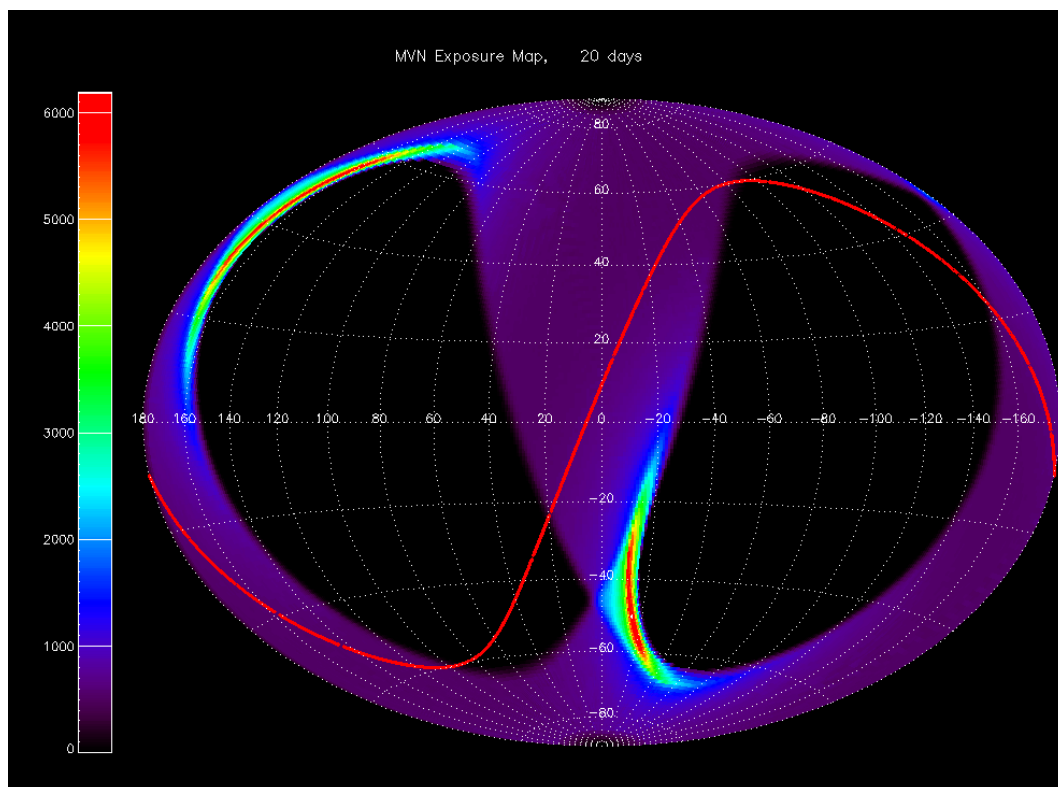


Рис. 6.1.2. Та же карта экспозиции, что и на рис. 6.1.1, только для 20 дней обзора.

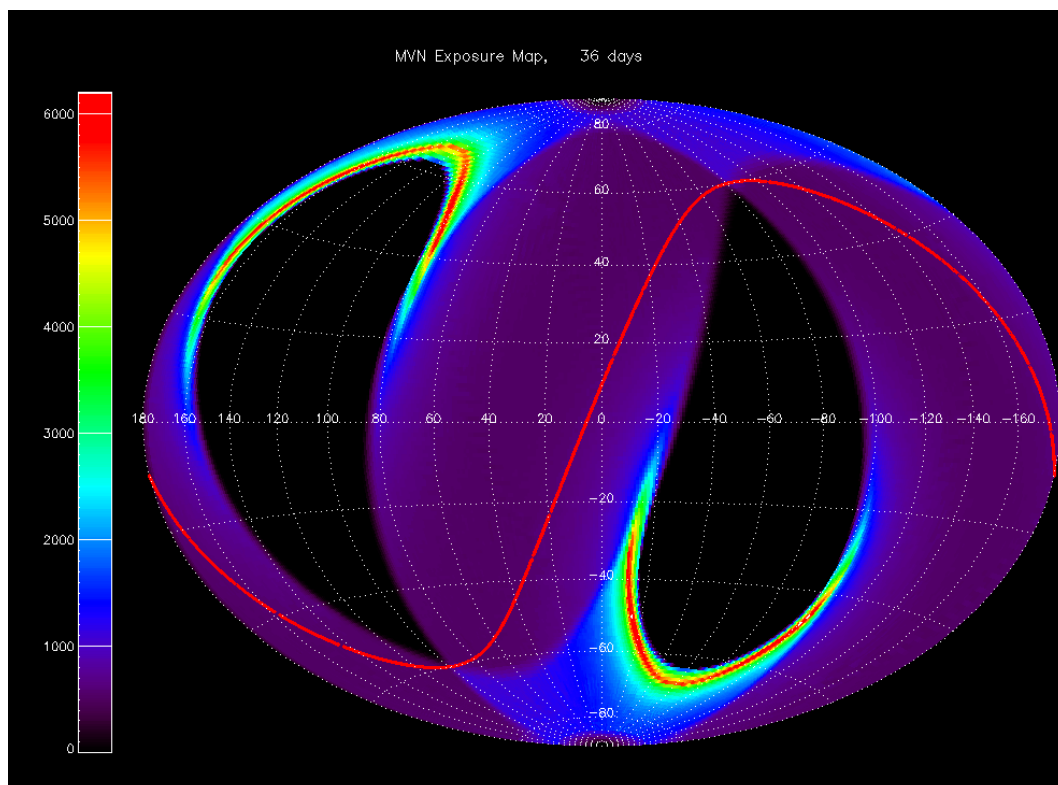


Рис. 6.1.3. Та же карта экспозиции, что на рис. 6.1.1 и рис. 6.1.2, только для 36 дней обзора.

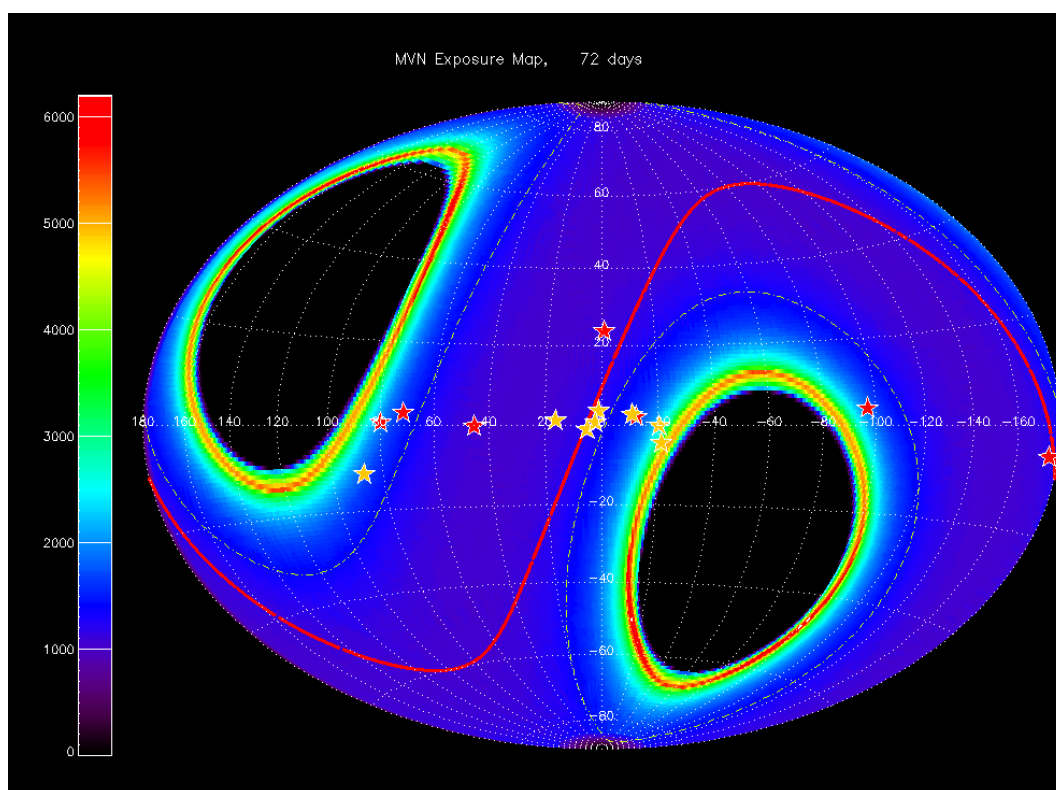


Рис. 6.1.4. Обзор неба МВН за 72 дня, который охватывает ~80% неба. При обзоре неба остаются две зоны, в каждую из которых попадает ~10% неба, которые МВН не видит. В зонах видимости время экспозиции меняется от ~18 минут в минимуме до ~103 минут в максимуме на поле зрения ~8.55 град² (FWHM). На карту нанесены координаты некоторых ярких рентгеновских источников с потоком ≥ 100 миллиКраб, которые МВН будет видеть каждые 72 дня, красными звездочками показаны 7 источников из таблицы 6.1.1 и желтыми – 8 источников из таблицы 6.1.2. Между пунктирными линиями находится зона с низким детекторным фоном (там же проходит плоскость эклиптики – красная линия), т.е. в этой зоне МКС будет находиться в пределах экваториальных широт $\leq 30^\circ$. В зону с низким фоном попадает 7 источников из таблиц 6.1.1 и 6.1.2.

В таблице 6.1.1. приведены семь ярких «жестких» рентгеновских источников (см. табл. 6.1.) с потоком ≥ 100 миллиКраб в диапазоне энергий 17-60 кэВ, которые попадают в ту часть неба, которую МВН видит каждые 72 дня (каталог источников Интеграла, <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/J/A+A/475/775/table1.dat>, Кривонос).

Таблица 6.1.1.

Источник	Галактические координаты, град		Поток в миллиКрабах в диапазоне 17-60 кэВ	Тип источника
	L	B		
GRS 1915+105	45.36	-0.22	261	LMXB
Cyg X-1	71.33	3.06	736	HMXB
Cyg X-3	79.84	0.70	160	HMXB
Crab	184.55	-5.78	1000	PSR

Vela X-1	263.05	3.93	187	НМХВ
4U 1700-377	347.75	2.17	194	НМХВ
Sco X-1	359.09	23.78	581	ЛМХВ

В таблице 6.1.2 приведены некоторые источники, которые имеют поток ≥ 100 миллиКраб в диапазоне энергий 4-20 кэВ по данным телескопа АРТ-П/Гранат.

Таблица 6.1.2.

Источник	Галактические координаты, град		Поток в миллиКрабах в диапазоне 4-20 кэВ	Тип источника
	L	B		
KS1731-260	1.06	3.65	112	ЛМХВ, Burster
GX 3+1	2.29	0.79	296	ЛМХВ, Burster
GX 5-1	5.07	-1.01	1356	ЛМХВ, NS
GX 17+2	16.43	1.27	550	ЛМХВ, NS
Cyg X-2	87.32	-11.31	478	ЛМХВ, NS
GX 339-4	338.93	-4.32	135	ВНЧ
GX 340+0	339.58	-0.07	642	ЛМХВ, NS
GX 349+2	349.10	2.74	742	ЛМХВ, NS

По перечисленным ярким рентгеновским источникам, и по Солнцу, можно будет сверять сведения об ориентации МКС с данными МВН.

6.2 Яркие рентгеновские источники и МВН

С учетом 20% потери времени при пролете ЮАА и высоких широт при минимальном времени экспозиции $\sim 0.8 \times 18 = 14.4$ минуты на поле зрения ~ 8.55 град² (FWHM), которая набирается при полном периоде прецессии за 72 дня (рис. 6.1.4), МВН сможет зарегистрировать от рентгеновского источника с потоком 100 миллиКраб в диапазоне энергий 6 – 70 кэВ $1.2 \times 0.1 \times 2 \times 2.88 \times 0.8 \times 18 \times 60 = 597$ фотонов. Если источник находится в зоне с низкой фоновой нагрузкой, т.е. в пределах экваториальных широт $\leq |30^\circ|$ (см. рис. 6.1.4), то тогда в простейшем случае, когда не учитывается возможность детектора различать координату прихода фотона с точностью до размеров пикселя (3 мм),

уровень сигнала достигнет
$$\frac{597}{\sqrt{2 \times 2 \times 2.88 \times 0.8 \times 18 \times 60 \times 0.32}} \approx 10.57 \sigma.$$
 В зоне

экваториальных широт $> |30^\circ|$ при тех же 14.4 минутах экспозиции уровень сигнала составил бы всего 3.34σ , но в действительности время экспозиции в этой зоне будет больше, и, следовательно, уровень сигнала будет несколько выше.

Таблица 6.2.1. Список источников, попадающих в зону $\leq 30^\circ$

Источник	Галактические координаты, град		Поток в миллиКрабах	Время экспозиции, мин.	Уровень сигнала в стандартных отклонениях за 72 дня наблюдений
	L	B			
KS 1731-260	1.06	3.65	112	16.5	12.7
GX 3+1	2.29	0.79	296	16.5	33.5
GX 5-1	5.07	-1.01	1356	16.2	152.0
GX 17+2	16.43	1.27	550	14.5	58.3
GRS 1915+105	45.36	-0.22	261	14.3	27.5
Crab	184.55	-5.78	1000	15.6	110.0
Sco X-1	359.09	23.78	581	14.9	62.4

Таблица 6.2.2. Список источников, попадающих в зону $> 30^\circ$

Источник	Галактические координаты, град		Поток в миллиКрабах	Время экспозиции, мин.	Уровень сигнала в стандартных отклонениях за 72 дня наблюдений
	L	B			
Cyg X-1	71.33	3.06	736	20.4	29.2
Cyg X-3	79.84	0.70	160	26.5	7.2
Cyg X-2	87.32	-11.31	478	23.2	20.2
Vela X-1	263.05	3.93	187	24.6	8.1
GX 339-4	338.93	-4.32	135	46.0	8.0
GX 340+0	339.58	-0.07	642	31.3	31.6
4U 1700-377	347.75	2.17	194	21.5	7.9
GX 349+2	349.10	2.74	742	20.5	29.6

Т.е. на небе присутствует как минимум десяток ярких рентгеновских источников, которые будут регистрироваться МВН с уровнем сигнала от 20 до 150 σ каждые 72 дня, и по которым можно будет определять ориентацию МКС со сравнительно высокой точностью 5' – 15' (ТВС).

6.2.1 Crab

На рис.6.2.1. для примера приведен спектр Краба, который может быть получен по данным МВН в диапазоне энергий 6 – 70 кэВ за 15.6 минутную экспозицию (см. табл. 6.2.1.), при этом учитывается, что МВН будет видеть Краб когда МКС будет находиться в широтах $\leq 30^\circ$ и не учитывается возможность использования позиционной чувствительности детектора (32 пикселя) для уменьшения вычитаемого фона.

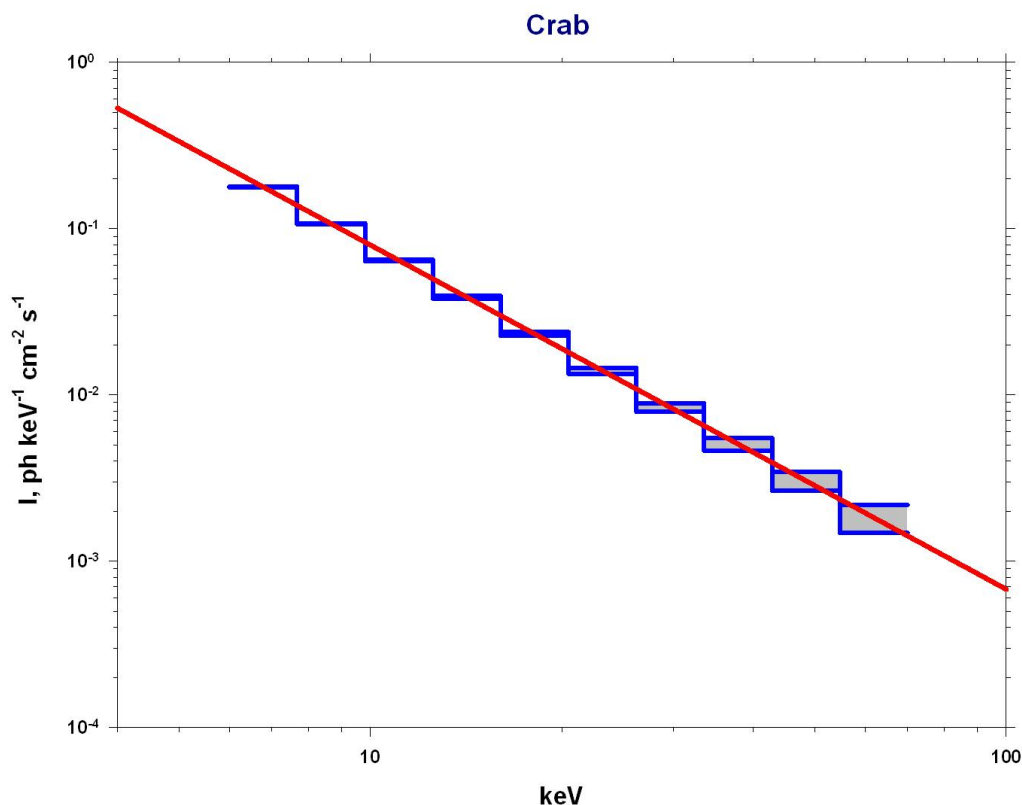


Рис. 6.2.1.1. Красная линия - степенной спектр Краба $9.36 \times E^{-2.07}$, фот $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$, две синих кривых ограничивают серую область шириной $\pm 1 \sigma$, которая может быть получена по данным МВН в диапазоне энергий 6 – 70 кэВ за 15.6 минутную экспозицию (см. табл. 6.2.1.), при этом учитывается, что МВН будет видеть Краб когда МКС будет находиться в широтах $\leq 30^\circ$.

6.3 Карты IRAS и INTEGRAL и зоны видимости МВН

Для иллюстрации возможностей МВН по измерению анизотропии поверхностной яркости КРФ в ближней Вселенной была наложена карта зон видимости МВН на карту IRAS, рис. 6.3.1. На нее нанесены звездочками координаты объектов из табл. 4.3.1. Созвездия Жирафа и Павлина никогда не попадут в поле зрения коллиматоров МВН, А569 и созвездия Персея и Кентавра будут наблюдаться МВН в высоких фоновых условиях, т.е. когда МКС будет находиться в широтах $> 30^\circ$, остальные объекты будут видны МВН в благоприятных фоновых условиях.

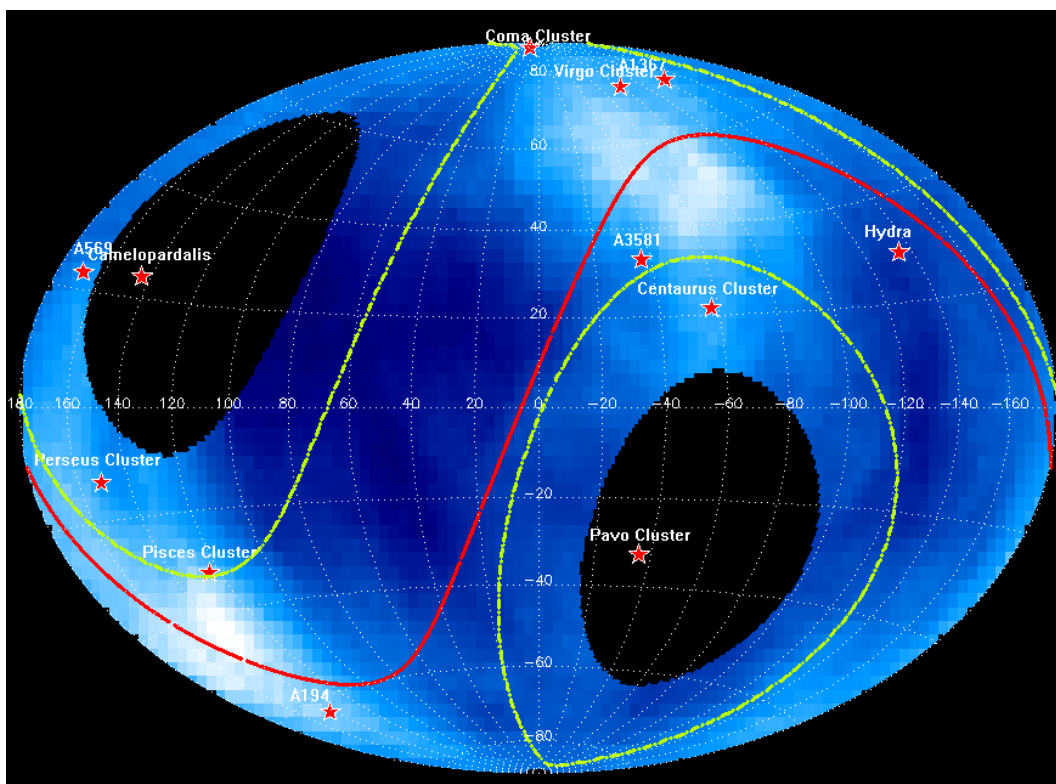


Рис. 6.3.1. Наложение карты зон видимости МВН на карту IRAS. Красная линия – плоскость эклиптики. Зоны с высоким фоном показаны зеленой штрихпунктирной линией. На карту звездочками нанесены координаты объектов из табл. 4.3.1.

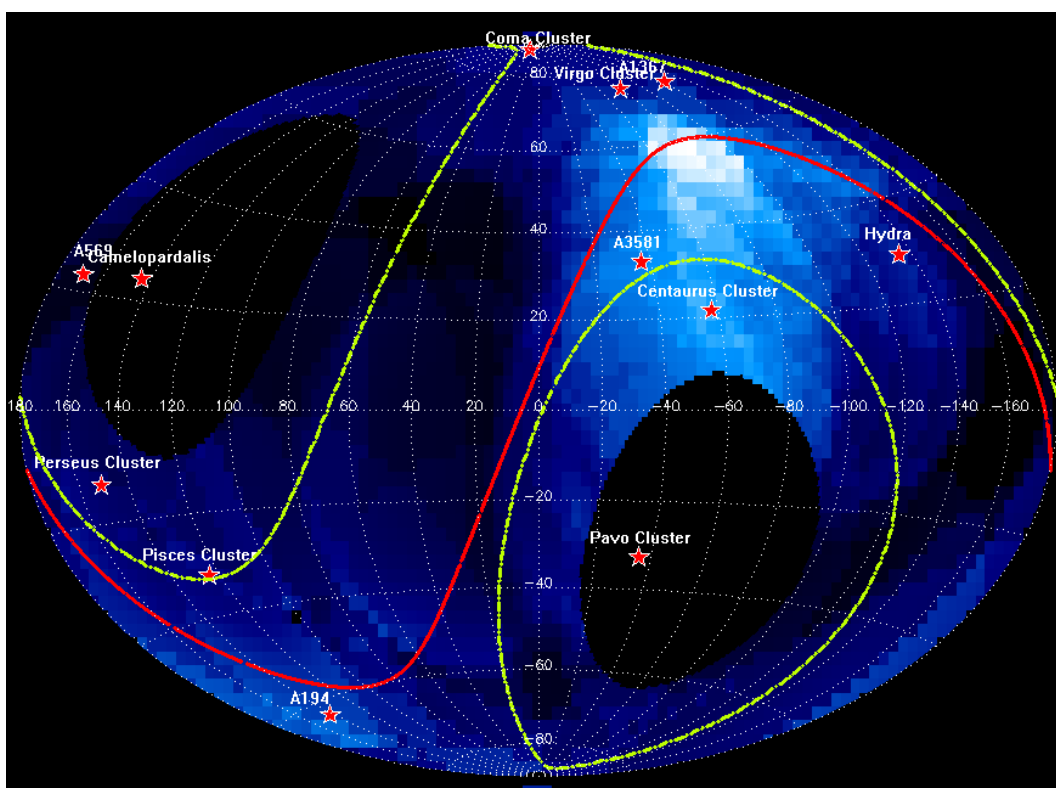


Рис. 6.3.2. Наложение карты зон видимости МВН на карту Кривоноса (Krivonos, et al., 2007), полученную по данным обсерватории INTEGRAL/IBIS, и которая отражает контраст плотности АЯГ в конусе с половинным углом раствора 45° относительно их

средней плотности по всему небу, для сравнения зоны невидимости МВН (два черных круга) имеют половинный угол раствора $\sim 37^\circ$. Использовалась выборка галактик в ближней Вселенной $D < 70$ Мпк, всего 39 АЯГ.

7. ДЕТЕКТОР

7.1 Блок рентгеновского детектора

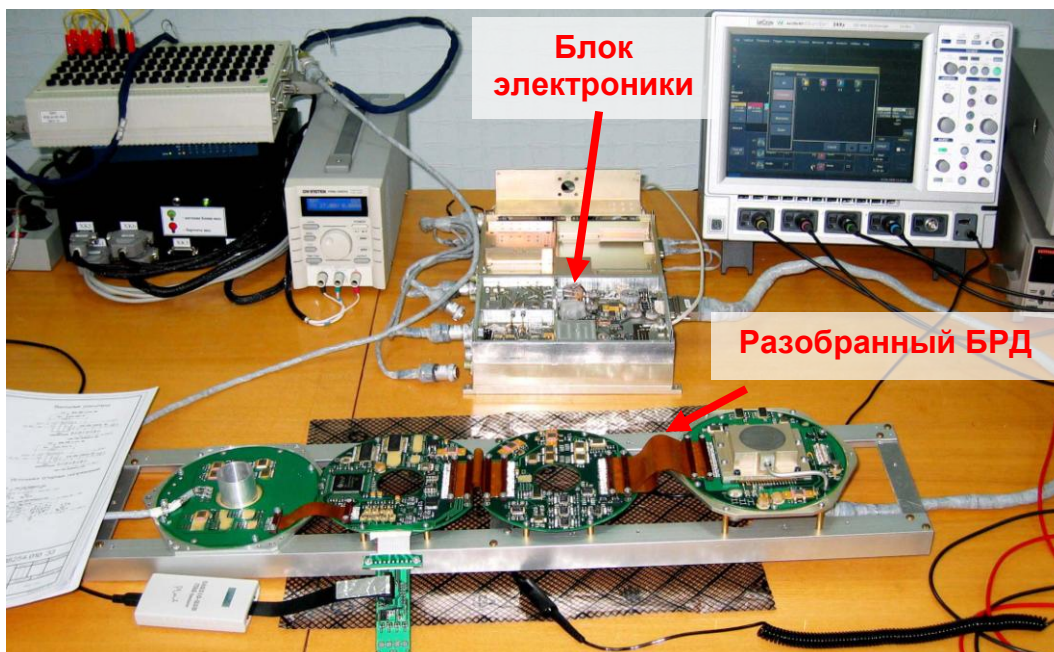


Рис. 7.1.1. Разобранный макет БРД для ЛОИ, соединенный с блоком электроники, во время проведения программно-аппаратной отладки.

На рис.7.1.2. показаны узлы БРД01 и БРД02.

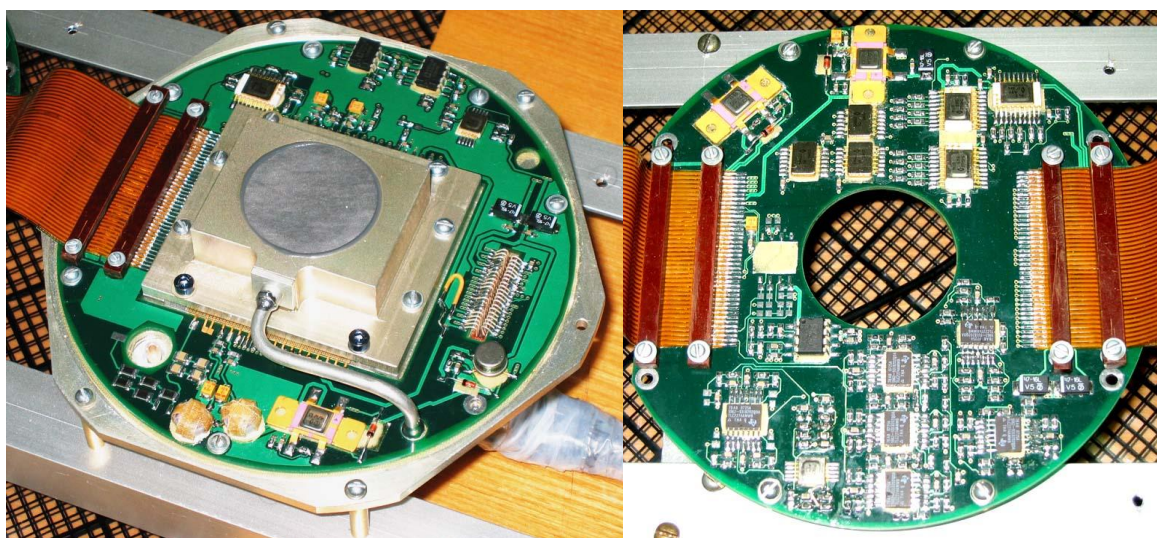


Рис. 7.1.2. Узлы БРД01 (слева) и БРД02 (справа).

Узлы БРД01 и БРД02 содержат:

- детектор в герметичном объёме;
- фильтры низковольтного и высоковольтного питания детектора;
- формирователи напряжений смещения детектора;

- преобразователи сигналов термодатчиков (3 канала).

На рис.7.1.3. показаны узлы БРД03 и БРД04 БРД.

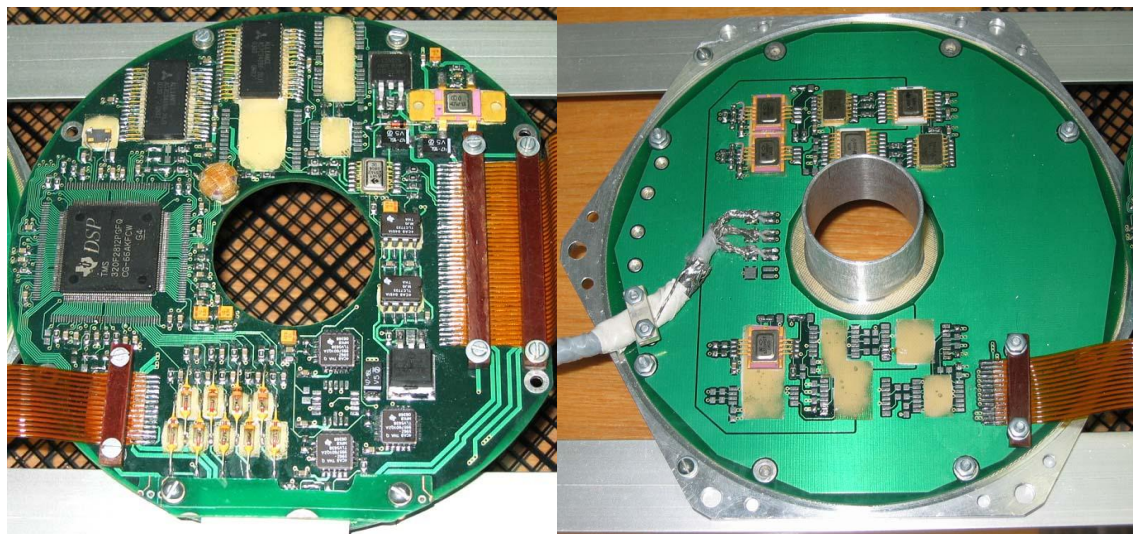


Рис. 7.1.3. Узлы БРД03 (слева) и БРД04 (справа).

Назначение узла БРД03:

- приём команд от БУ МВН (ЦПУ SMJ320F2812, ОЗУ 512K×16);
- поддержка 2-х интерфейсов RS-485 (основного и резервного);
- приём синхроимпульса 1 Гц (основного и резервного) и привязка регистрируемых событий к бортовому времени;
- управление рентгеновским детектором;
- приём и накопление отдельных событий (время, номер пикселя, амплитуда);
- накопление спектров (500 каналов 16 бит/канал);
- формирование телеметрических кадров;
- формирование до 8-ми управляемых опорных напряжений 0 – 3 В.

Назначение узла БРД04:

- входные/выходные каскады гальванически-развязанных интерфейсов RS-485 (основного и резервного);
- входные каскады гальванически-развязанных интерфейсов временной метки 1 Гц (основного и резервного).

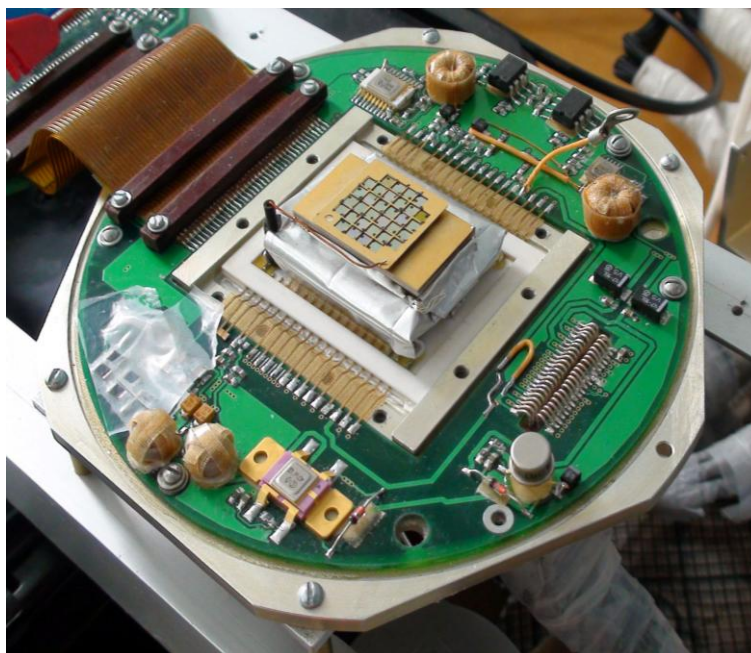


Рис. 7.1.4. Показан узел БРД01 в котором размещен герметичный корпус, внутри которого находится 32-х пиксельный CdTe детектор, размер каждого пикселя $3 \times 3 \times 1$ мм, детектор установлен на элементе Пельтье. В данный момент крышка с герметичного корпуса снята. В рабочем положении детектор засвечивается через 100 мкм входное бериллиевое окно, которое вклеено в крышку (см. рис. 7.1.2 слева).

7.1.1 Пример энергетических спектров Am^{241}

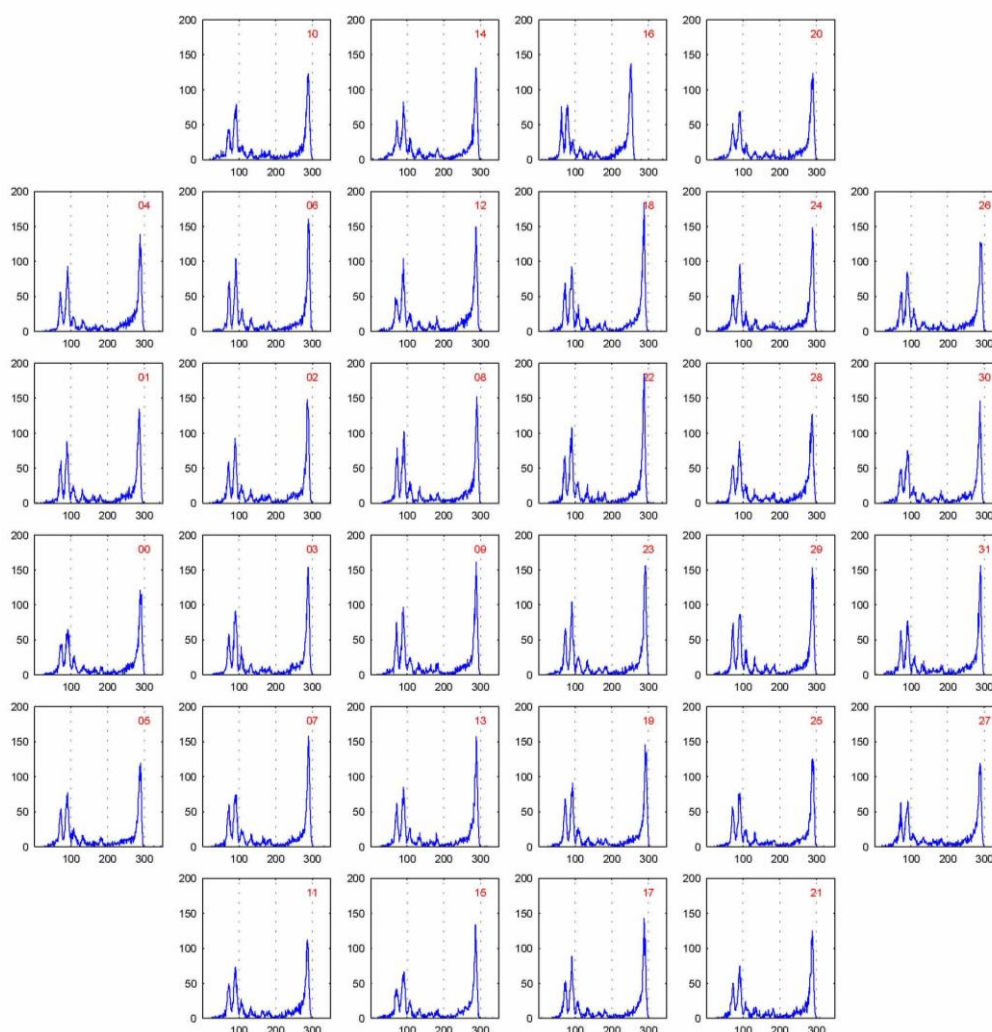


Рис. 7.1.1.1. Пример 32-х энергетических спектров от Am^{241} , полученные в 32-х CdTe пикселях с использованием ASIC VA32TA при температуре детектора 0°C , $U = -160\text{ В}$, время набора 1 минута.

На рис. 7.1.1.2. приведен в качестве примера энергетический спектр от Am^{241} , полученный с 17-го канала, набранный при помощи ЗЧУ ASIC VA32TA и внешнего спектрометрического АЦП при температуре детектора -2°C , $U = -220\text{ В}$, время набора 10 минут. Разрешение на линии 13.90 кэВ $\Delta E = 1.56\text{ кэВ}$, на линии 59.54 кэВ $\Delta E = 1.75\text{ кэВ}$.

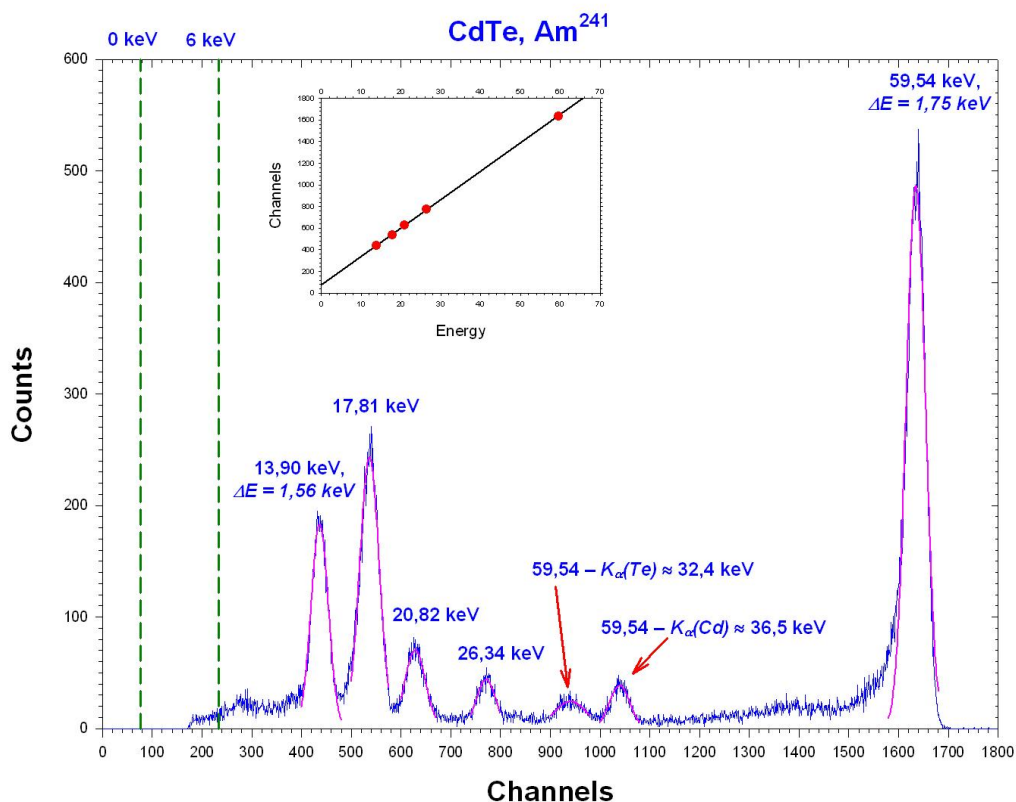


Рис. 7.1.1.2. Энергетический спектр от Am^{241} , полученный на пиксельном CdTe с одного пикселя (17-ый канал), набранный при помощи ЗЧУ ASIC VA32TA и внешнего спектрометрического АЦП при температуре детектора -2°C , $U = -220\text{ В}$, время набора 10 минут.

7.2 Характеристики детектора

Материал	CdTe
Производитель материала	AcroRad
Тип детектора	Пиксельный
Число пикселей	32
Размер пикселя	$3 \times 3 \times 1\text{ мм}^3$
Зазор между пикселями	0.2 мм
Размер чувствительной поверхности одного детектора	2.88 см^2
ASIC	VA32TA
Энергетический диапазон	6 – 70 кэВ
Энергетическое разрешение	$\leq 1.6\text{ кэВ @ } 14\text{ кэВ}$ $\leq 1.8\text{ кэВ @ } 60\text{ кэВ}$
Временное разрешение	1 мс
Рабочая температура,	$-30^\circ \div -40^\circ\text{ C}$

Толщина входного бериллиевого окна внутреннего корпуса	100 мкм
Диаметр входного окна	29 мм

7.3 Корпус детектора

БРД имеет два корпуса, внутренний и внешний:

- внутренний – герметичный корпус под вакуумом с бериллиевым входным окном, в котором находится 32 пикселя CdTe на охлаждающем элементе Пельтье и ASIC VA32TA (см. рис. 7.1.4); и
- наружный корпус, в который помещены все узлы БРД01 – 04 (см. рис. 7.1.2 и рис. 7.1.3).

Оба корпуса служат, в том числе, и для защиты чувствительных элементов CdTe от диффузного рентгеновского излучения и предохраняют его от заряженных частиц радиационных поясов.

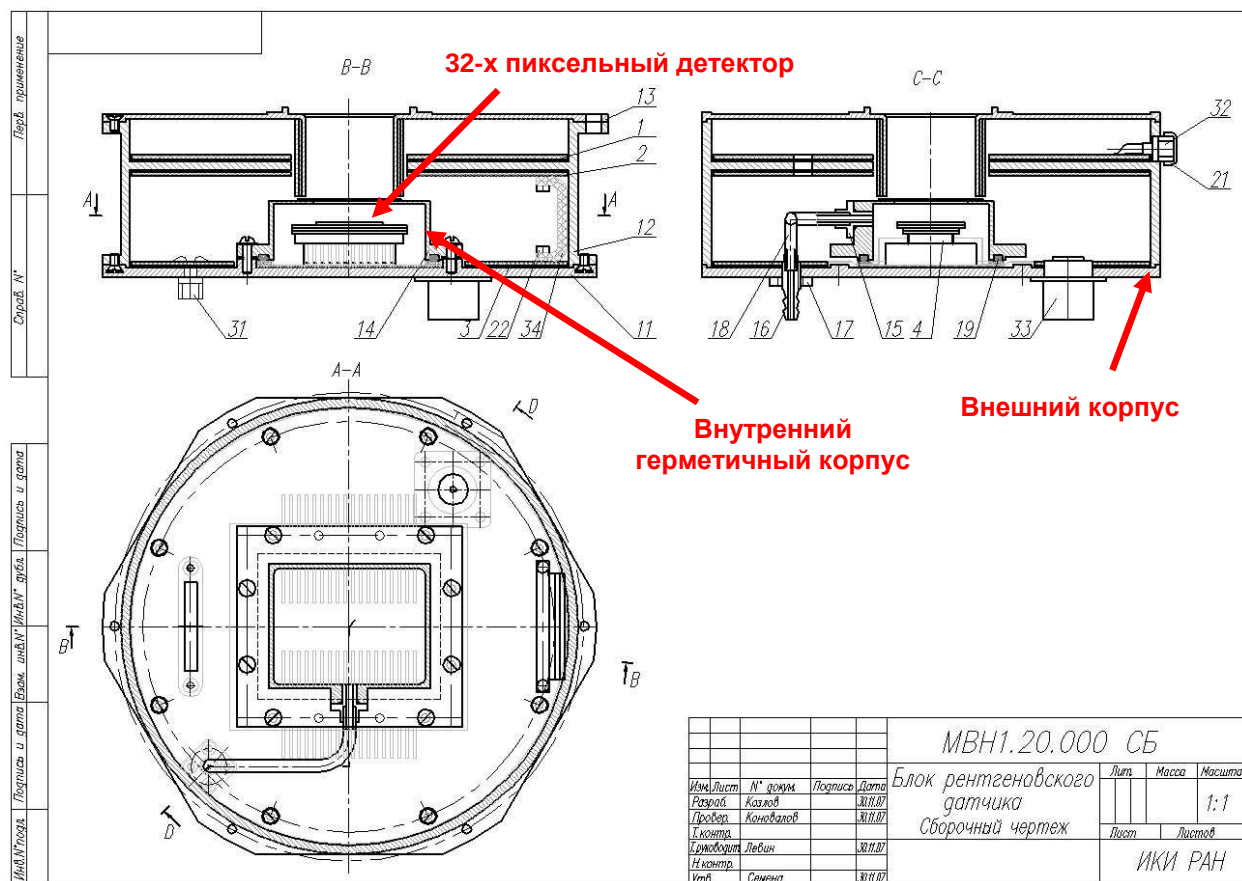


Рис. 7.3.1. Блок рентгеновского детектора, сборочный чертеж образца ЛОИ, пассивная трехслойная защита вокруг герметичного корпуса детектора отсутствует.

7.3.1 Прозрачность корпуса для фонового излучения.

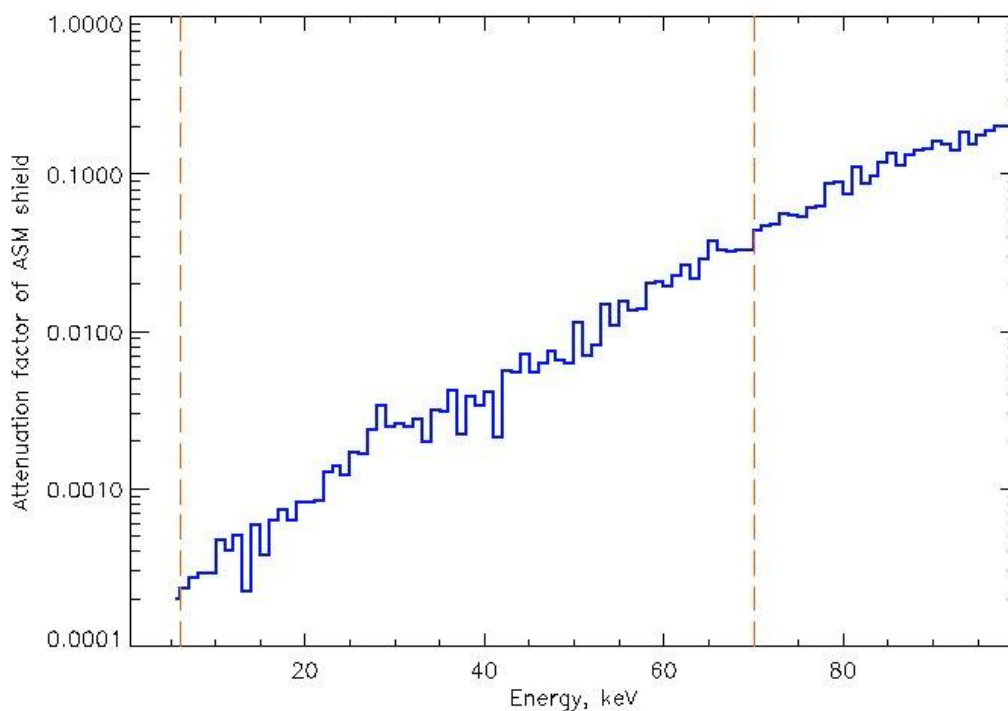


Рис. 7.3.2. Оценка прозрачности пассивной трехслойной 1 мм Sn + 1 мм Cu + 1 мм Al защиты детектора для рентгеновского излучения, на энергии 70 кэВ прозрачность защиты составляет 4%. (ТВС)

7.3.2 Интегральный поток протонов и спектральное разрешение

На рис.7.3.2.1. приведен результат наземных испытаний на протонном пучке кристалла CdTe фирмы Acrograd в зависимости от числа протонов с энергией >100 МэВ, прошедших через кристалл.

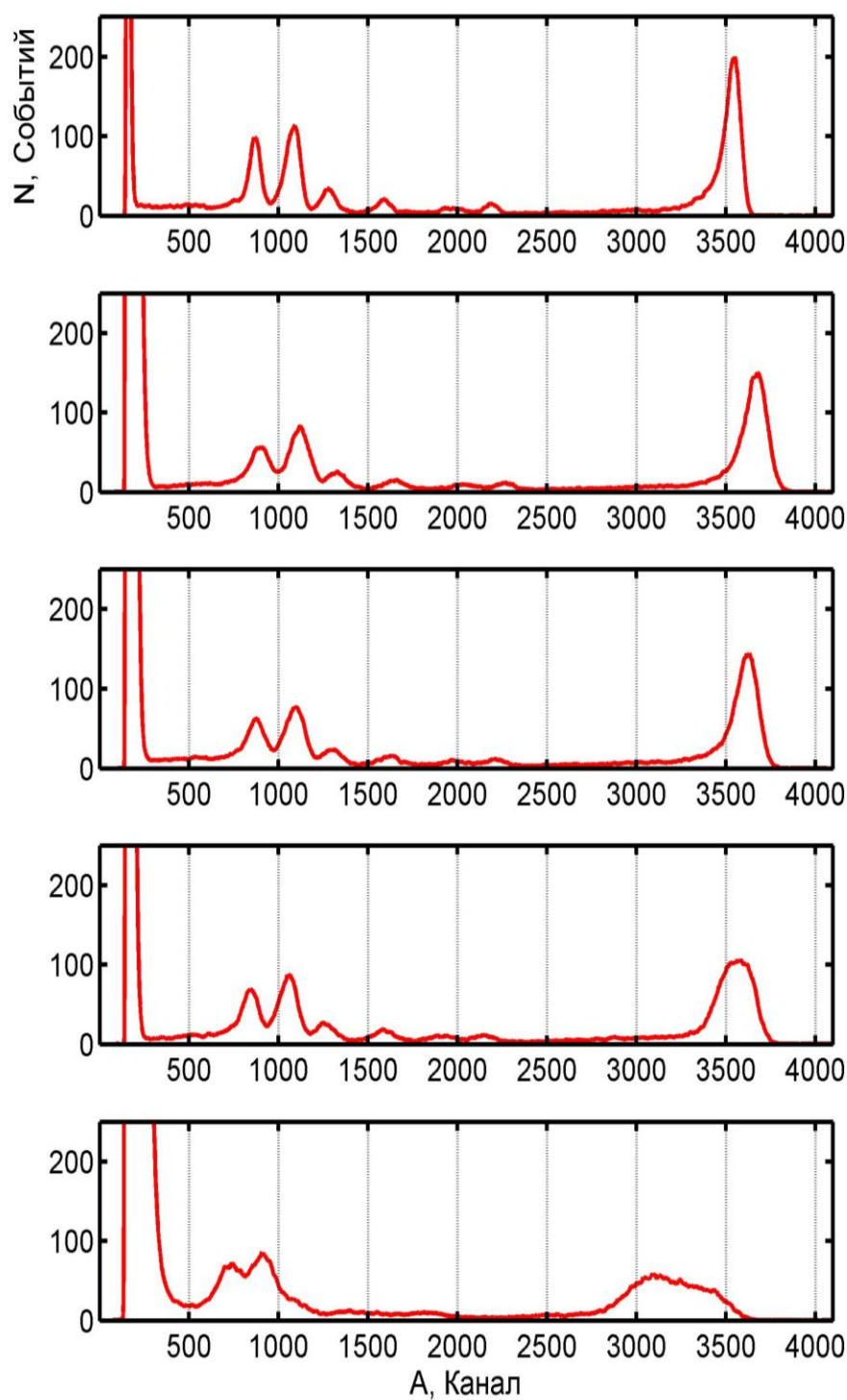


Рис. 7.3.1.1. Кристалл AD0006. Сверху – вниз, спектр от источника Am^{241} до и после облучения кристалла интегральным потоком 10^9 , 10^{10} , 4×10^{10} и 10^{11} протонов см^{-2} , $T = -30^\circ \text{C}$, $U_d = -300 \text{ В}$.

Испытания показали, что при интегральных потоках $\geq 4 \times 10^{10}$ протонов см^{-2} изменения спектральных характеристик CdTe становятся заметными. Для сохранения спектральных свойств детектора пассивная защита детектора должна предотвращать облучение детектора потоками более $\geq 10^{10}$ протонов см^{-2} .

7.4 Коллиматор

Поле зрения детектора ограничено цилиндрическим коллиматором, высотой 626 мм и внутренним диаметром 40 мм. Пиксели CdTe расположены относительно нижней кромки коллиматора на глубине 38 мм (см. рис. 7.3.1), верхний край коллиматора находится на высоте 664 мм над детектором соответственно. Коллиматор сделан трехслойным, по 1 мм Sn, Cu и Al (снаружи внутрь).

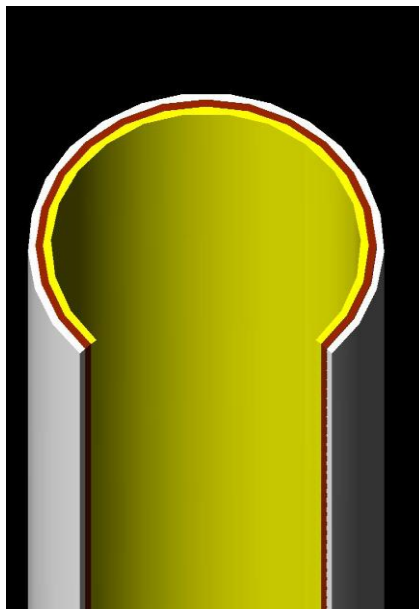


Рис. 7.4.1. Рисунок трехслойного коллиматора в разрезе в нижней части, полная высота коллиматора 661 мм, внутренний диаметр 40 мм. Толщина каждого слоя 1 мм, порядок следования слоев снаружи внутрь – олово, медь, алюминий.

7.4.1 Диаграмма направленности

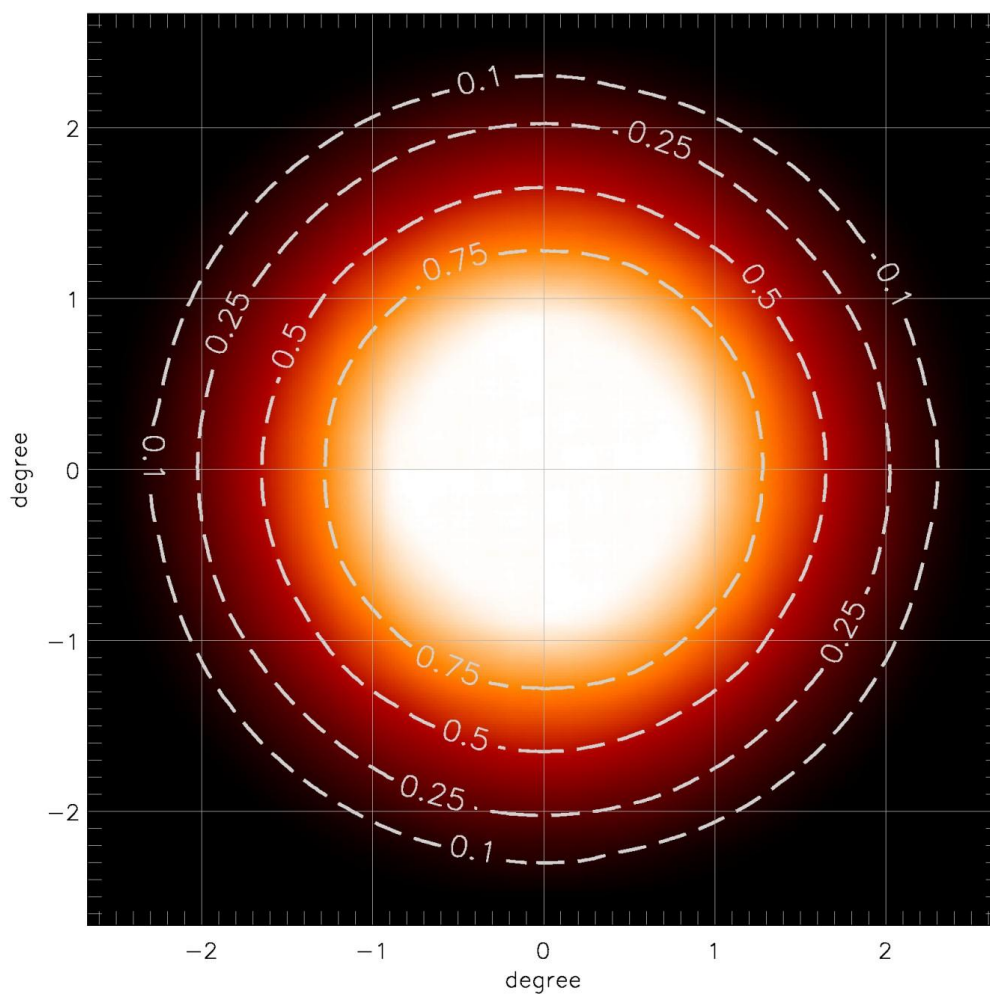


Рис. 7.4.1.1. Диаграмма направленности МВН, светлыми пунктирными изолиниями показаны уровни 0.1, 0.25, 0.5 и 0.75, телесный угол на половине высоты (FWHM) $\sim 8.55 \text{ град}^2$.

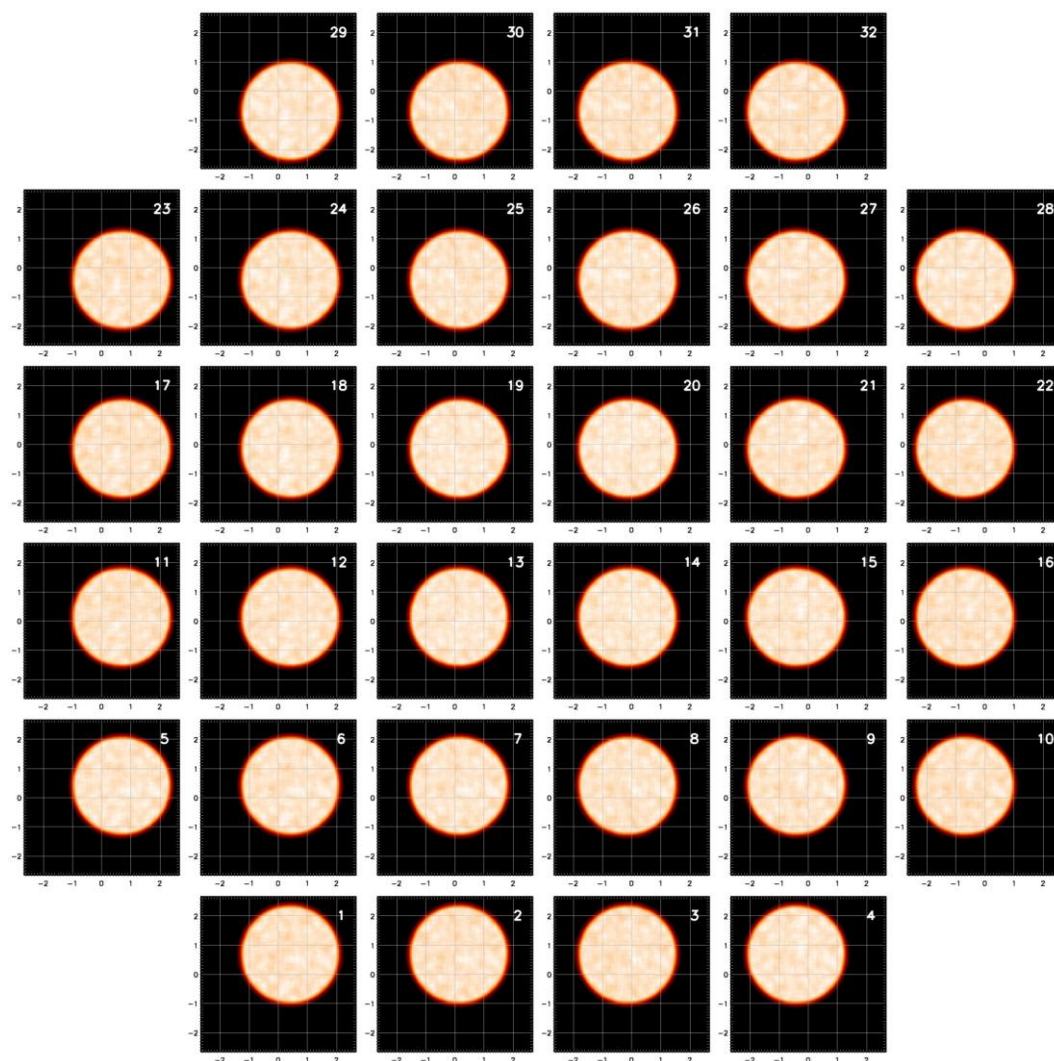


Рис. 7.4.1.2. Иллюстрация взаиморасположения полей зрения 32-х пикселей на поле размером $5^\circ \times 5^\circ$.

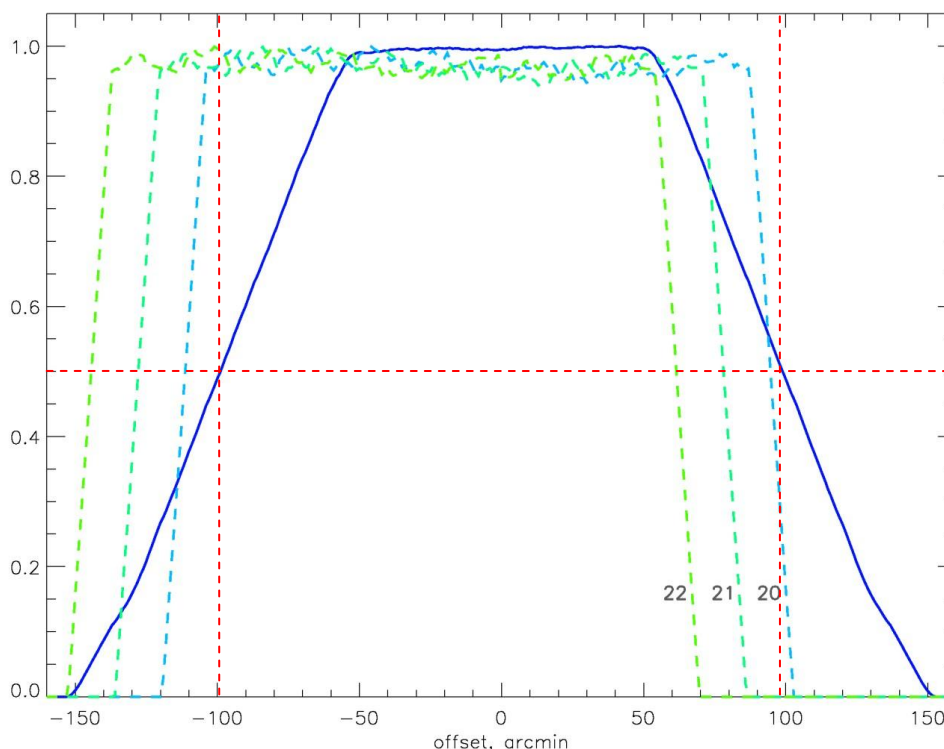


Рис. 7.4.1.3. Синяя кривая – разрез диаграммы направленности МВН (см. рис. 7.4.1.1.). Ширина на полувысоте (FWHM) ~198'. Для примера приведены диаграммы направленности трех пикселей под номерами 20, 21 и 22 (см. рис. 7.4.1.2.). Красной горизонтальной пунктирной линией показан уровень 0.5, Двумя вертикальными красными пунктирными линиями показана ширина на полувысоте.

7.5 Калибровочный источник

Для калибровки детектора в полете в каждый коллиматор встроены радиоактивный источник Am^{241} со специальным механизмом, который открывает по внутренней команде на фиксированное время непрозрачную для рентгеновского излучения шторку для засветки поверхности детектора источником (см. рис. 7.6.1.).

Данная операция может проводиться достаточно часто на начальной фазе полета для исследования скорости поляризации детектора. Характерное время до полной поляризации детектора при рабочей температуре $-30^\circ \div -40^\circ \text{C}$ может достигать нескольких часов. После наступления поляризации и потери спектрометрических свойств детектора необходимо на короткое время, порядка минуты, снять напряжение с детектора. После этого поляризация снимается, и детектор восстанавливает свои спектрометрические характеристики.

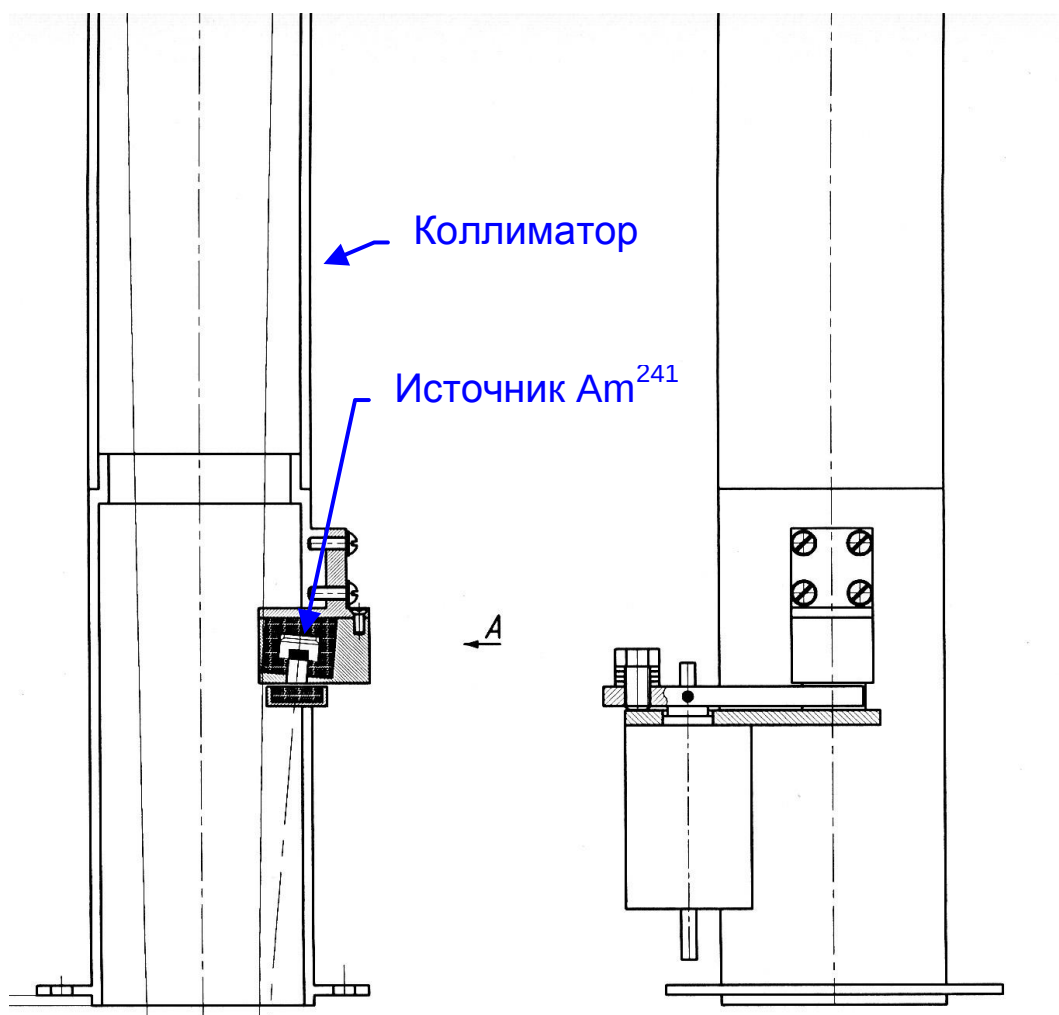


Рис. 7.5.1. Показан калибровочный источник Am²⁴¹, встроенный в коллиматор, поток от источника перекрывается непрозрачной для излучения шторкой.

8. БЛОК ЭЛЕКТРОНИКИ

Каждый БРД имеет свой блок электроники, в каждом блоке электроники находится три узла: 01, 02 и 03, каждый со своими функциями.



Рис. 8.1. Блок электроники, зеленой линией обведен узел 01, желтой – узел 02 и оставшаяся часть принадлежит узлу 03.

8.1 Узел 01

Узел 01 содержит:

- приёмник двух релейных (импульсных) команд на включение/выключение канала регистрации;
- узел защиты фидера питания от перегрузки по току;
- защиту от включения прибора после пропадания и возобновления бортового питания;
- выходной каскад управления блоком калибровочного источника.

8.2 Узел 02

Узел 02 содержит:

- фильтр в цепи питания +27В;
- DC-DC преобразователь $\pm 5\text{В}$;
- DC-DC преобразователь +5В для питания выходных каскадов гальванически-развязанного интерфейса RS-485.

8.3 Узел 03

Узел 03 содержит:

- фильтры вторичного питания по цепям $\pm 5\text{В}$;
- измеритель токов потребления по цепям $\pm 5\text{В}$ (аналоговый выход 0 – 3 В);
- защиту от защёлкивания по цепи +5В;
- мощный выходной каскад управления элементом Пельтье (управление аналоговым сигналом 0 – 3 В);
- управляемый высоковольтный преобразователь 0 – 300 В (управление аналоговым сигналом 0 – 3 В).

9. БЛОК УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 9.1. показана фотография блока управления МВН.



Рис. 9.1. Блок управления МВН.

Блок управления МВН представляет собой специализированный встраиваемый компьютер на базе модулей стандарта PC-104+.

Общие характеристики БУ МВН:

- 2 полукомплекта в режиме «холодного резервирования»;
- питание от бортовой сети напряжением 23 – 29 В постоянного тока;
- потребляемая мощность до 20 Вт;
- условия эксплуатации: внутри станции, рабочая температура воздушной среды от -20° до $+60^{\circ}$ С.

Задачи, выполняемые БУ МВН:

- выдача релейных команд управления на БРД;
- выдача цифровых команд управления в БРД;
- трансляция синхросигнала 1 Гц от МКС на БРД;
- сбор научных данных с БРД;
- сортировка и хранение научных данных;
- передача научных данных в телеметрическую систему и бортовой сервер полезной нагрузки МКС;

- прием командной информации от бортового сервера полезной нагрузки МКС.

Для организации командно-информационного обмена с БРД и системами МКС каждый полуконкомплект БУ МВН имеет набор необходимых внешних интерфейсов:

- один Ethernet 10 / 100 Base-T;
- четыре UART / RS422;
- четыре 1 Гц / RS422;
- восьми выходов релейных команд;
- интерфейс БИТС2-12 с трансформаторной развязкой;
- цепи телеметрируемых датчиков типа «термосопротивление» и «электронный ключ».

Все интерфейсы БУ МВН имеют гальваническую изоляцию друг от друга, от цепей питания и от корпуса прибора.

Блок управления имеет также набор встроенных стандартных интерфейсов, используемых для отработки и технологических операций: VGA, USB, UART/RS232, PS/2.

Характеристики процессорного модуля БУ МВН:

- процессор AMD Geode LX800 500 МГц;
- память ОЗУ 256 Мбайт;
- память NAND FLASH 128 Мбайт;
- память CompactFlash 1 Гбайт для хранения научных данных;
- операционная система реального времени QNX 6.3;
- программная поддержка протоколов UDP/IP, TCP/IP, NFS.

Блок управления БУ МВН включается сразу после подачи на него питания.

Программное обеспечение БУ МВН реализует автоматическое управление экспериментом и информационный обмен с внешними системами.

10. ИНФОРМАТИВНОСТЬ

Основной поток информации от МВН будет записываться в формате ФВЭА – формат «время, элемент, амплитуда» (см. табл. 10.1). По этому формату на одно событие приходится 4 слова или 8 байт (одно слово = 2 байта).

Таблица 10.1 Формат ФВЭА.

Номер слова	Содержание	Примечание
1	UTC в секундах, старшее слово. За 0 сек принимается 00 час 00 мин 00 сек 01 января 1970 года	Разряды 31 – 16 UTC
2	UTC в секундах, младшее слово	Разряды 15 – 0 UTC
3	Доли секунды $N \times t$. Преобразование кода $N \times t$ во время производится по формуле: $T = N \times t / 46875$ [сек]	Разряды 15 – 0 долей секунды
4	Номер элемента, амплитуда	Бит 15 – 11: номер элемента (5 бит: 0 – 31); бит 10 – 9: резерв (все 0); бит 8 – 0: амплитуда (9 бит: 512 каналов)

За сутки информативность МВН будет составлять $\sim 10^6 \times 8$ байт ≈ 8 Мбайт.

11. ЭТАПЫ РАБОТ В 2010 – 2015 ГГ.

Основные этапы работ по МВН в 2010 – 2015 гг. приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1

1	Изготовление опытного образца для КДИ	4 кв. 2010
2	Проведение стыковочных испытаний с системами МКС	1 кв. 2011
3	Проведение КДИ	3 кв. 2011
4	Изготовление гидро-лабораторного макета.	4 кв. 2011
5	Корректировка конструкторской документации по результатам испытаний	4 кв. 2011
6	Изготовление, калибровка, автономные испытания и поставка в РКК «Энергия» летного образца для проведения ЛКИ	3 кв. 2012
7	Разработка и изготовление наземного научного комплекса	4 кв. 2012
8	Запуск на орбиту	4 кв. 2012 г.
9	Проведение ЛКИ	2013 – 2015 гг.

12. СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
АЯГ	активные ядра галактик
БРД	Блок рентгеновского детектора
БУ	Блок управления
БЭ	Блок электроники
ЗЧУ	Зарядово-чувствительный усилитель
КДИ	Квалификационно-доводочные испытания
КРФ	Космический рентгеновский фон
ЛКИ	Летно-конструкторские испытания
ЛОИ	Лабораторно-отработочные испытания
МВН	Монитор Всего Неба
МКС	Международная космическая станция
ОЗУ	Оперативное запоминающее устройство
УРМ	Универсальное рабочее место
ЦПУ	Центральное процессорное устройство
ЮАА	Южная атлантическая аномалия
ASIC	Application specific integrated circuit
ВНС	Black Hole Candidate
FWHM	Full Width Half Maximum
НМХВ	High Mass X-ray Binary
ЛМХВ	Low Mass X-ray Binary
NS	Neutron Star

13. ССЫЛКИ

Giacconi, R., et. al., «A high-sensitivity X-ray survey using the Einstein Observatory and the discrete source contribution to the extragalactic X-ray background», Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 234, Nov. 15, 1979, p. L1-L7. (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1979ApJ...234L...1G>).

Mazets, E. P., et. al., «Diffuse cosmic gamma-ray background in the 28 keV-4.1 MeV range from Kosmos 461 observations», Astrophysics and Space Science, vol. 33, Apr. 1975, p. 347-357. (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1975Ap%26SS..33..347M>).

Kinzer, R. L., et. al., «Diffuse Cosmic Gamma Radiation Measured by HEAO 1», Astrophysical Journal v.475, p.361. (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1997ApJ...475..361K>).

Churazov, E., et. al., «INTEGRAL observations of the cosmic X-ray background in the 5-100 keV range via occultation by the Earth», Astronomy and Astrophysics, Volume 467, Issue 2, May IV 2007, pp.529-540. (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0608250>)

Krivonos, R., et. Al., «INTEGRAL/IBIS all-sky survey in hard X-rays», Astronomy and Astrophysics, Volume 475, Issue 2, November IV 2007, pp.775-784. (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0701836>).

Tueller, J., et. al., «The 22-Month Swift-BAT All-Sky Hard X-ray Survey», eprint arXiv:0903.3037, 2009. (<http://arxiv.org/abs/0903.3037>).

Hudson, M., «Optical galaxies within 8000 km s^{-1} - I. the density field», MNRAS, Volume 265, 43 - 71, 1993. (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1993MNRAS.265...43H>).

14. ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТАБЛИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ГРАФИКА.

Табличные значения графика на рис. 4.2.1.1.

E_1 , кэВ	E_2 , кэВ	$E \times F(E)$	Значимость, σ	1σ
6,0000	7,6709	26,3392	263,7334	0,0999
7,6709	9,8071	29,9465	207,4277	0,1444
9,8071	12,5382	33,6218	161,1012	0,2087
12,5382	16,0299	37,1391	123,1024	0,3017
16,0299	20,4940	40,1697	92,1066	0,4361
20,4940	26,2012	42,3080	67,1077	0,6304
26,2012	33,4978	43,0743	47,2635	0,9114
33,4978	42,8263	41,9874	31,8702	1,3175
42,8263	54,7528	38,7206	20,3313	1,9045
54,7528	70,0005	33,4486	12,1495	2,7531

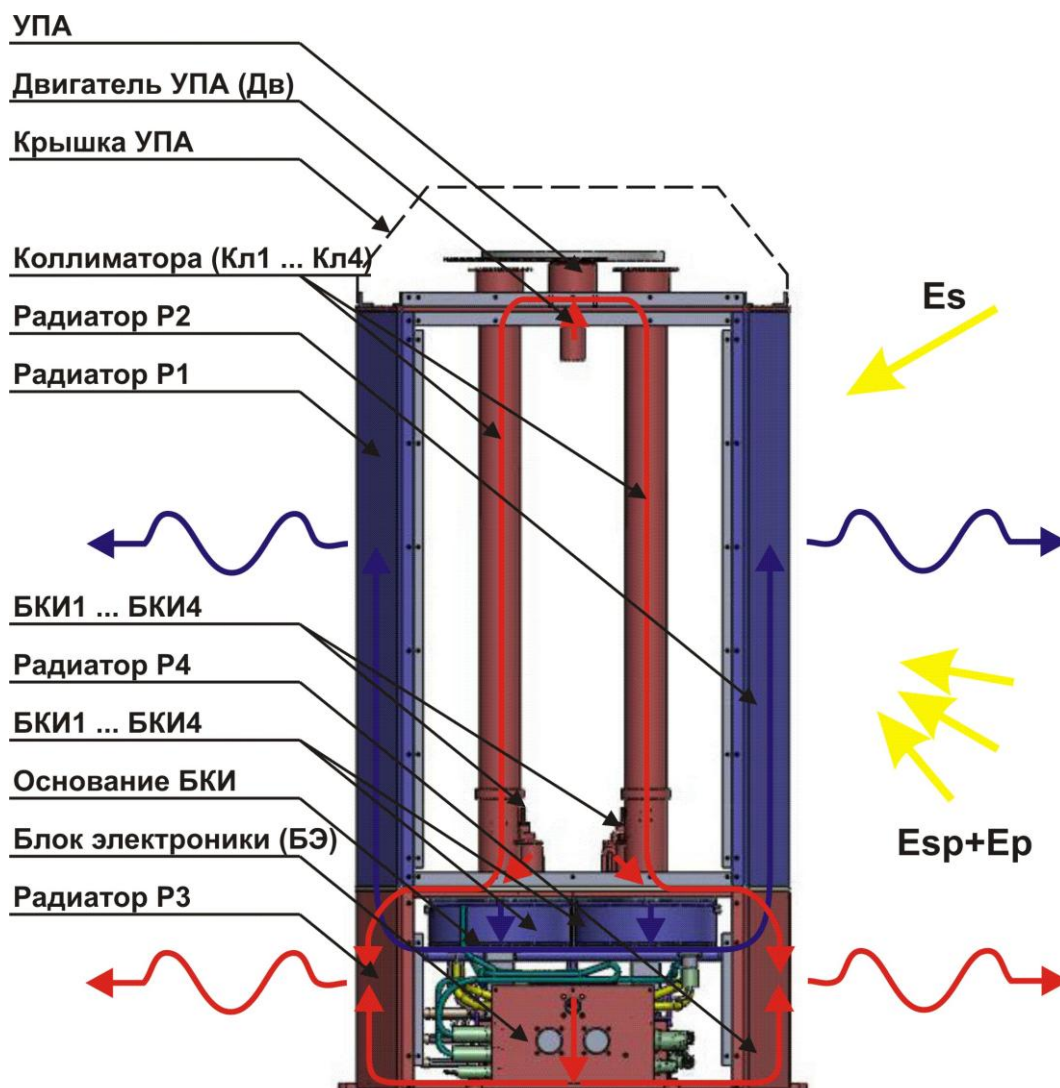
15. ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СОТР МВН.

Главное требование при разработке СОТР МВН заключается в постоянном обеспечении высокостабильной температуры детекторов на уровне $-40 \pm 1^\circ \text{C}$ в условиях открытого космоса (необходимость охлаждения детектора до такой температуры из-за шумов и поляризации объясняется более подробно в приложении С). При этом задача по СОТР усложняется из-за необходимости размещения в конструкции МВН рядом друг с другом «холодной» (-40°C) и «теплой» ($+40^\circ \text{C}$) зоны и тем, что СОТР должна функционировать в условиях переменного теплового потока на внешнюю поверхность монитора из-за экранировки и отражения от элементов конструкции МКС.

В наземных условиях СОТР МВН должны обеспечивать возможность:

- кратковременной автономной (≤ 10 минут) проверки функционирования детекторов при наземных испытаниях МВН;
- долговременной работы детекторов при атмосферном давлении и в вакууме при проведении наземных испытаний и рентгеновской калибровки с использованием дополнительных наземных элементов СОТР.

Для решения задачи обеспечения температурного режима МВН была предложена следующая схема из двух подсистем – «холодной», обеспечивающей термостабилизацию детекторов внутри БРД на уровне $-40 \pm 1^\circ \text{C}$ и «теплой», предназначенной для стабилизации температуры блока электроники (БЭ), блока калибровочного источника (БКИ) и двигателя с редуктором (Дв) узла перекрытия апертуры (УПА) в диапазоне от -20 до $+40^\circ \text{C}$ (см. рис. 13.1).



Температурные зоны: ■ - $-20 \dots +40^{\circ}\text{C}$; ■ - $-35 \dots -30^{\circ}\text{C}$

Рис. 13.1. Схема СОТР МВН. БРД1,..., БРД4 – блоки рентгеновского детектирования, БЭ – блоки электроники, Р1,..., Р4 – радиаторы, Кл1,..., Кл4 – коллиматоры, БКИ1,..., БКИ4 – блоки калибровочных источников, Дв – двигатель с редуктором, УПА – узел перекрытия апертуры коллиматоров МВН. БРД, Р1 и Р2 – «холодные» элементы, находятся в температурной зоне $-35 \div -30^{\circ}\text{C}$, которая обозначена синим цветом, остальные «теплые» элементы, находятся в температурной зоне $-10 \div +40^{\circ}\text{C}$, которая обозначена коричневым цветом. E_s – прямое и E_{sp} – отраженное от планеты солнечное излучение, E_p – тепловое излучение планеты и излучение от элементов конструкции МКС.

«Холодная» подсистема имеет активную часть внутри БРД в виде термоэлектрических преобразователей (ТЭП), нагревателей и системы управления и пассивную часть в виде двух радиаторов-излучателей Р1 и Р2 с теплопроводами. Пассивная часть выполняет вспомогательную функцию, заключающуюся в отводе тепла от горячей поверхности ТЭП, расположенной на основании БРД, на холодной поверхности ТЭП установлен детектор. Такая схема позволяет существенно повысить точность поддержания температуры детектора до уровня $\pm 1^{\circ}$.

Поскольку для «теплой» подсистемы требования к диапазону температур гораздо менее жесткие ($-20 \div +40^{\circ}\text{C}$), то данная подсистема включает только пассивную часть в виде двух радиаторов Р3 и Р4.

Пассивная часть как «холодной» так и «теплой» подсистем СОТР выполнена по нестандартной «проточной схеме» терморегулирования. В такой схеме используются два оппозитно расположенных радиатора, соединенных теплопроводами с объектами терморегулирования. Для «холодной» подсистемы используются радиаторы Р1 и Р2, для «теплой» – Р3 и Р4.

Данная схема обеспечивает повышенную устойчивость к переменности внешних тепловых факторов, поскольку при облучении внешними источниками тепла:

- солнечным излучением, прямым E_s и отраженным от планеты E_{sp} ;
- тепловым излучением планеты E_p и излучением от элементов конструкции МКС;

хотя бы один из радиаторов должен находиться в теневой зоне.

Из-за различия требований к «холодной» и «теплой» подсистемам в них используются различные типы теплопроводов. В «холодной» подсистеме это тепловые трубы, в «теплой» – теплопроводные элементы конструкции.

Для термостабилизации детекторов при долговременных калибровках и испытаниях в наземных условиях при атмосферном давлении и в вакууме без азотного охлаждения радиаторов используется активная часть «холодной» подсистемы СОТР и медные трубки с водяным охлаждением для отвода тепла от нагретой поверхности ТЭП. Температура воды во внешнем контуре поддерживается на уровне $+1 \div +5^{\circ}\text{C}$, что позволяет при помощи ТЭП обеспечивать температуру на детекторах на уровне -25°C . Для изоляции охлаждаемого до -25°C детектора от внешних температур и атмосферных факторов детектор помещается в герметичный корпус с бериллиевым окном, в вакууме, что в свою очередь потребовало введения в состав МВН вакуумной подсистемы.

На рис. 13.2 – 13.4 и рис. 13.5 – 13.6 представлены результаты расчетов максимальной и минимальной облученности поверхности МВН внешними лучистыми потоками на орбите МКС.

Орбита с максимальным уровнем потоков характеризуется повышенным уровнем прямого (см. рис. 13.2), и отраженного от Земли (см. рис. 13.3), солнечного излучения, а так же собственного излучения Земли (см. рис. 13.4). При этом, для прямого и отраженного от Земли солнечного излучения характерна повышенная переменность во времени.

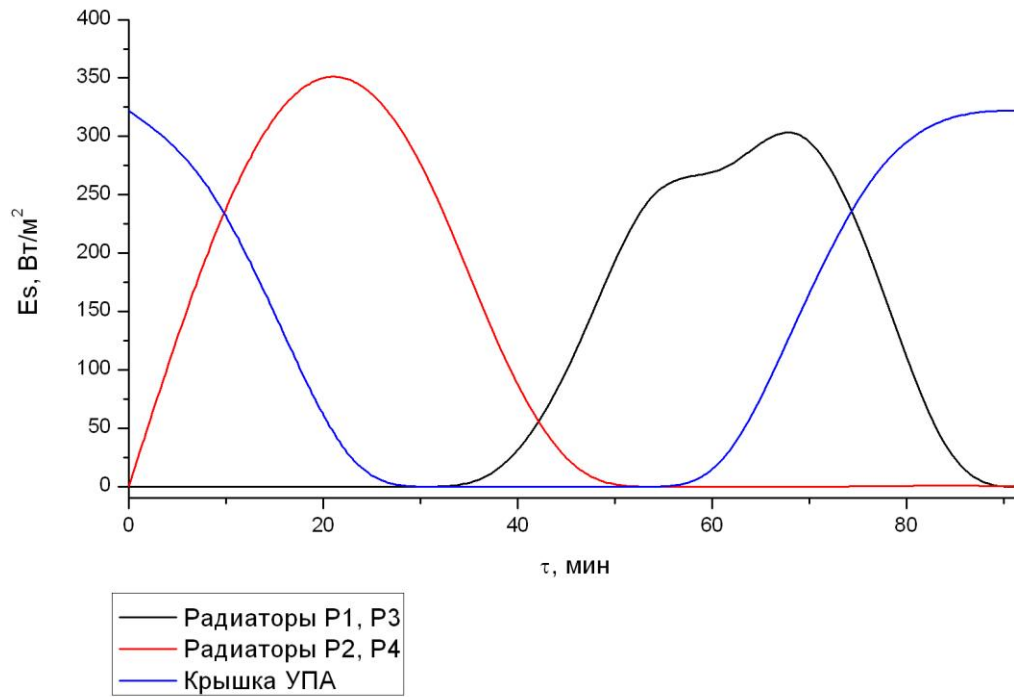


Рис. 13.2. Облученность поверхности МВН прямым солнечным излучением на орбите МКС с максимальным уровнем облученности.

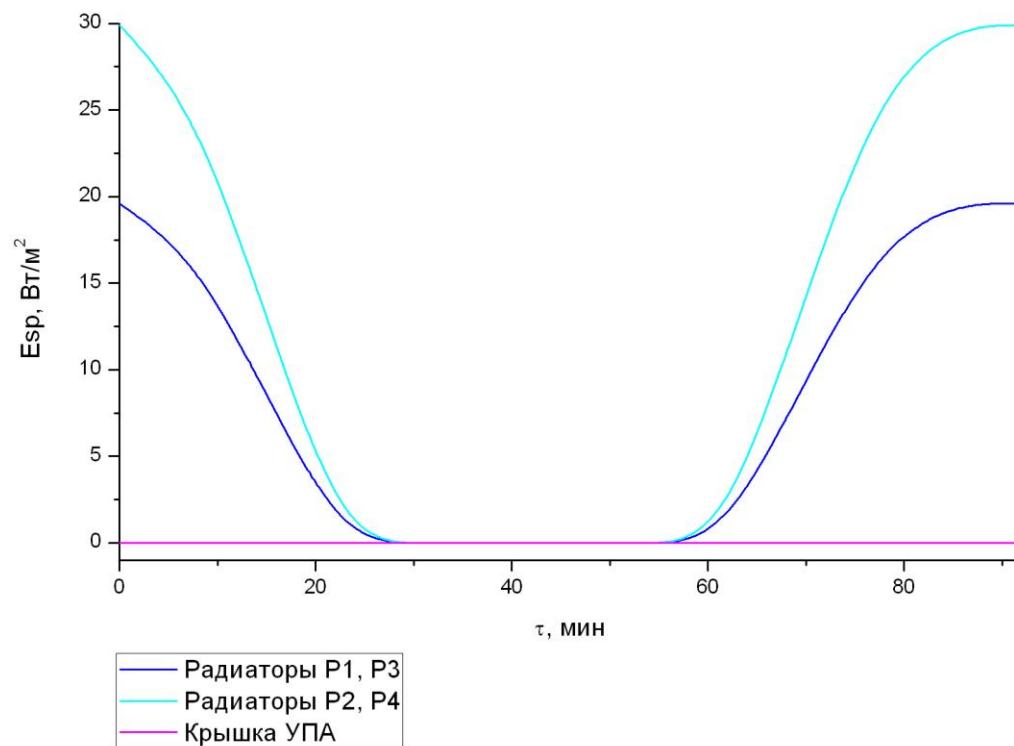


Рис. 13.3. Облученность поверхности МВН отраженным от Земли солнечным излучением с максимальным уровнем облученности.

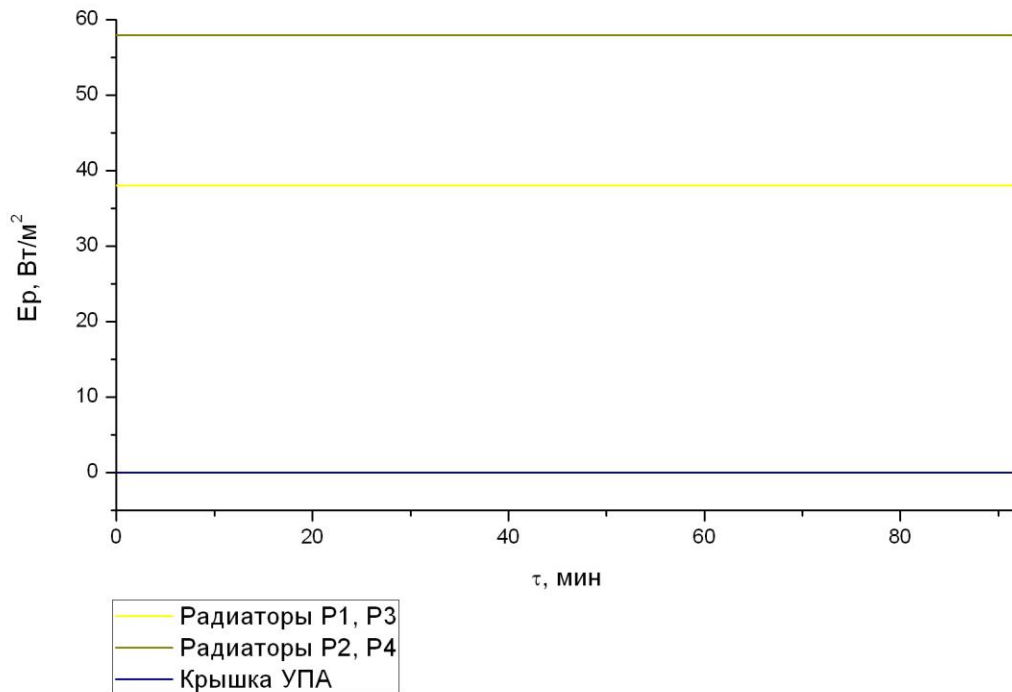


Рис. 13.4. Облученность поверхности МВН собственным излучением Земли с максимальным уровнем облученности.

На орбите с минимальным уровнем облученности облучение прямым солнечным излучением основных элементов монитора отсутствует. Облученность поверхности монитора отраженным от Земли солнечным излучением характеризуется пониженной амплитудой (см. рис. 13.5), а облученность собственным излучением Земли – пониженным уровнем (см. рис. 13.6).

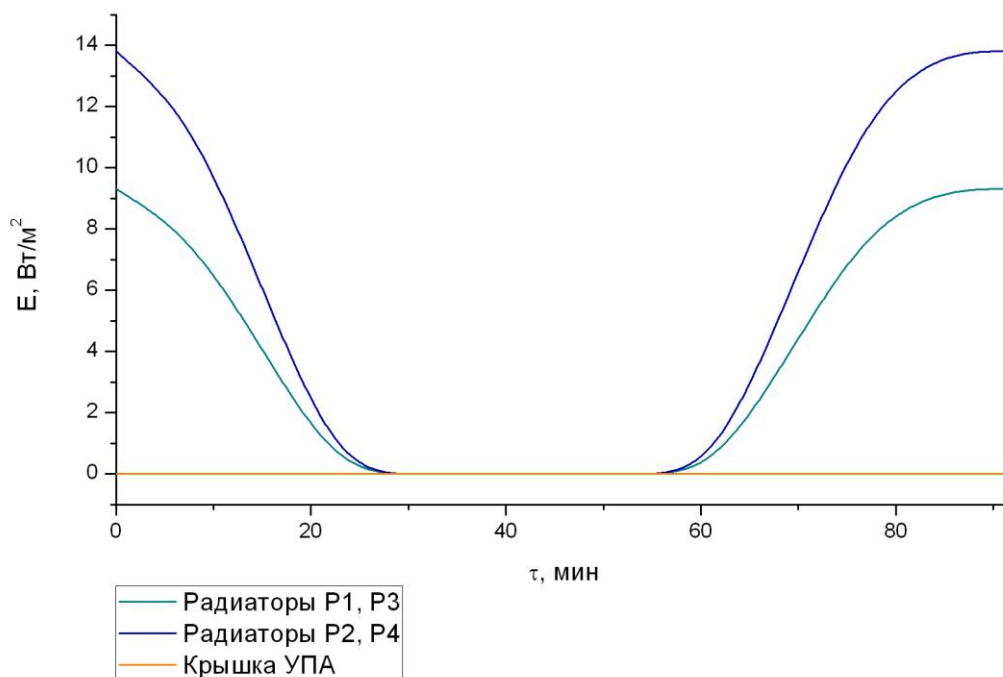


Рис. 13.5. Облученность поверхности МВН отраженным от Земли солнечным излучением на орбите с минимальным уровнем облученности.

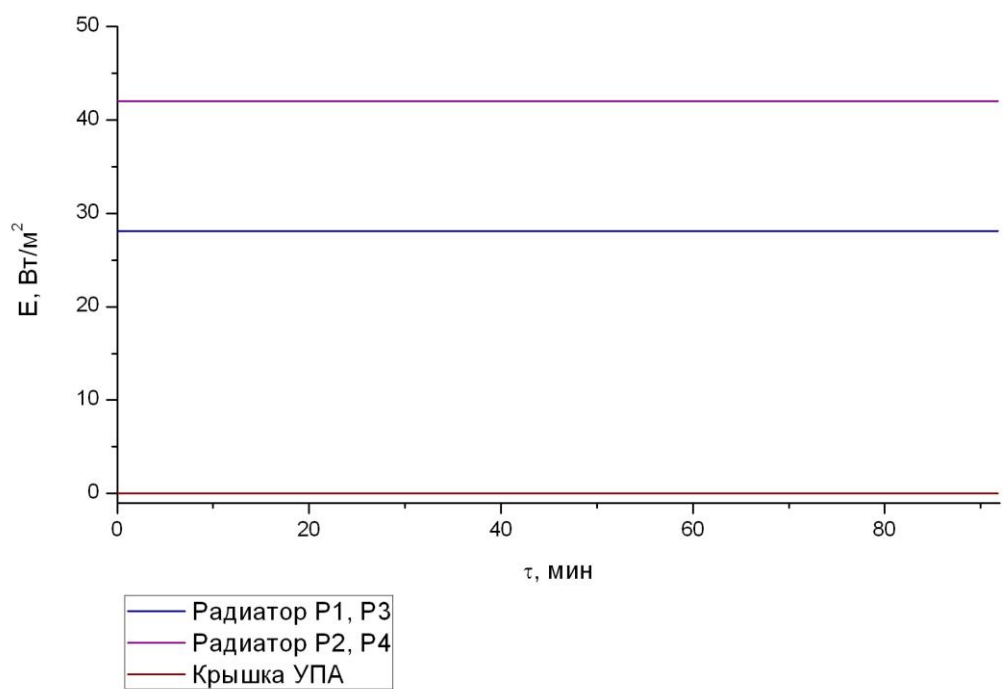


Рис. 13.6. Облученность поверхности монитора собственным излучением Земли на орбите с минимальным уровнем облученности.

Результаты расчета температур представлены на рис. 13.7 – для орбиты с максимальным уровнем облученности и на рис. 13.8 – для орбиты с минимальным уровнем облученности.

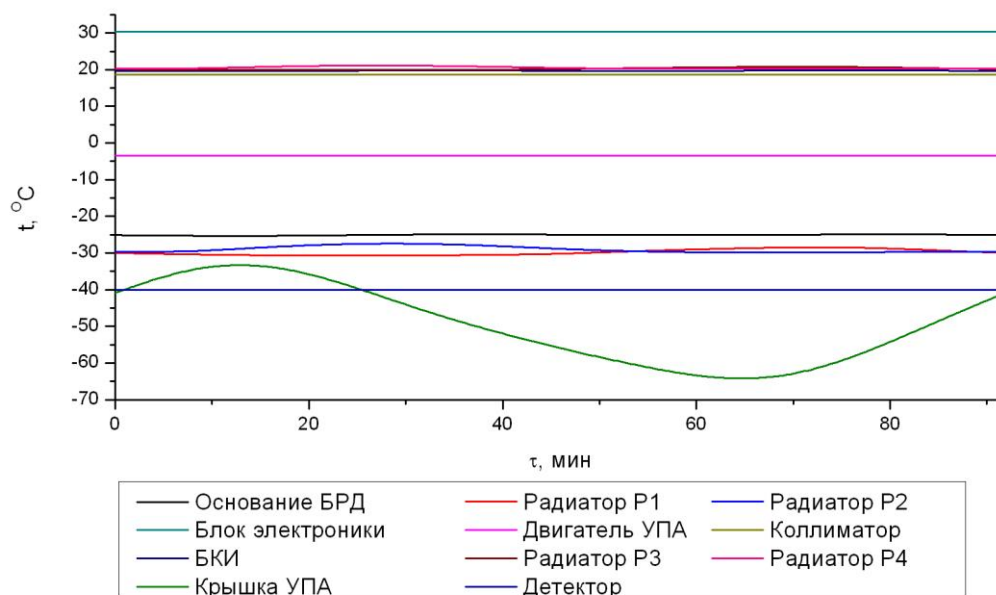


Рис. 13.7. Температура составных частей МВН на орбите с максимальным уровнем облученности.

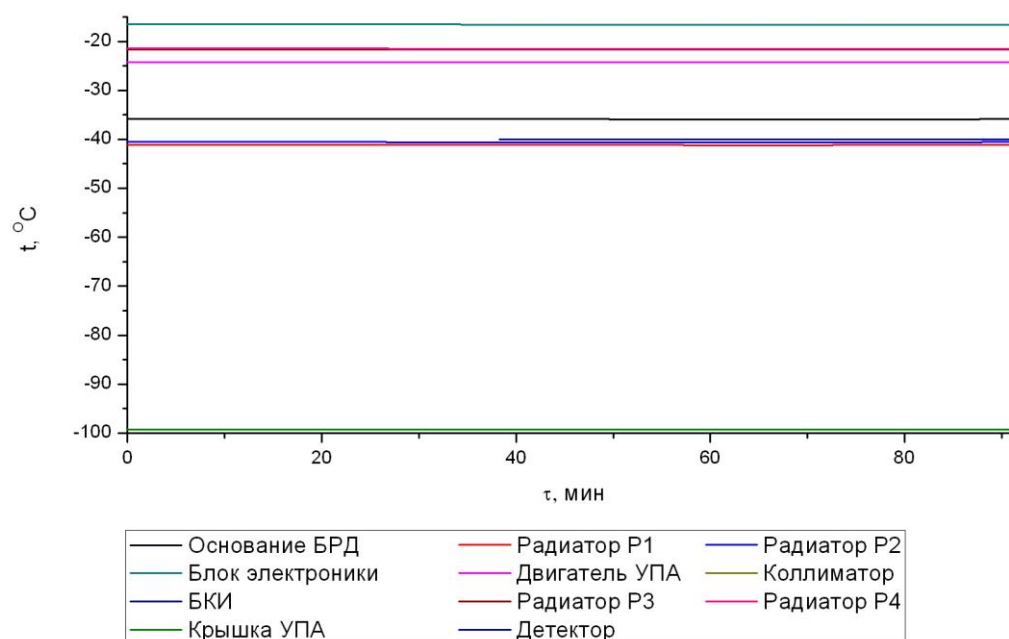


Рис. 13.8. Температура составных частей МВН на орбите с минимальным уровнем облученности.

Анализ полученных результатов показывает, что пассивная часть «холодной» подсистемы СОТР обеспечивает термостабилизацию нагревающейся части ТЭП (основание БРД) на уровне -24°C при максимальных и на уровне -35°C – при минимальных внешних лучистых потоках. Это позволяют поддерживать температуру детектора с помощью активной части «холодной» подсистемы СОТР на уровне $-40 \pm 1^{\circ}\text{C}$ при всех возможных сочетаниях внешних тепловых факторов.

«Теплая» подсистема СОТР обеспечивает поддержание температуры объектов регулирования в диапазоне от -3°C (температура двигателя) до $+30^{\circ}\text{C}$ (температура блока

электроники) на орбите с максимальными лучистыми потоками и в диапазоне от -16°C до -24°C – на орбите с минимальным уровнем внешних лучистых потоков.

В целом расчеты показывают, что СОТР МВН позволяет обеспечить стабилизацию температур основных элементов монитора в требуемых пределах, несмотря на сильно переменные внешние тепловые условия.

16. ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА.

16.1 CdTe

Таблица 14.1. Характеристики наиболее используемых полупроводниковых материалов.

Параметр	Si	Ge	CdTe	Cd _{1-x} Zn _x Te	GaAs	HgI ₂
Атомный номер, Z	14	32	48, 52	48, 30, 52	31, 33	80, 53
Удельное сопротивление при комнатной температуре, Ом см.	10 ⁴	50	10⁸	10 ⁹	10 ⁷	10 ¹³
Энергия образования пары носителей, эВ	3.62	2.98	4.62	4.62 – 5.5	4.2	4.2
Подвижность электронов μ_e , см ² /(В с)	1400	3900	1100	1000	8000	100
Подвижность дырок μ_h , см ² /(В с)	480	1900	100	50	400	4
Время жизни электронов τ_e , с	1×10 ⁻³	>10 ⁻³	3×10⁻⁶	3×10 ⁻⁶	3×10 ⁻⁸	1×10 ⁻⁶
Время жизни дырок τ_h , с	2×10 ⁻³	1×10 ⁻³	2×10⁻⁶	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁵
($\mu \cdot \tau$) _e , см ² /В	>1	>1	3×10⁻³	3×10 ⁻³	8×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁴
($\mu \cdot \tau$) _h , см ² /В	~1	>1	2×10⁻⁴	5×10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁵

Как видно из табл. 14.1 компоненты полупроводникового кристалла группы A₂B₆ CdTe имеют большой заряд ядра атомов, кадмий – 48, теллур – 52 и, следовательно, CdTe имеет большое по сравнению с кремнием, германием и арсенидом галлия сечение взаимодействия с рентгеновским излучением. CdTe имеет более широкую ~1.5 эВ, чем у германия (0.66 эВ, T = 300° K) и кремния (1.12 эВ, T = 300° K) ширину запрещенную зону, что позволяет работать с CdTe при более высоких, так называемых, «комнатных» температурах. Правда для улучшения спектральных характеристик детектора приходится все равно охлаждать CdTe до температур –30° ÷ –40° C. Такая температура предпочтительна и для уменьшения скорости поляризации кристалла.

16.2 Принцип работы

Работа полупроводникового детектора основывается на том, что регистрируемая частица, взаимодействуя с веществом детектора, тратит свою энергию на образование пар - носителей заряда, электронов и дырок.

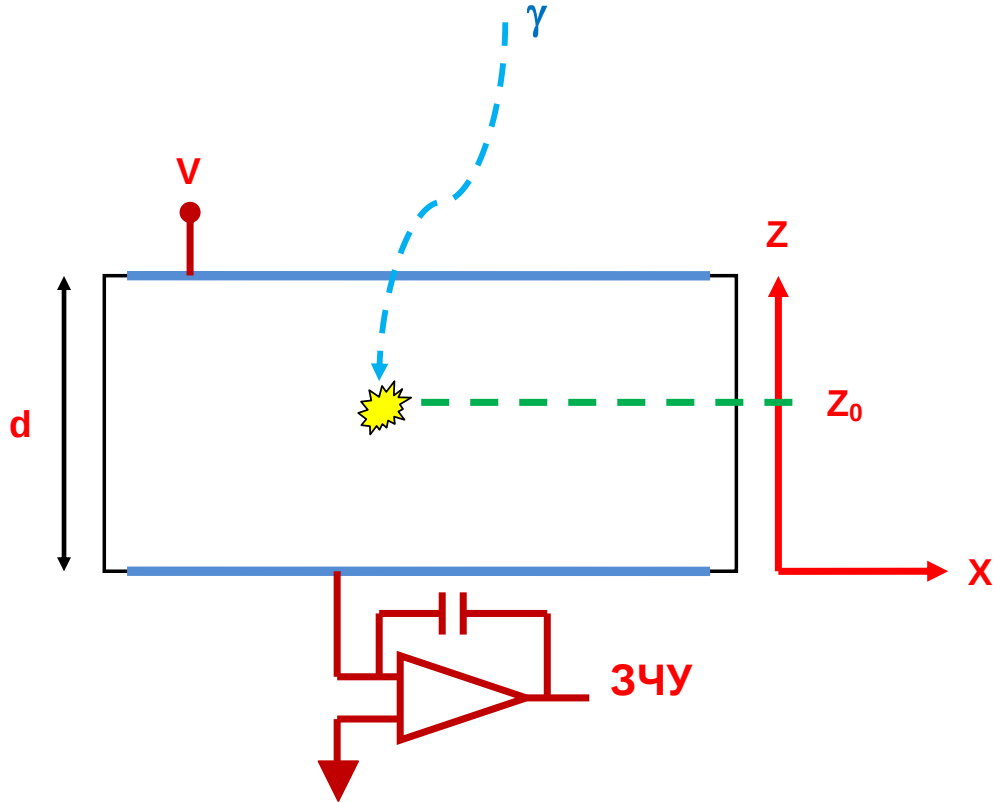


Рис. 14.2.1. Схема полупроводникового детектора. К детектору приложено напряжение V .

Под действием приложенного к детектору напряжения электроны движутся к аноду, дырки к катоду, в результате цепи течет ток. Включенный в цепь зарядо – чувствительный усилитель (ЗЧУ) позволяет определить интеграл протекшего тока в цепи в каждый момент времени: $Q(t) = \int_0^t i(t') dt'$. При движении зарядов через кристалл происходит их частичная рекомбинация или захват на дефектах кристалла, что приводит к неполному собиранию заряда. При характерном времени жизни зарядов в кристалле τ через время t после образования свободного заряда Q_0 величина свободного заряда станет равной $Q = Q_0 \times e^{-\frac{t}{\tau}}$.

Если глубину z_0 отсчитывать от анода, то индуцированный электронами заряд равен:

$$Q_{изм}^e = Q_0 \frac{\mu_e \tau_e U}{d^2} \left[1 - e^{\left(-\frac{d \cdot z_0}{\mu_e \cdot \tau_e \cdot U} \right)} \right],$$

а индуцированный дырками заряд равен:

$$Q_{изм}^p = Q_0 \frac{\mu_p \tau_p U}{d^2} \left[1 - e^{\left(-\frac{d \cdot (d - z_0)}{\mu_p \cdot \tau_p \cdot U} \right)} \right],$$

(так называемые формулы Хечта).

Полный индуцированный во внешней цепи заряд $Q_{изм} = Q_{изм}^e + Q_{изм}^p$.

Как видно, величина протекающего во внешней цепи заряда зависит от исходной величины свободного заряда Q_0 , глубины образования заряда z_0 , толщины детектора d , приложенного к детектору напряжения U и произведения подвижности носителей заряда на время их жизни $\mu\tau$.

При облучении детектора со стороны катода рентгеновским излучением низкой энергии фотоны взаимодействуют с материалом детектора в тонком поверхностном слое ($z_0 \approx d$), и весь индуцированный заряд обусловлен дрейфом электронов к аноду. Поскольку поле в детекторе однородно и расстояние, проходимое электронами до анода, в этом случае приблизительно одинаково, они индуцируют за время своего движения приблизительно одинаковый заряд во внешней цепи. При увеличении энергии фотонов разброс по глубине взаимодействия становится больше, и электроны при глубоких взаимодействиях ($z_0 < d$) индуцируют меньший заряд, а дырки, проходя расстояние $d - z_0$, из-за их низкого значения $\mu\tau$ частично вымирают и дают неполный вклад в суммарный индуцированный заряд. Таким образом возникает баллистический дефицит заряда и уширение линии в сторону низких энергий. На рис.7.1.1.2, видно, что у пика 59.54 кэВ слегка асимметричная форма и имеется небольшой «хвост» в сторону меньших энергий. У пиков низких энергий асимметрия не наблюдается, ширины обусловлены, в основном, шумами электроники.

Увеличивая напряжение на детекторе, мы увеличиваем скорость дрейфа носителей заряда, $v = \mu \times E$, где E – напряженность поля (в случае с планарным детектором $E = \frac{U}{d}$), и, следовательно, уменьшаем время дрейфа носителей и их вымирание. Напряжение в 400 – 500 В позволяет практически полностью собрать все носители заряда и избавиться от «хвоста» у пиков на больших энергиях.

Отрицательной стороной CdTe является относительно невысокое удельное сопротивление: 10^8 Ом см при комнатной температуре, что при напряжении 400 – 500 В приводит к большим темновым токам (токам утечки) и большим шумам. Охлаждение до -30°C позволяет поднять удельное сопротивление на 2 порядка, что позволяет значительно уменьшить токи утечки и шумы (зависимость сопротивления полупроводника от температуры выражается формулой: $\rho = \rho_0 \cdot e^{\frac{E}{2kT}}$, где ρ_0 – удельное сопротивление материала при комнатной температуре, E – ширина запрещенной зоны, k – постоянная Больцмана, T – температура).

16.2.1 Диод Шоттки

Другая возможность уменьшения токов утечки заключается в формировании потенциального барьера для носителей заряда. Используемый в конструкции БРД полупроводниковый детектор является так называемым диодом Шоттки. Диодные свойства проявляются благодаря тому, что один из электродов выполнен из металла, с работой выхода, существенно отличной от работы выхода полупроводника. При образовании идеального контакта металла с полупроводником возникает диффузия электронов из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. Перераспределение зарядов вызывает появление контактной разности потенциалов, которая, в свою очередь, позволяет протекать току лишь в одну сторону

(свойство диода). В цепь детектор включается как диод с обратным напряжением смещения. В таком режиме ток, протекающий через диод, минимален.

16.2.2 Поляризация

Неприятной особенностью диода Шоттки является так называемая «поляризация», которая состоит в том, что при протекании тока часть носителей заряда собирается в приконтактной области, ослабляя тем самым рабочее поле в детекторе. По мере накопления заряда этот эффект становится настолько сильным, что детектор перестает работать. Накопленный заряд удерживается у электродов приложенной к детектору разностью потенциалов, поэтому после снятия напряжения с детектора он быстро «рассасывается», и работоспособность детектора восстанавливается. Время от момента подачи напряжения на детектор до проявления эффекта поляризации тем больше, чем ниже температура детектора и чем выше приложенная к детектору разность потенциалов. При температуре детектора -20°C и напряжении 400 В это время составляет несколько часов, поэтому в процессе эксперимента предусмотрена операция периодического выключения на несколько минут напряжения на детекторах.

Одной из технологических задач эксперимента МВН является изучение эффекта поляризации диодов Шоттки в процессе облучения потоками заряженных частиц в космическом пространстве.