

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт Космических Исследований

**ОПИСАНИЕ ТЕЛЕСКОПА ДЖЕТ-Х**  
**JET-X – Joint Europe Telescope X-ray**

2003

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b> .....	<b>1</b>
<b>ОПИСАНИЕ ТЕЛЕСКОПА ДЖЕТ-Х</b> .....	<b>2</b>
<b>1. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ</b> .....	<b>2</b>
1.1 УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	3
1.2 ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ .....	3
<b>2. РЕНТГЕНОВСКИЕ ЗЕРКАЛА</b> .....	<b>3</b>
2.1 ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ ЗЕРКАЛ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ.....	4
2.2 ТОЧЕЧНАЯ ФУНКЦИЯ ОТКЛИКА.....	6
<b>3. ПЗС-МАТРИЦЫ</b> .....	<b>7</b>
3.1 РАСПОЛОЖЕНИЕ ПЗС В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ .....	8
3.2 ЛИНЕЙНОСТЬ ПЗС И КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ.....	9
3.3 КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	9
3.4 БОРТОВОЙ КАЛИБРОВОЧНЫЙ ИСТОЧНИК.....	10
3.5 ОТБОР И КЛАССИФИКАЦИЯ СОБЫТИЙ.....	10
3.6 РЕЖИМЫ РАБОТЫ .....	11
3.7 УСТРОЙСТВО ФИЛЬТРА .....	12
<b>4. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ</b> .....	<b>12</b>
4.1 НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ.....	12
4.2 ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ.....	14
4.3 ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ.....	15
4.4 ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ.....	15
4.5 ФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ.....	16
4.6 МИНИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ СЧЕТА .....	16
4.7 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К СПЕКТРАЛЬНЫМ ЛИНИЯМ И ПЕРЕМЕННОСТИ ИСТОЧНИКОВ .....	17
4.8 ОЖИДАЕМЫЕ СКОРОСТИ СЧЕТА.....	18

## ОПИСАНИЕ ТЕЛЕСКОПА ДЖЕТ-Х

Объединенный европейский рентгеновский телескоп ДЖЕТ-Х (Рис.1) – совместный проект, разработанный консорциумом научных институтов Великобритании, Италии, Германии и России. Телескоп ДЖЕТ-Х является одним из основных приборов комплекса научной аппаратуры проекта Спектр-Рентген-Гамма.



*Рис. 1. Летная модель рентгеновского телескопа ДЖЕТ-Х в чистой комнате*

### 1. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ

ДЖЕТ-Х состоит из двух идентичных соосных рентгеновских телескопов, способных строить изображение. Система зеркал каждого телескопа состоит из 12-ти соосных вложенных друг в друга зеркальных оболочек, имеющих фокусное расстояние 3.5 м и диаметр 0.3 м. Изображение в фокальной плоскости строится при помощи охлаждаемых ПЗС-матриц. Система из рентгеновских зеркал и ПЗС-матрицы может регистрировать фотоны в диапазоне энергий 0.3-10 кэВ.

Смещение космического аппарата и его тепловая деформация во время длинных наблюдений приводят к размыванию изображения и потере чувствительности. В частности, при 30 часовой экспозиции ожидается смещение на  $\sim 30''$ . Звездный датчик телескопа ДЖЕТ-Х позволяет определять направление ориентации прибора с интервалом в 1 с, и, таким образом, корректировать сдвиг между последовательными кадрами изображений ПЗС-матрицы (время интегрирования 2.5 сек) при анализе данных. Звездный датчик детектирует до 4 звезд в своем поле зрения  $4^\circ \times 5.5^\circ$  и отслеживает их положения, что дает возможность в последствии при наземной обработке данных достичь точности восстановления изображения лучше  $5''$ .

### ***1.1 Условия эксплуатации***

ДЖЕТ-Х работает как самостоятельный прибор, имеющий простые интерфейсы с космическим аппаратом. Кремниевый монитор радиационной обстановки измеряет внешний уровень космической радиации, и, таким образом, рентгеновский телескоп может быть выключен во время солнечных вспышек или при прохождении радиационных поясов. Наблюдения будут проводиться постоянно, за исключением периода прохождения радиационных поясов, сеансов связи с Землей и времени вхождения в земную тень (только один-два раза в год). Телескоп ДЖЕТ-Х будет работать одновременно с любым другим основным прибором обсерватории.

ДЖЕТ-Х сохраняет научные данные во внутреннем твердотельном запоминающем устройстве емкостью 60 Мбайт. Содержимое памяти телескопа будет передаваться во время каждого сеанса связи с Землей, что потребует 650 секунд при полном заполнении памяти телескопа. Интерфейс медленной телеметрии ДЖЕТ-Х с космическим аппаратом используется для передачи служебной информации со скоростью 120 байт каждые 60 секунд при нормальной работе вне сеансов связи с Землей и каждые 4 секунды во время сеансов связи.

### ***1.2 Вспомогательные системы***

Корпус ДЖЕТ-Х собран из трех углепластиковых трубчатых секций. В корпусе телескопа размещены приборы. Помимо этого корпус выполняет роль оптической скамьи, которая позволяет поддерживать неизменным фокусное расстояние и центрирование рентгеновских зеркал по отношению к детекторам фокальной плоскости и точно сохранять соосное расположение рентгеновских телескопов и звездного датчика. На передней секции корпуса установлена открывающаяся крышка, которая остается закрытой до тех пор, пока спутник не будет выведен на орбиту. Функция крышки - защита чувствительных оптических поверхностей от загрязнения и влаги во время наземных операций и запуска.

Рентгеновские зеркала монтируются на шпангоут в передней секции корпуса. Детекторы с ПЗС-матрицами вместе со шторкой и механизмом колеса фильтров монтируются на шпангоут фокальной плоскости, который является частью задней секции корпуса. Каждая ПЗС-матрица охлаждается пассивным радиатором, который монтируется на внешней стороне корпуса и подсоединен к криостату ПЗС тепловой связью.

Масса ДЖЕТ-Х составляет 565 кг, потребляемая мощность  $\sim 260$  ватт, из которой примерно половина используется для теплового контроля.

## **2. РЕНТГЕНОВСКИЕ ЗЕРКАЛА**

Телескоп ДЖЕТ-Х состоит из двух идентичных соосных рентгеновских телескопов, выполненных по схеме Wolter 1-го типа, система зеркал каждого сделана из 12 вложенных друг в друга софокусных зеркал (Рис.2). Длина зеркал – 600 мм, диаметр от 191 до 300 мм,

фокусное расстояние – 3500 мм. Рентгеновские зеркала изготовлены по технологии воспроизведения, с применением технологий, которые были использованы для телескопа SAX. Алюминиевая оправка покрыта тонким слоем никеля и тщательно отполирована до шероховатости со среднеквадратичным отклонением в 0.5 нм. Для получения отражающей поверхности на оправку методом испарения в вакууме наносится слой золота. Золото используется, поскольку обладает высоким коэффициентом отражения в энергетическом диапазоне 0.3-10 кэВ. Затем, оправка опускается в электролитическую ванну, где на нее осаждается слой никеля.

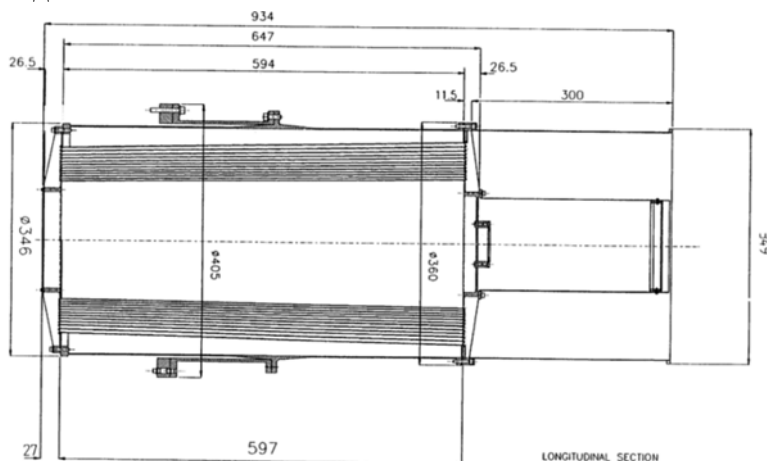


Рис. 2. Сборочный чертеж рентгеновской оптики телескопа ДЖЕТ-Х

### 2.1 Эффективная площадь зеркал и шероховатость поверхности

Геометрическая собирающая поверхность каждой летной системы зеркал равна 231.1 см<sup>2</sup>. Летная модель телескопа ДЖЕТ-Х прошла испытания на ускорителе PANTER института внеземной физики общества имени Макса Планка в Мюнхене. Расхождение рентгеновского пучка на ускорителе PANTER стало причиной потери площади из-за отсутствия второго отражения части фотонов. Величина потерь составили 5%. Система поддержки зеркал, состоящая из 12 перекладин снизила полезную площадь еще на 10%. Таким образом, используемая геометрическая площадь летных зеркал телескопов ДЖЕТ-Х на ускорителе PANTER составила 196.7 см<sup>2</sup>.

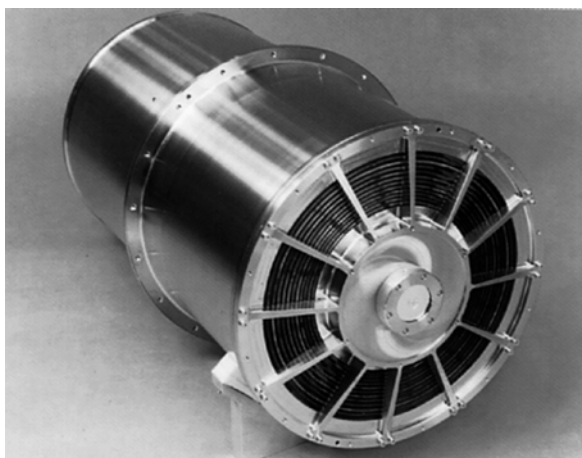


Рис. 3. Летная модель телескопа ДЖЕТ-Х (FM2): 12 вложенных друг в друга зеркал и механическая структура.

Для того чтобы получить корректную эффективную площадь (например, для точечного источника, удаленного на бесконечность) были промоделированы с

использованием программного обеспечения (ray tracing code) как параллельный пучок (источник на бесконечности), так и расходящийся пучок (например, источник, отнесенный на расстояние установки PANTER) для семи энергий фотонов. В итоге были получены соответствующие теоретические эффективные площади  $A_{\infty}$  и  $A_{Panter}$ . Затем, измеренные на ускорителе эффективные площади, были нормированы отношением между  $A_{\infty}$  и  $A_{Panter}$ . В таблице 1 приведены эффективные площади по оси зеркальной системы ДЖЕТ-Х для источника, удаленного на бесконечность и измеренные на установке PANTER. На рисунке также показана зависимость эффективной площади по оси от энергии, полученная при моделировании хода луча, вместе с величинами, полученными при измерениях.

Таблица 1. Эффективная площадь зеркал, измеренная для летных моделей FM1, FM2 и FM3\*

Энергия, кэВ	FM1, см <sup>2</sup>	FM2, см <sup>2</sup>	FM3, см <sup>2</sup>	Теоретическая **, см <sup>2</sup>
1.49	158.9±1.1	161.0±0.8	162.5±1.1	164.6
8.05	69.2±0.6	69.5±0.6	62.1±0.4	72.9

\* Приведенные значения были измерены на ускорителе PANTER (Германия) с использованием инженерной модели PSPC в качестве фокального детектора и откорректированы для источника, удаленного на бесконечность. Ошибки получены по статистике отсчетов.

\*\* Теоретические оценки эффективной площади получены с использованием последних таблиц коэффициентов отражения Непке.

Эффективная площадь летных моделей FM1 и FM2 меньше на 3.5% и 2.2% теоретической величины на энергии 1.5 кэВ. На энергии 8.1 кэВ эти значения меньше на 5.0% и 4.7% соответственно.

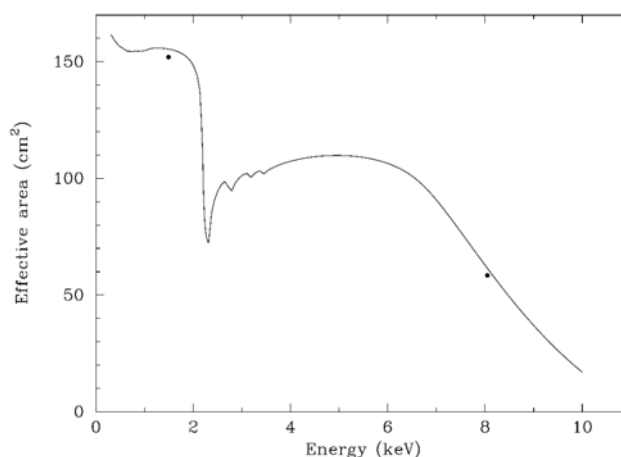


Рис. 4. Теоретическая кривая эффективной площади зеркал. Источник расположен на расстоянии 130 м, что соответствует условиям на установке PANTER. Две точки — измеренные значения для ДЖЕТ-Х FM2 на энергиях 1.5 и 8.1 кэВ.

Данные калибровки летных систем зеркал ДЖЕТ-Х показали, что крылья рассеяния точечной функции отклика имеют очень низкую поверхностную яркость даже на энергии 8.1 кэВ. Потери собирающей площади по оси на энергии 1.5 кэВ в основном связаны с неточностями геометрии зеркал и т.п., тогда как большие потери на энергии 8.1 кэВ вызваны рентгеновским рассеянием. Использование первого порядка теории рассеяния в

приближении гладкой поверхности дает оценку среднеквадратичного отклонения шероховатости поверхности  $\sigma \sim 0.35$  нм (для длины волны  $< 10$  мкм).

## 2.2 Точечная функция отклика

Точечная функция отклика (ТФО) по оси в настоящее время известна только для трех энергий, на которых проводились испытания телескопа на ускорителе PANTER – 0.93 (Cu  $L_{\alpha}$ ), 1.49 (Al  $K_{\alpha}$ ) и 8.05 (Cu  $K_{\alpha}$ ) кэВ (см. таблицу 2).

Ширина на половине высоты (HEW) всегда меньше 20", тогда как изначально требовалось достичь  $HEW \leq 30''$  на энергии 8 кэВ. Более того, реальные значения должны быть даже лучше, из-за переоценки измеренных на ускорителе PANTER значений вследствие собственной ширины тестового рентгеновского пучка. Угловое разрешение в 20" соответствует 0.340 мм в фокальной плоскости (HEW) или 12.6 пикселей ПЗС-матрицы.

Таблица 2. Измеренные значения HEW и 90% EEF ДЖЕТ-Х

	Энергия	FM1*	FM2*	FM3*
HEW (ПЗС)	0.93 кэВ	-	12.9	-
90% EEF (PSPC)	0.93 кэВ	-	37.4	-
HEW (ПЗС)	1.49 кэВ	15.1	14.6	16.9
90% EEF (PSPC)	1.49 кэВ	61.5	46.6	65.1
HEW (ПЗС)	8.05 кэВ	18.7	18.8	21.4
90% EEF (PSPC)	8.05 кэВ	203.5	202.9	192.3

\* - в угловых секундах.

Для того чтобы проверить угловое разрешение зеркал по оси с ПЗС-матрицей в фокальной плоскости, была проведена экспозиция двух источников одинаковой интенсивности, разнесенных по углу на 20" (вначале была проведена первая экспозиция, затем детектор был передвинут на расстояние эквивалентное 20", и после этого проведена вторая экспозиция). Два источника хорошо разрешаются на энергиях 1.5 и 8.1 кэВ, что подтвердило высокое угловое разрешение зеркальных систем ДЖЕТ-Х (см. рис.5).

Внеосевая точечная функция отклика, особенно для больших углов, полностью определяется особенностями конструкции зеркал и предположительно имеет форму крыльев бабочки. Испытания на ускорителе PANTER показали, что источник, смещенный на 20' от оси, имеет ширину на полувысоте  $\sim 65''$  и на 1.5 и на 8.1 кэВ. Эта величина сравнима со значением 90" для ROSAT PSPC.

Была проделана большая работа по исследованию влияния возможной засветки от внеосевых источников на наблюдения точечных источников и фоновой засветки на наблюдения точечных и протяженных источников. Был создан атлас зависимости внеосевой точечной функции отклика для различных углов отклонения от оси. На самом деле было обнаружено, что фотоны от источников, находящихся за пределами поля зрения телескопа могут попадать на ПЗС-матрицу, испытывая только одно отражение (от парабооида или гипербооида) или вообще не касаясь зеркал. Основываясь на данных калибровок и используя модель хода лучей (ray tracing code), была оценена засветка ПЗС-матрицы источниками, находящимися вне поля зрения телескопа. При помощи астрономических баз данных была рассчитана засветка яркими рентгеновскими источниками (из каталога HEAO A-1) источников из обзора неба телескопом ROSAT и обнаружено, что засветке более 5% от ярких источников вне поля зрения телескопа

подвержена только малая часть (0.6%) источников из обзора ROSAT. Ложные отражения, т.е. только от одного зеркала или вообще не касаясь зеркал, могут также испытывать фоновые фотоны, что приводит к увеличению внутреннего фона детекторов. Моделирование хода лучей на разных энергиях позволило оценить влияние этого дополнительного фона на наблюдения точечных и протяженных источников. Исследование показало, что для телескопа ДЖЕТ-Х этот дополнительный фон вносит минимальный вклад в спектры источников по сравнению с основным фоном. Кроме этого, был рассмотрен случай наблюдения протяженного источника, размер которого превышает поле зрения ПЗС-матрицы, т.е. возникает самозасветка. В этом случае изменение спектра из-за ложных отражений также минимально.

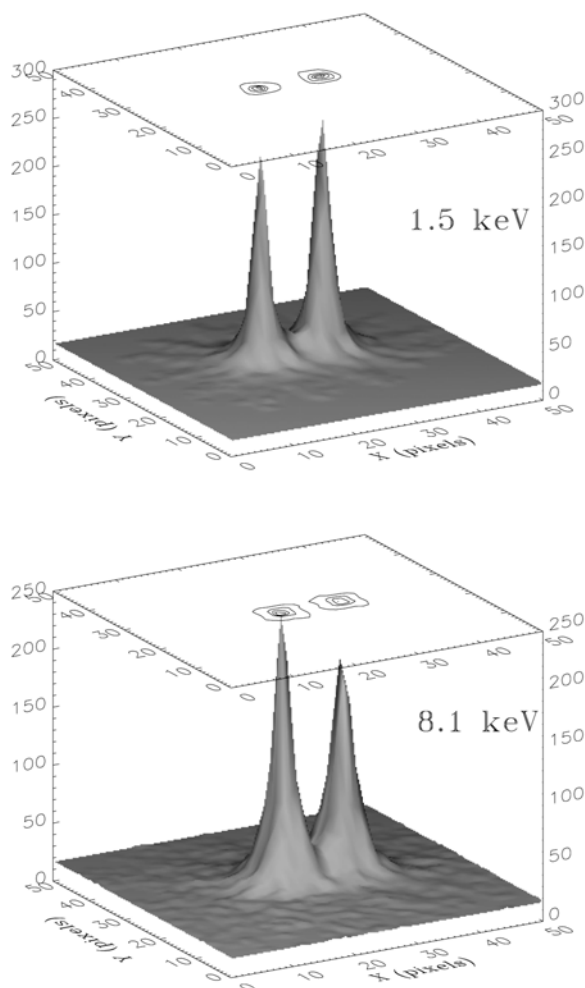


Рис. 5. Изображения двух источников, разнесенных на угол  $20''$ , на энергиях 1.5 кэВ (верхний рисунок) и 8.1 кэВ (нижний рисунок), полученные на ПЗС-матрице летной модели зеркальной системы FM2 телескопа ДЖЕТ-Х.

### 3. ПЗС-МАТРИЦЫ

ПЗС-матрицы телескопа ДЖЕТ-Х (см. Таблица 3) - приемники с большой площадью ( $20.7 \times 27.6$  мм) и большим количеством пикселей ( $768 \times 1024$ ). ПЗС-матрицы имеют отклик в широком энергетическом диапазоне (0.3-10 кэВ) для повышения эффективности на низких энергиях: эффективность детектирования квантов на энергии 1.5 кэВ достигает 90%. ПЗС-матрицы должны охлаждаться до  $-80^\circ$  С для подавления тепловой составляющей темнового тока, что позволит сократить среднеквадратичный шум считывания до 4 электронов на кадр. Такая низкая температура достигается пассивным охлаждением в открытый космос через радиатор, установленный на внешней стороне структуры телескопа ДЖЕТ-Х и соединенный с фокальной плоскостью детекторов



жесткой тепловой связью. ПЗС и теплоотводы поддерживаются внутри криостата на термоизолированных стойках, удерживающих матрицу в фокусе рентгеновского телескопа. Кроме того, криостат обеспечивает пассивную защиту ПЗС-матрицы от радиации на орбите. На структуре криостата смонтировано колесо фильтров, позволяющее блокировать нежелательный свет, и калибровочный радиоактивный источник.

*Таблица 3. Характеристики ПЗС-матрицы телескопа ДЖЕТ-X*

Параметр	Значение
Формат чипа (пикселей)	1024×768
Формат изображения на чипе	512×768
Размер пикселя	27×27 мкм <sup>2</sup> 1.65"×1.65"
Поле зрения	27'×20'
Активная толщина (эпитаксиальный слой)	65 мкм
Глубина истощения	38 мкм
Выходной коэффициент	~4мВ на электрон
Шум считывания	<4 e <sup>-</sup>
Скорость считывания на пиксель	12 мкс
Темновой ток при -80°С	0.004/пиксель/с
Время отображения кадра	2.5 с
Рабочая температура	180-190 К
Последовательные потери переноса заряда	<1×10 <sup>-5</sup> на пиксель
Параллельные потери переноса заряда	<1×10 <sup>-5</sup> на пиксель

### ***3.1 Расположение ПЗС в фокальной плоскости***

Каждая ПЗС-матрица имеет область накопления изображения площадью 768 пикселей в ширину на 512 пикселей в направлении считывания и область переноса кадра такого же размера. Область переноса кадра затенена от неба и служит в качестве двойного буфера для сокращения мертвого времени изображающей области. На рис.6 изображена компоновка детекторов (вид с передней стороны ПЗС) с заштрихованными областями переноса. Центры полей зрения обоих рентгеновских телескопов (XRT) указаны крестиком. Они должны быть установлены соосно.

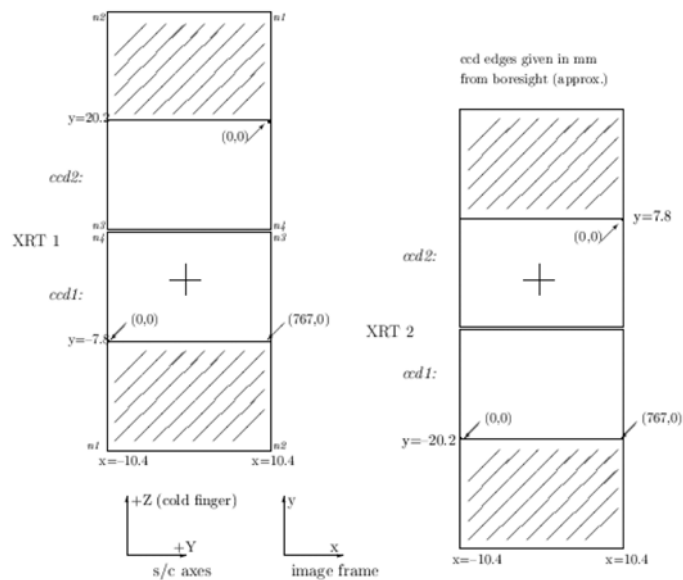


Рис. 6. Расположение ПЗС-матриц в фокальной плоскости. Детекторы показаны сверху; чтобы перевести изображение на плоскость неба, надо посмотреть с обратной стороны и повернуть на  $180^\circ$  относительно осей космического аппарата.

Из рисунка также видно, что два телескопа не будут смотреть точно в одну и ту же область неба. Только две матрицы в центре поля зрения, помеченные крестиком, будут направлены на один и тот же участок, тогда как остальные две будут видеть разные части. Такое расположение осей телескопа было выбрано специально, чтобы избежать разрыва в изображении на стыке двух ПЗС. Полное поле зрения двух детекторов каждого телескопа будет  $27' \times 20'$ . Суммарное поле зрения обоих телескопов составит около  $40' \times 20'$  с общей площадью перекрытия  $13.5' \times 20'$ .

### 3.2 Линейность ПЗС и коэффициент усиления

Линейность ПЗС была определена (с точностью лучше 0.02%) по отклонениям от наилучшего приближения величин измеренных энергий линий с центрами в диапазоне от 523 до 8040 эВ. Никаких систематических вариаций не обнаружено.

Точное значение коэффициента усиления было получено на ускорителе PANTER в диапазоне энергий от 0.3 до 9.8 кэВ. Измеренное значение коэффициента составило 3.715 эВ, отклонение в нуле 0.12 канала. Разности измеренных значений составляют менее 7 эВ и в основном вызваны смешиванием избранных линий с соседними, точность калибровки в полете должна составить  $\leq 4$  эВ. Эволюция коэффициента со временем будет отслеживаться бортовым рентгеновским источником  $^{55}\text{Fe}$ .

### 3.3 Квантовая эффективность

Квантовая эффективность ПЗС по отношению к разным классам событий (один пиксель, два соседних пикселя и т.д., см. ниже) определена для различных энергий. Кривая эффективности была построена по данным синхротрона в Дарсбери и ускорителя PANTER, а также численного моделирования. Особое внимание было уделено изучению тонких структур рентгеновского поглощения вблизи краев линий N, O и Si. Необходимость уточнения этих структур стала ясна после измерений спутника ASCA, которые показали наличие мелких особенностей в спектрах, которые не могли быть объяснены поведением источников. На рис.7 показаны квантовые эффективности как для одинопиксельных фотонов, так и для событий, просуммированных по нескольким пикселям, вплоть до 4. Сплошные линии представляют собой результат моделирования

методом Монте-Карло. Статистические неопределенности отдельных измерений менее 1%, и на основании разностей можно оценить систематические погрешности на уровне 3%. Также были проведены измерения для оценки пространственных вариаций квантовой эффективности, показавшие разброс на уровне 1.5%.

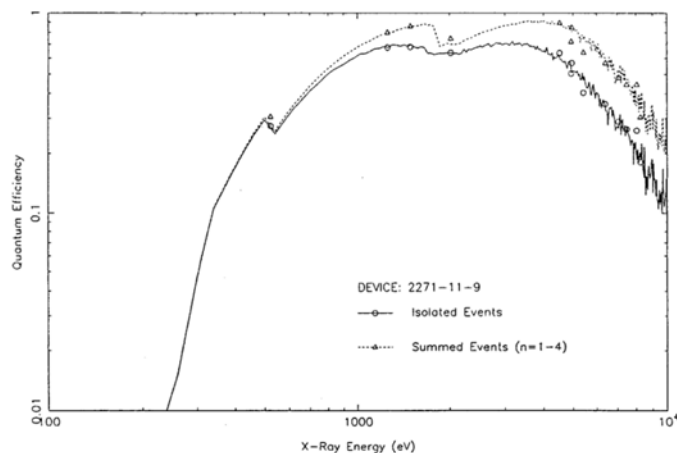


Рис. 7. Измеренная квантовая эффективность ПЗС для однопиксельных (изолированных) событий и суммы по событиям в 1, 2, 3 и 4 пикселях. Характерная погрешность точек с данными ~4%. Линии показывают теоретический отклик на события каждого типа, полученный моделированием Монте-Карло.

### 3.4 Бортовой калибровочный источник

В колесе фильтров каждого рентгеновского телескопа имеется по одному радиоактивному источнику  $^{55}\text{Fe}$ . Эти источники дают линии с энергиями 1.5, 5.9 и 6.4 кэВ и будут периодически по команде вводиться в поле зрения. Линии будут использоваться для проверки шкалы энергий, квантовой эффективности, спектрального разрешения и определения радиационного износа ПЗС путем измерения эффективности переноса заряда.

### 3.5 Отбор и классификация событий

Система электроники сканирует каждый кадр данных ПЗС и отбирает события с выделившейся энергией между заданными нижним и верхним пределами. После этого отбираются только события, связанные с одним пикселем или с двумя или более соседними пикселями. В режиме тайминга (см. ниже) учитывается соседство только в направлении ряда. Для многопиксельного события назначаются координаты пикселя, найденного первым (т.е. ближайшего к окну считывания). Класс события присваивается следующим образом:

**Класс 1** - однопиксельные события. Поскольку в этом случае весь заряд сосредоточен в одном пикселе, такие события дают наилучшее энергетическое разрешение. Кроме того, поскольку фоновые события обычно расщепляются на несколько пикселей, то события класса 1 наименее подвержены фоновому загрязнению. Они будут использоваться для детальных спектроскопических исследований. Для каждого события класса 1 хранятся координаты X и Y, а также энергия пикселя. Пиксели, примыкающие друг к другу по углам, классифицируются как отдельные однопиксельные события.

**Класс 2** - двухпиксельные события. Это только те события, в которых два пикселя имеют общую сторону. Для каждого события класса 2 записываются координаты X и Y первого пикселя, полная энергия события, а также энергия во втором пикселе.

*Класс 3* - многопиксельные события (более двух пикселей). Это те события, в которых три или более пикселей имеют общую сторону. Для событий класса 3 записываются координаты X и Y первого пикселя, полная энергия события, а также количество пикселей.

*Класс 4* - на летной модели не используется.

*Класс 5* - другие события. К классу 5 относятся те события, суммарная энергия которых превышает максимальный установленный порог. Для каждого события класса 5 записываются координаты X и Y первого пикселя.

### **3.6 Режимы работы**

Существуют три режима работы ПЗС-матрицы. Каждая ПЗС-матрица может работать в своем режиме независимо от других. Различные комбинации основных режимов ПЗС-матрицы дают пять возможных режимов работы телескопа ДЖЕТ-Х (см. Таблица 4). Режимы ПЗС-матрицы следующие:

**Режим накопления изображения** (стандартный). Основная научная задача рентгеновских телескопов ДЖЕТ-Х - измерение спектров изображений в фокальных ПЗС-матрицах. Для этой цели ПЗС-матрицы используются в режиме переноса кадра, накопления изображения с полным спектральным разрешением. В этом режиме изображение накапливается в рабочей области матрицы (области, ближайšie к оптическим осям, см. рис.7) в течение 2.5 секунд. После этого изображение быстро (в течение примерно 6 мс) переносится в область хранения (заштрихованные зоны на рис.7). Затем, пока кадр в области хранения считывается, в рабочей области накапливается следующее изображение. Временное разрешение в режиме переноса кадра равно 2.5 с - время, необходимое для считывания изображения из области хранения. Максимальная скорость счета, с которой может работать ПЗС-матрица в этом режиме, определяется необходимостью избежания попадания двух событий в один пиксель в течение интервала накопления. На основании имеющихся калибровочных данных был принят критерий, согласно которому скорость счета не должна превышать 0.025 отсчетов на пиксель за время накопления, что дает предельный поток ~2 отсч/с на точечный источник и соответствует яркости источника около 2.5 мКраб.

**Режим яркого объекта.** Этот режим предусмотрен для возможности наблюдения источников с потоками на 1-2 порядка выше базового уровня 2.5 мКраб. В этом режиме на протяжении цикла в 2.5 с производится два переноса кадра длительностью по 6 мс. В первой фазе цикла длительностью  $T_1$  секунд изображение накапливается, переносится в область хранения кадра, а затем игнорируется. Во время второй фазы длительностью  $T_2$  секунд изображение накапливается, переносится в область хранения кадра и выдается как нормальное. Сумма  $T_1$  и  $T_2$  равна 2.5 секунды, а используемое отношение  $T_1/T_2$  может достигать 25, т.е. реальное время экспозиции будет не 2.5 с, а дробная часть до минимального значения 0.1 с каждые 2.5 с.

**Режим тайминга.** Этот режим предназначен для наблюдения ярких точечных источников. Одна ПЗС-матрица телескопа считывается непрерывно с высокой частотой. Информация о положении не сохраняется, но время событий записывается с точностью 24 мкс при полном энергетическом разрешении. Только один телескоп может находиться в режиме тайминга из-за ограничений на поток данных, но второй телескоп может продолжать работу в режиме накопления изображения.

Таблица 4. Режимы работы телескопа ДЖЕТ-Х.

Режим работы	Яркость источника (мКраб)	ХРТ1		ХРТ2	
		Режим ПЗС1	Время накопления изображения (с)	Режим ПЗС2	Время накопления изображения (с)
Слабый	<2.5	НИ	2.5	НИ	2.5
Средний	2.5<...<50	ЯО	2.5/T <sub>1</sub> /T <sub>2</sub>	НИ	2.5
Яркий	>50	НИ	2.5	НИ	2.5
Яркий	>50	ЯО	2.5/T <sub>1</sub> /T <sub>2</sub>	НИ	2.5
Яркий	>50	Т	2.5	НИ	2.5

НИ - накопление изображения, ЯО - яркий объект, Т - тайминг

### 3.7 Устройство фильтра

В рентгеновских телескопах обычно используют алюминиевые фильтры для блокировки света. Это имеет место в телескопе ДЖЕТ-Х, так как фокальные ПЗС-матрицы чувствительны к оптическому излучению. Дизайн фильтров ДЖЕТ-Х использует пластиковую лексановую пленку толщиной 2000 Å с нанесенным алюминиевым слоем. Кроме того, лексан уплотнен никелевой сеткой с пропусканием 75%. Толщина слоя алюминия в 1100Å была выбрана в качестве компромисса между пропусканием в оптике и в мягком рентгеновском диапазоне. Первоначальный дизайн предусматривал слои в 400 и 800Å (тонкий и толстый фильтры, соответственно), однако они страдали большими оптическими утечками из-за окисления алюминия. Более того, слой алюминия теперь нанесен только с одной стороны для уменьшения эффектов интерференции в оптике и сокращения уровней окисления.

Каждый телескоп снабжен колесом фильтров, которое во время нормального режима работы может быть переведено в одно из следующих состояний:

- Два толстых фильтра, 2000Å лексана и 1100Å алюминия;
- Открытое положение;
- Чистое положение.

В последнем положении используется шторка для защиты от протонов. Это стартовое положение по умолчанию. Кроме того, при нем калибровочный источник находится в поле зрения телескопа.

## 4. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

### 4.1 Научные задачи

Научная значимость прибора ДЖЕТ-Х определяется его высоким угловым и хорошим энергетическим разрешением, а также благоприятной орбитой обсерватории «Спектр-РГ» по сравнению с другими рентгеновскими проектами Chandra и XMM-Newton.

Низкий внутренний шум системы позволяет проводить длительные экспозиции при небольших потоках фотонов и получать предел чувствительности  $7 \times 10^{-15}$  эрг/см<sup>2</sup>/с (для одного телескопа и экспозиции 10<sup>5</sup> секунд). Два телескопа вместе обеспечивают проникающую способность в 10 раз чувствительнее, чем предел Глубокого Обзора обсерватории Einstein и эквивалентную пределу Глубокого Обзора обсерватории ROSAT.

При такой чувствительности не произойдет смешивания или путаницы источников (на уровне 40 фотонов), поскольку ДЖЕТ-Х достигнет углового разрешения лучше 20" во всем диапазоне энергий. Кроме того, высокое энергетическое разрешение делает ДЖЕТ-Х ценным прибором для изучения распределений температур в скоплениях галактик, обнаружения важной К-линии железа в активных галактиках, исследования свойств звезд в богатых рассеянных скоплениях и т.д.

Главная научная цель ДЖЕТ-Х - это изучение слабых и/или протяженных рентгеновских источников, а также богатых полей при помощи спектроскопии, построения изображения и временных профилей. Высокое разрешение оптической системы, малозумящие детекторы и 4-х суточная орбита - все это вместе подчеркивает большое значение длительных экспозиций телескопа ДЖЕТ-Х.

Ключевыми научными задачами телескопа ДЖЕТ-Х являются:

**Глубокие области.** Прямые измерения отсчетов источника на уровне, соответствующем  $\sim 0.5$  потока рентгеновского фона, и, следовательно, определение основной составляющей (составляющих) фона в диапазоне 2-10 кэВ (и, возможно, открытие совсем нового класса слабосветящихся, сильно эволюционирующих источников);

**Средние области.** Широкополосная спектроскопия многих рентгеновских источников, обнаруженных в ходе обзора ROSAT, и получение информации о возможном изменении рентгеновского излучения и поглощения в активных галактических ядрах (AGN) и т.д.;

**Спектры протяженных источников.** Построение изображений и спектроскопия богатых скоплений, эллиптических галактик, остатков вспышек сверхновых звезд (SNR) и т.п. с целью определения их температуры, плотности и обилия химических элементов - следовательно, их массы и направления эволюции;

**Наблюдения ярких источников.** Изучение, в частности, переменности потоков и спектров, а, следовательно, и геометрии индивидуальных особенностей излучения и поглощения.

В Таблице 5 представлены сравнительные характеристики нынешних и будущих рентгеновских проектов для оценки ключевых возможностей телескопа ДЖЕТ-Х.

Таблица 5. Текущие и будущие рентгеновские миссии (кроме мониторов всего неба)

Прибор	Диапазон энергий (кэВ)	Ширина на половине высоты (HEW)	Эффективная площадь (см <sup>2</sup> )	Энергетическое разрешение ( $\Delta E/E$ )
<b>ROSAT</b>				
PSPC	0.1-2.4	$\sim 25''$	220 на 1.5 кэВ	43% на 0.9 кэВ
HRI	0.1-2.4	$\sim 1.7''$	95 на 1.2 кэВ	
<b>ASCA</b>				
GIS	0.7-10	$\sim 3'$	300 на 2 кэВ	7% на 7 кэВ
SIS	0.5-10	$\sim 3'$	280 на 2 кэВ	2% на 7 кэВ
<b>SAX</b>				
LECS	0.1-10	$\sim 3.5'$	56 на 2 кэВ	8% на 6 кэВ
MECS	1.3-10	$\sim 1.2''$	150 на 6 кэВ	8% на 6 кэВ
PDS	15-300	коллиматор	500 на 60 кэВ	15% на 60 кэВ

<b>HPGSPC</b>	4-120	коллиматор	240 на 60 кэВ	4% на 60 кэВ
<b>XTE</b>				
PCA	2-60	коллиматор	7000 на 10 кэВ	18% на 6 кэВ
HEXTE	15-250	коллиматор	700 на 30 кэВ	15% на 60 кэВ
<b>JET-X</b>	0.3-10	$\leq 20''$	200 на 1.5 кэВ	2% на 7 кэВ
<b>SODART</b>				
LEPC	0.2-8	$\leq 3'$	2200 на 2 кэВ	13% на 6 кэВ
HEPC	2-25	$\leq 3'$	1800 на 8 кэВ	13% на 6 кэВ
SIXA	0.5-20	$\leq 3'$	1030 на 8 кэВ	3% на 6 кэВ
<b>MART-LIME</b>	5-150	$\sim 9'$	1500 на 20 кэВ	5% на $>35$ кэВ
<b>ABRIXAS</b>	0.5-10 кэВ	$\sim 3''$	50 на 2 кэВ	2% на 6 кэВ
<b>XMM (EPIC)</b>	0.1-20	$\leq 20''$	2450 на 6 кэВ	2% на 6 кэВ
<b>AXAF</b>				
ACIS	0.2-10	$\sim 1''$	650 на 1 кэВ	2% на 6 кэВ
HRC	0.1-10	$\sim 1''$	300 на 1 кэВ	
<b>ASTRO-E</b>				
XRS	0.5-10	$\sim 2'$	400 на 6 кэВ	$\sim 0.2\%$
XIS	0.4-10	$\sim 2'$	400 на 6 кэВ	$\sim 1.5\%$
HXD	10-700		350 на 50 кэВ	7% на 1 МэВ
<b>INTEGRAL</b>				
IBIS	15-10000	$\sim 12'$	$\sim 3100$	7% на 100 кэВ
SPI	20-8000	$\sim 2^\circ$	$\sim 500$	0.2% на 1 МэВ
JEM-X	3-35	$\sim 3'$	$\sim 1000$	15% на 10 кэВ

#### **4.2 Эффективная площадь**

Эффективная площадь телескопа ДЖЕТ-X определяется свойствами зеркал (см. раздел 2.1), квантовой эффективностью ПЗС-матрицей (см. раздел 3.3) и фильтром (см. раздел 3.7). Кривая эффективной площади изображена на Рис.8.

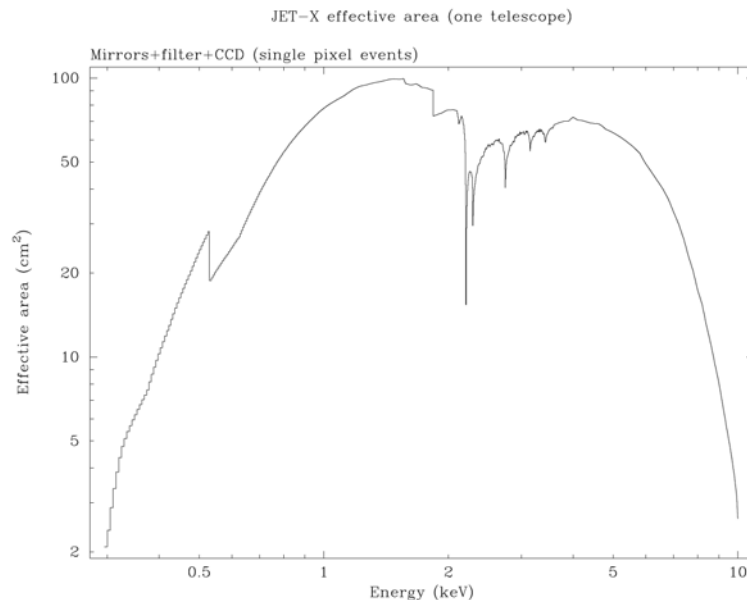


Рис.8. Эффективная площадь телескопа ДЖЕТ-Х, полученная сверткой функций отклика зеркал, фильтра и ПЗС-матрицы для одного телескопа. Приведена площадь для одной зеркальной системы и только для однопиксельных событий. С учетом событий всех классов (см. Рис.7) достигается большая площадь.

### 4.3 Энергетическое разрешение

Зависимость энергетического разрешения ПЗС-матрицы (полная ширина на половине высоты) от энергии описывается наилучшим аналитическим приближением:

$$\Delta E = a_1 \times (1 + a_2 \times E)^{1/2}, \text{ эВ}$$

где  $a_1 = 35.46 \pm 1.3$  эВ и  $a_2 = (2.0885 \pm 0.2) \times 10^{-3}$  эВ<sup>-1</sup>. Как и следовало ожидать, на низких энергиях разница между однопиксельными и всеми (1+...+n) событиями невелика (<0.5%). На этих энергиях практически все события сосредоточены в одном пикселе. Однако на более высоких энергиях ( $\geq 5$  кэВ) наблюдается подъем ширины на  $\sim 1\%$  с увеличением числа пикселей в событии. Более того, обнаружено, что  $a_1$  и  $a_2$  сами являются (слабыми) линейными функциями от числа пикселей.

### 4.4 Пространственное разрешение

Два источника считаются разрешенными, когда угловое расстояние между ними больше или равно ширине на половине высоты HEW (см. также Рис.5). Однако отклик на источник вне оси поля зрения имеет достаточно сложный вид на всех энергиях (в форме крыльев бабочки) из-за особенностей конструкции зеркальной системы. Такой отклик удобно описывать так называемым диаметром размытия (т.е. диаметром кружка, в котором содержится половина фотонов с центром, определенным гауссовым фитом, хотя фотоны распределены неравномерно на больших угловых расстояниях от центра поля зрения). Это показано на Рис.9 для энергий 1.5 и 8.1 кэВ. Вдоль оси величины HEW различаются, но на больших углах отклонения они становятся сравнимыми из-за того, что вклад геометрии зеркал даже на 8.1 кэВ преобладает над рассеянием.



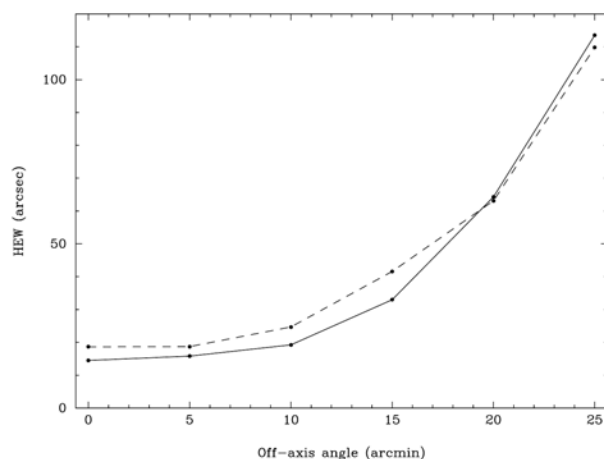


Рис. 9. Измеренный диаметр размытия как функция угла отклонения от оси на энергиях 1.5 кэВ (сплошная линия) и 8.1 кэВ (пунктирная линия).

#### 4.5 Фоновые условия

Основной вклад в фон телескопа ДЖЕТ-Х до режекции вносят заряженные частицы. Ожидаемая плотность потока составит 2-4 частицы/см<sup>2</sup>/с в зависимости от солнечной активности. Суммарный поток космических лучей выше энергии 0.3 кэВ на 2 ПЗС-матрицах одной зеркальной системы составит 13.3 частиц/с. Однако благодаря исключительно высокой эффективности режекции космических лучей поток в результате снизится до 0.002 частиц/с на 2 ПЗС с обрезанием двухпиксельных событий (см. Таблица 6). Таким образом, главной составляющей эффективного (т.е. не отсеянного) фона ДЖЕТ-Х оказывается диффузное внегалактическое излучение. Ожидается, что суммарная фоновая составляющая на 2 ПЗС будет ниже 0.13 отсч/с (для сравнения, источник Краб должен давать скорость счета около 500 отсч/с).

Таблица 6. Составляющие фона ДЖЕТ-Х для 2 ПЗС.

Заряженные частицы (0.3-10 кэВ)	0.002 отсч/с
Диффузный рентгеновский фон: галактический	0.016 отсч/с
Диффузный рентгеновский фон: внегалактический	0.057 отсч/с
Фон местного происхождения	<0.057 отсч/с
Излучение структуры (солнечный минимум)	0.001 отсч/с
Солнечный максимум + средняя активность	0.064 отсч/с
Рассеяние космического диффузного фона	<0.001 отсч/с
<b>ПОЛНЫЙ фон в диапазоне 0.3-10 кэВ</b>	<b>&lt;0.198 отсч/с</b>
<b>ПОЛНЫЙ фон в диапазоне 0.3-10 кэВ – оценка</b>	<b>0.13 отсч/с</b>

#### 4.6 Минимальная скорость счета

Минимальная скорость счета, регистрируемая детектором, зависит от интенсивности фона и размера ячейки, необходимой для набора отсчетов от точечного источника. Предельная скорость счета в зависимости от времени экспозиции может быть определена по формуле:

$$I_{\min} = t^{-1/2} (N_{\sigma}^2 B_{\text{cell}} / f^2 + N_{\min}^2 / t)^{1/2}$$

где  $N_\sigma$  - требуемый порог значимости,  $B_{\text{cell}}$  - фоновая скорость счета в «ячейке детектирования»,  $f$  - доля полного потока от источника, заключенная в «ячейке детектирования»,  $N_{\text{min}}$  - минимальное число фотонов для детектирования и  $t$  - время накопления изображения.

Функция отклика телескопа ДЖЕТ-Х зависит от энергии (см. раздел 2.2), и, следовательно, от спектра наблюдаемого источника, а также от положения источника в поле зрения. В расчетах, показанных на Рис.10, предполагалась круговая область детектирования радиусом 30", соответствующая более 80% фотонов от источника вдоль оси на 8 кэВ, уровень значимости детектирования  $5\sigma$  и минимальное количество фотонов на источник, равное 10. Для фона в диапазоне 0.3-10 кэВ принято значение 0.13 отсч/с на весь детектор (2 ПЗС, 20'×27'). Как видно из Рис.10, фон начинает накладывать ограничения при длине экспозиции ~10 кс. Для источников вне оси поля зрения необходимо использовать большие ячейки детектирования и, следовательно, большие значения фона.

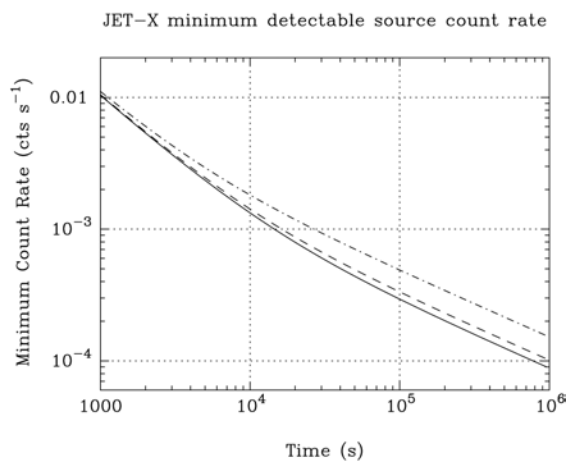


Рис.10. Минимальная регистрируемая телескопом ДЖЕТ-Х скорость счета источника в зависимости от длительности экспозиции. Сплошная линия соответствует номинальному уровню фона (см. раздел 4.6). Штрих-пунктирная линия соответствует фону, возросшему на 30% из-за вклада паразитных отражений. Штриховая линия соответствует тройному возрастанию фона.

#### 4.7 Чувствительность к спектральным линиям и переменности источников

Чувствительность телескопа ДЖЕТ-Х к эмиссионным линиям была вычислена по линии железа  $K_\alpha$  с энергией 6.4 кэВ при разных мощностях непрерывного спектра и длительности наблюдений  $10^4$  и  $10^5$  секунд (см. Рис.11). Чувствительность прибора к линии,  $I_L$ , может быть выражена как:

$$I_L = K_\sigma / A(E) \cdot F(\Delta E) \times [(\Delta E \cdot I_C(E) \cdot A(E) + B_{\text{cell}}) / t]^{1/2} + N_{\text{min}} / A(E) \cdot t$$

где  $A(E)$  - эффективная площадь на энергии  $E$ ,  $F(\Delta E)$  - доля фотонов линии, попадающих на элемент разрешения (принята равной 0.67),  $I_C$  - поток непрерывного спектра на энергии линии в единицах фот см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> кэВ<sup>-1</sup>,  $B_{\text{cell}}$  - фоновая скорость счета в отсч/с на ячейку детектирования,  $\Delta E$  - энергетическое разрешение на энергии  $E$  в кэВ,  $K_\sigma$  - значимость в случае ограничения со стороны фона (взято значение 5) и  $N_{\text{min}}$  - минимальное количество фотонов, необходимое в случае ограничения, накладываемого фотонами (положено равным 10).

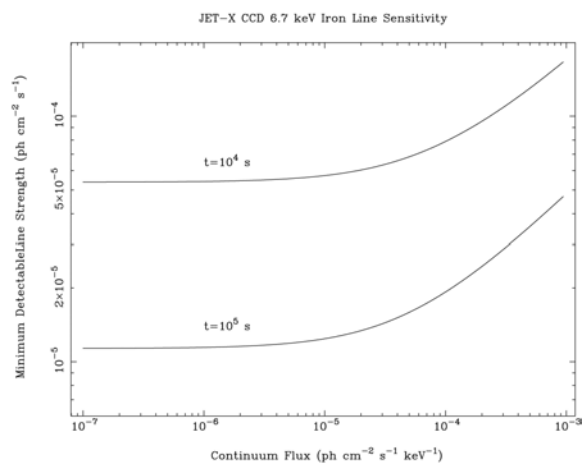


Рис. 11. Чувствительность телескопа ДЖЕТ-Х к линии железа 6.4 кэВ в зависимости от континуума для экспозиции  $10^4$  секунд (верхняя кривая) и  $10^5$  секунд (нижняя кривая).

Чувствительность телескопа ДЖЕТ-Х к переменности источника иллюстрирует Рис. . Он показывает время  $t$ , необходимое для регистрации изменений в потоке источника на  $X\%$  (т.е.  $X=0.4$  соответствует 40-процентному изменению потока), где  $S$  - скорость счета от источника,  $B$  - уровень фона и  $K_\sigma$  - требуемая значимость:

$$t = K_\sigma^2 (S + B + S \times X)^2$$

Таким образом, при скоростях счета источника и фона  $0.1 \times 10^{-4}$  и  $2 \times 10^{-4}$  отсч/с соответственно для детектирования 30% вариации потока источника с уровнем достоверности  $5\sigma$  потребуется около 4000 с (см. Рис.12).

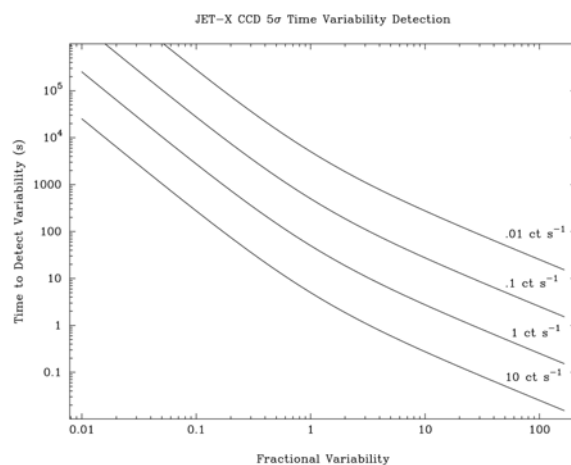


Рис. 12. Чувствительность телескопа ДЖЕТ-Х к переменности источника для скоростей счета 0.01, 0.1 и 1 отсч/с.

#### 4.8 Ожидаемые скорости счета

Ожидаемая скорость счета в телескопе ДЖЕТ-Х существенно зависит от спектра наблюдаемого источника. Она определяется сверткой спектра с эффективной площадью телескопа, которая является нетривиальной функцией энергии. Для оценки ожидаемой скорости счета приводятся кривые перевода потока в отсчеты (или фактор перевода энергии ECF) при разных значениях плотности межзвездного поглощения,  $N_H$ , и разных моделях спектров:

- степенной закон с фотонным индексом  $\alpha$ , см. Рис.13;
- тормозное излучение, где  $kT$  - температура в кэВ, см. Рис.14;

- Рэймонда-Смита, где  $kT$  - температура в кэВ: использовались две возможные величины металличности  $Z = Z_{\odot}$  и  $Z = 0.3 Z_{\odot}$ , см. Рис.15 и Рис.16;
- чернотельный, где  $kT$  - температура в кэВ, см. Рис.17.

Кривые, изображенные на этих рисунках, необходимо использовать следующим образом:

- Вычислить ожидаемый поток от источника  $F_S$  в единицах  $10^{-11}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  в диапазоне ДЖЕТ-Х 0.3-10 кэВ в отсутствие межзвездного поглощения;
- Определить ожидаемую плотность водорода на луче зрения;
- Выбрать спектральную модель и для найденного значения  $N_H$  определить по графику фактор перевода энергии ECF;
- Умножить  $F_S$  на ECF для определения ожидаемой скорости счета в одном телескопе ДЖЕТ-Х.

Пример:

Ядро активной галактики характеризуется степенным спектром с фотонным индексом 1.7 и потоком  $7.2 \times 10^{-11}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  (0.3-10 кэВ). Плотность межзвездного водорода в направлении на него  $N_H = 3 \times 10^{20} \text{см}^{-2}$ . Из Рис.13 находим фактор перевода  $\sim 0.18$ , так что ожидаемая скорость счета для одного телескопа будет  $0.18 \times 7.2 = 1.3$  отсч/с.

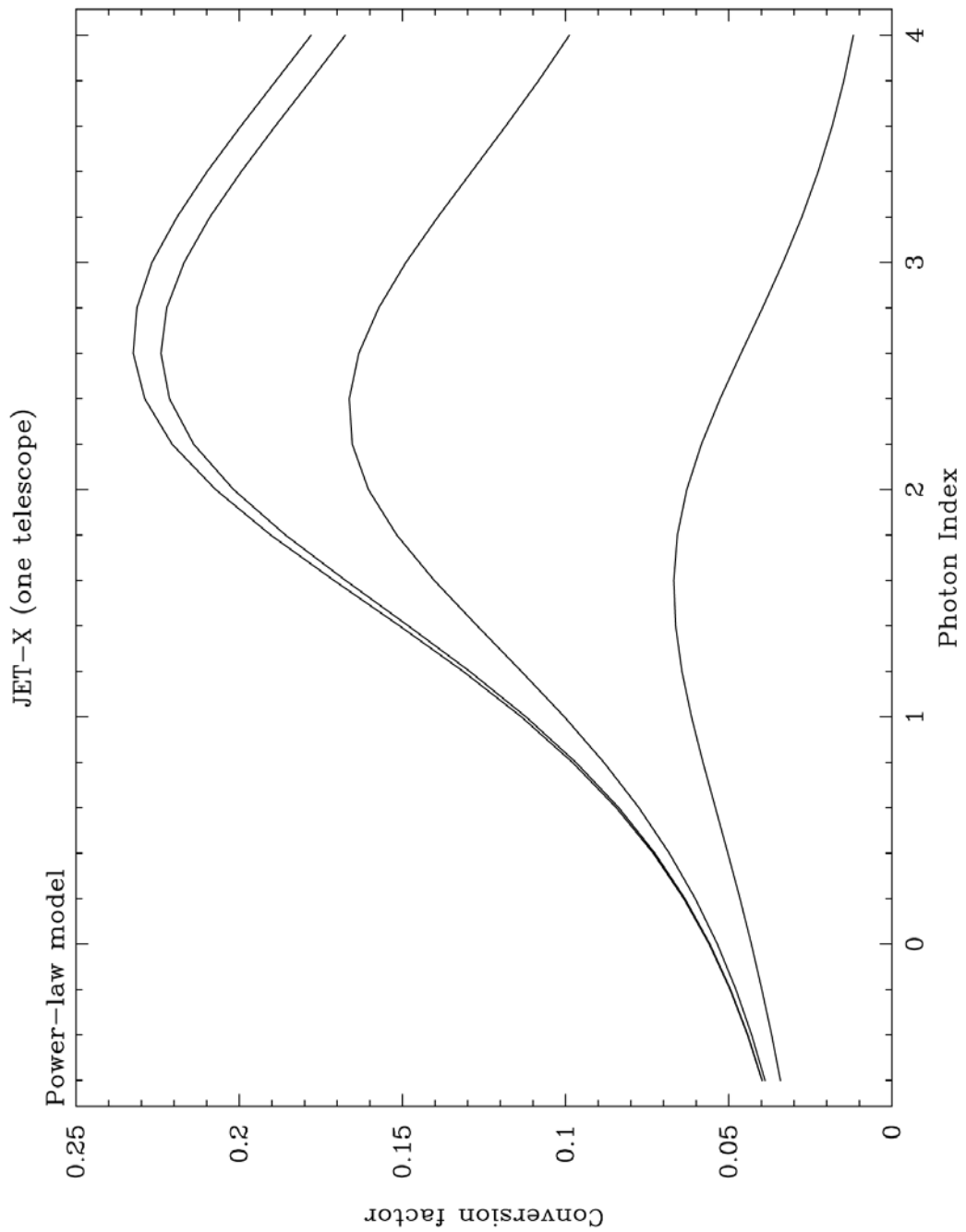


Рис.13. Фактор перевода энергии (ECF) в зависимости от степенного индекса для различных межзвездных поглощений:  $10^{19}$ ,  $10^{20}$ ,  $10^{21}$  и  $10^{22}$   $\text{см}^{-2}$  (сверху вниз).

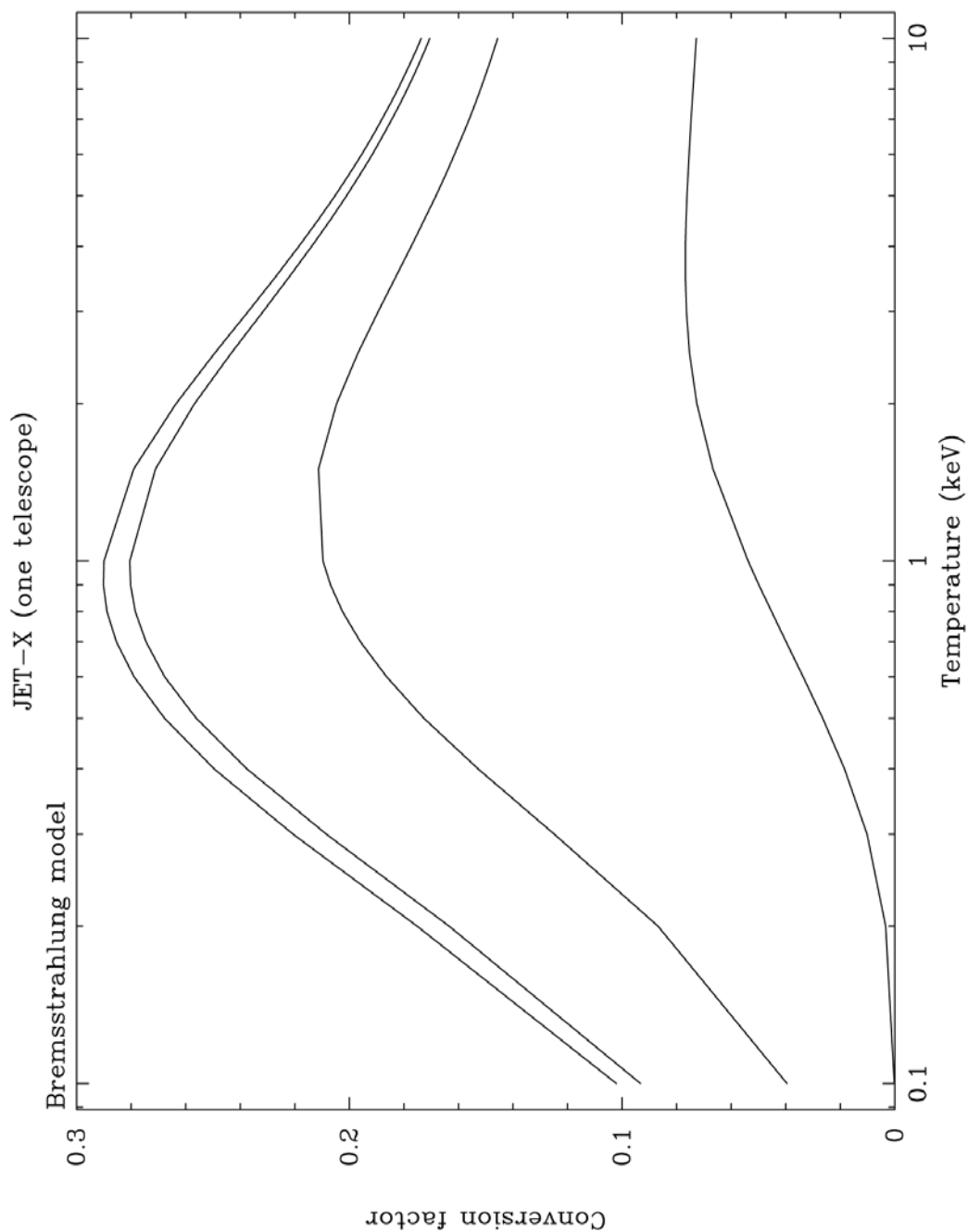


Рис.14. Фактор перевода энергии (ECF) в зависимости от температуры тормозного излучения для различных межзвездных поглощений:  $10^{19}$ ,  $10^{20}$ ,  $10^{21}$  и  $10^{22}$   $\text{см}^{-2}$  (сверху вниз).

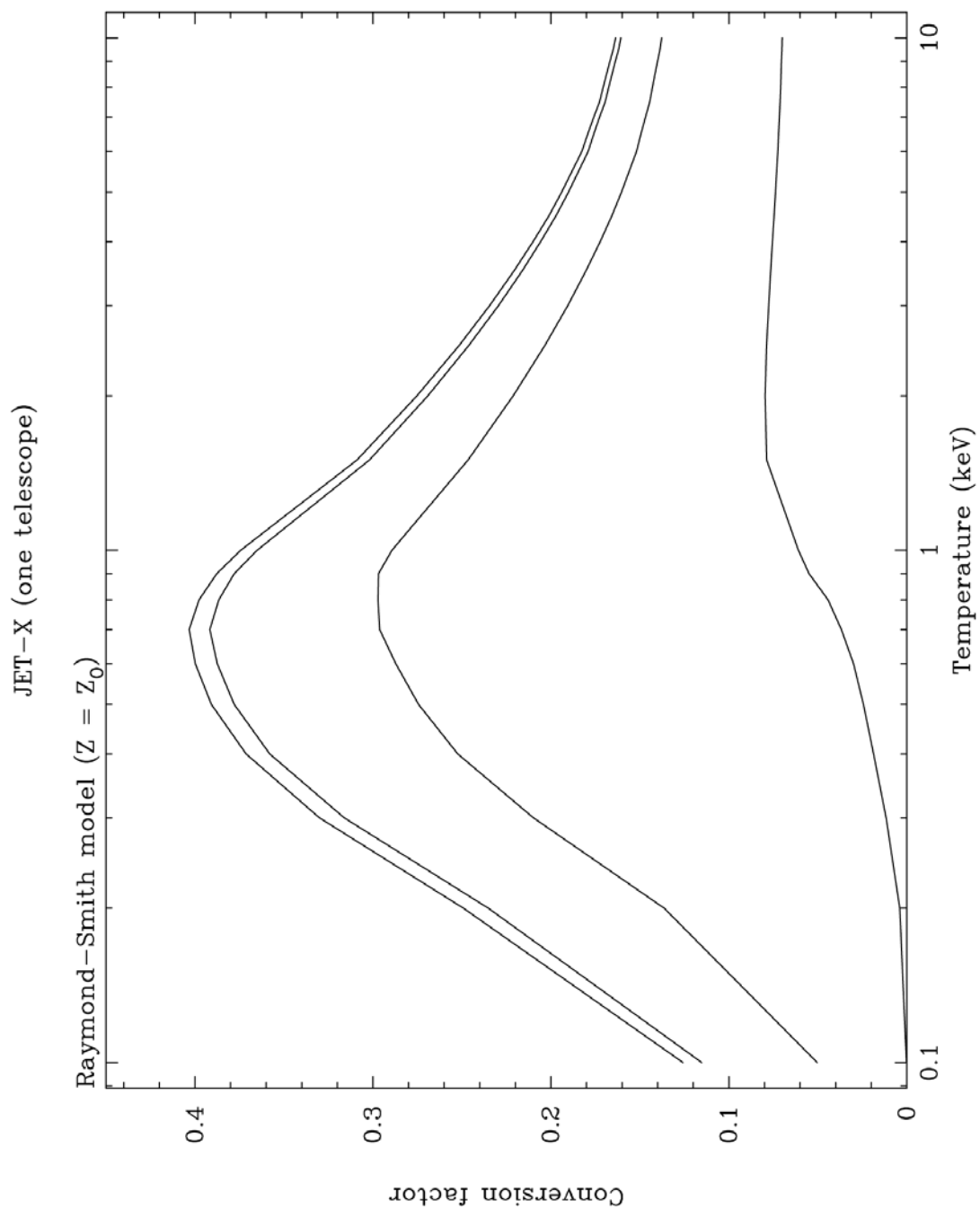


Рис.15. Фактор перевода энергии (ECF) в зависимости от температуры Рэймонда-Смита (в кэВ) в предположении солнечной металличности для различных межзвездных поглощений:  $10^{19}$ ,  $10^{20}$ ,  $10^{21}$  и  $10^{22}$   $\text{cm}^{-2}$  (сверху вниз).

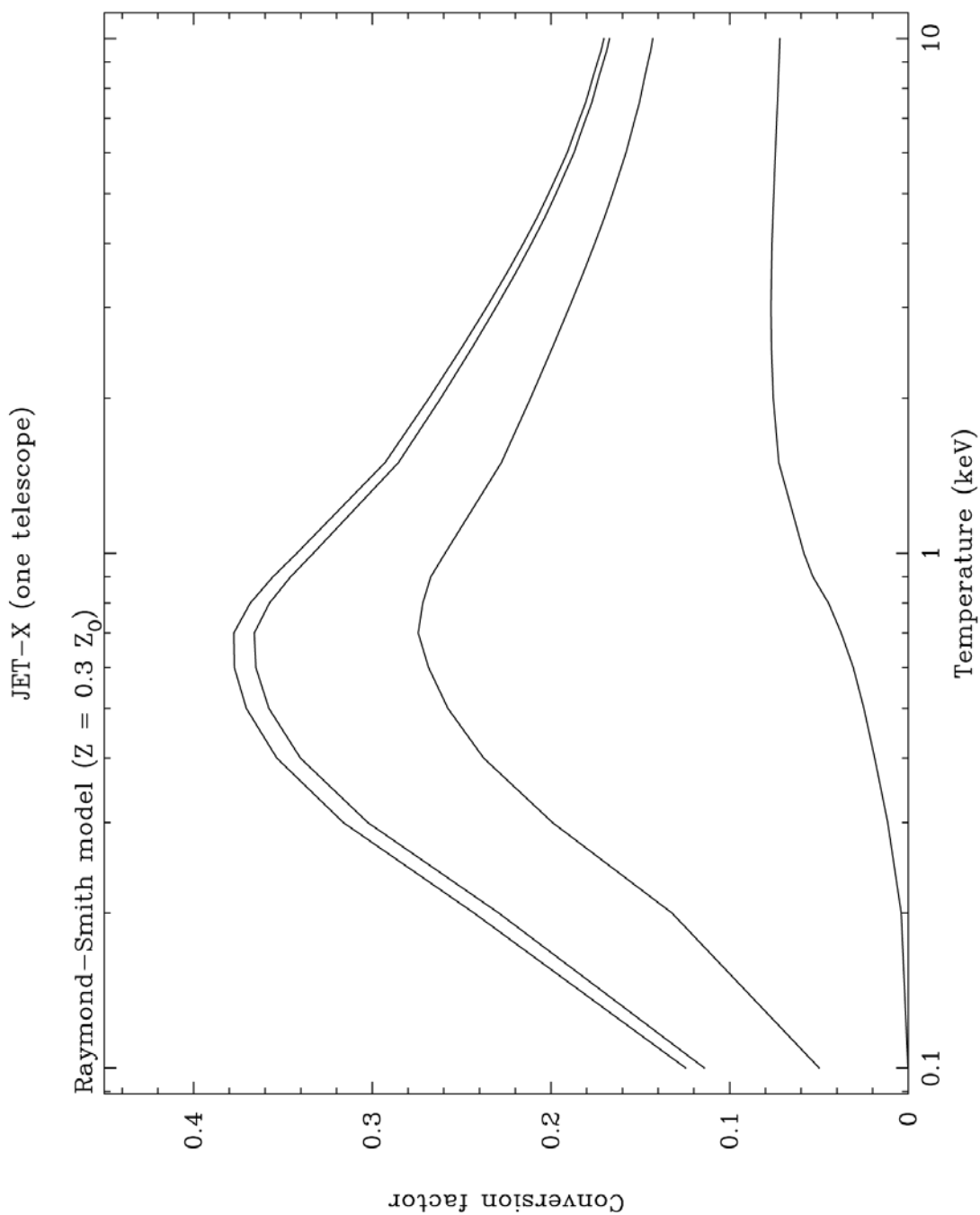


Рис.16. Фактор перевода энергии (ECF) в зависимости от температуры Рэймонда-Смита (в кэВ) в предположении металличности 0.3 солнечной для различных межзвездных поглощений:  $10^{19}$ ,  $10^{20}$ ,  $10^{21}$  и  $10^{22}$   $\text{см}^{-2}$  (сверху вниз).



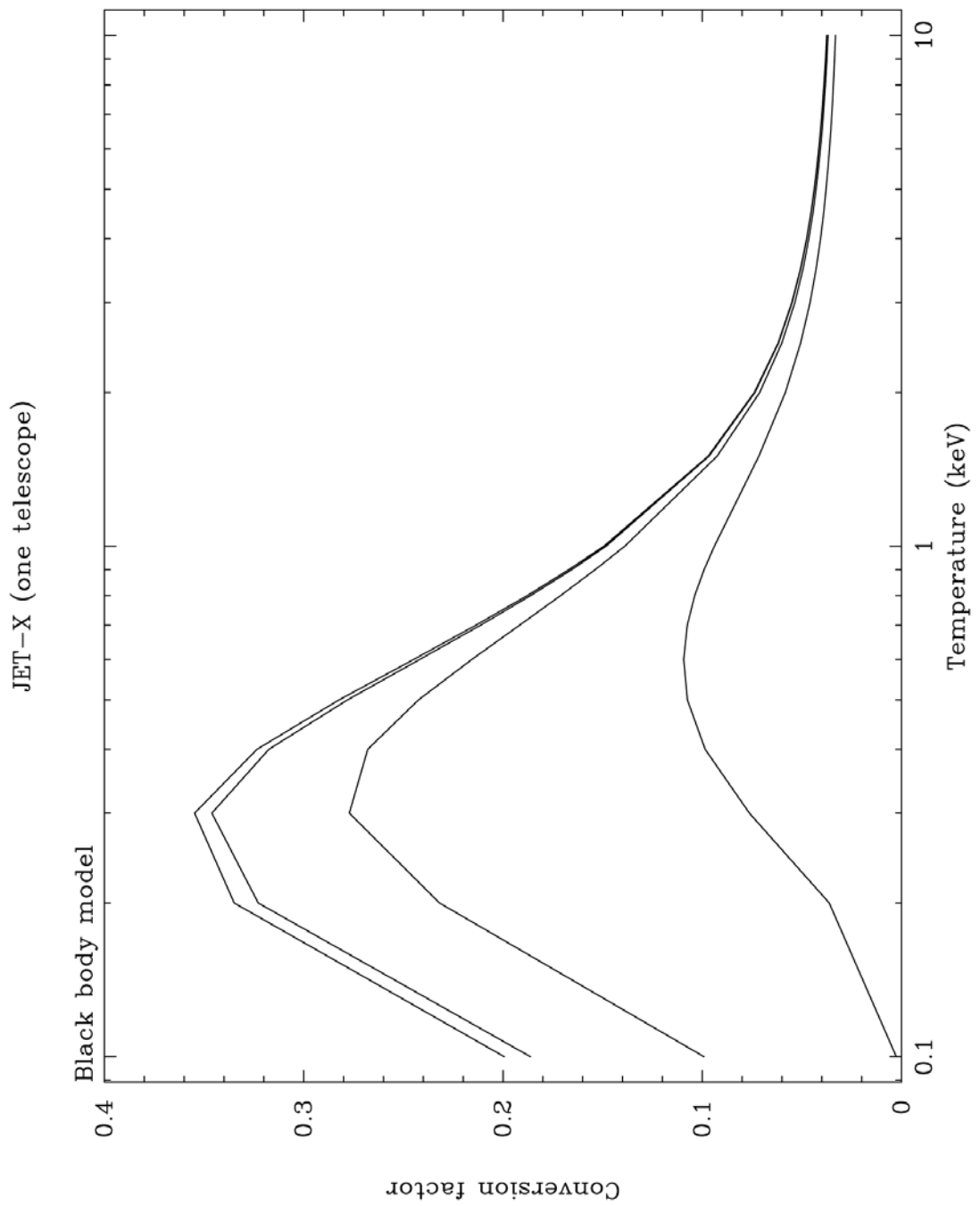


Рис.17. Фактор перевода энергии (ECF) в зависимости от температуры черного тела (в кэВ) для различных межзвездных поглощений:  $10^{19}$ ,  $10^{20}$ ,  $10^{21}$  и  $10^{22}$  см<sup>-2</sup> (сверху вниз).