ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 2, с. 118–141

\_ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, \_\_\_ МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК УДК 520.6.07

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСА ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА ART-XC АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ "СПЕКТР-РГ"

© 2020 г. М. Н. Павлинский<sup>*a*</sup>, А. Ю. Ткаченко<sup>*a*</sup>, В. В. Левин<sup>*a*</sup>, А. В. Кривченко<sup>*a*</sup>, А. А. Ротин<sup>*a*</sup>, М. В. Кузнецова<sup>*a*</sup>, И. Ю. Лапшов<sup>*a*</sup>, А. Н. Семена<sup>*a*</sup>, Н. П. Семена<sup>*a*,\*</sup>, Д. В. Сербинов<sup>*a*</sup>, Р. А. Кривонос<sup>*a*</sup>, А. Е. Штыковский<sup>*a*</sup>, А. Л. Яскович<sup>*a*</sup>, В. Н. Олейников<sup>*a*</sup>, И. А. Мереминский<sup>*a*</sup>, А. Г. Глушенко<sup>*a*</sup>, С. В. Мольков<sup>*a*</sup>, С. Ю. Сазонов<sup>*a*</sup>, В. А. Арефьев<sup>*a*</sup>

> <sup>а</sup> Институт космических исследований РАН Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32 \*e-mail: semena@iki.rssi.ru Поступила в редакцию 11.09.2019 г. После доработки 11.09.2019 г.

Принята к публикации 21.09.2019 г.

Представлены модели и результаты экспериментальных исследований характеристик новых для отечественного приборостроения объектов: рентгеновской зеркальной системы и стрипового полупроводникового детектора из CdTe, применяемых в первом российском зеркальном рентгеновском телескопе ART-XC. Данный телескоп входит в состав международной космической обсерватории "Спектр-РГ", которая в июле 2019 г. стартовала в точку либрации L2 в 2019 г.

DOI: 10.31857/S0032816220020056

# введение

В 2019 году началась работа международной астрофизической обсерватории "Спектр-Рентген-Гамма" [1], основной задачей которой является выполнение обзора всего неба в рентгеновском диапазоне длин волн. Ожидается, что этот обзор будет рекордным по чувствительности, угловому и энергетическому разрешению.

Космический аппарат "Спектр-РГ" включает два рентгеновских зеркальных телескопа — российский ART-XC [2] и немецкий eROSITA [3], которые установлены на российской космической платформе "Навигатор". Данные телескопы взаимно дополняют друг друга по диапазону энергий. Немецкий телескоп регистрирует рентгеновские фотоны в диапазоне энергий 0.3–10 кэВ, российский — в более жестком диапазоне 5–30 кэВ.

13 июля 2019 г. обсерватория была успешно запущена ракетой-носителем "Протон-М" с разгонным блоком ДМ-03 в окрестность точки либрации L2. Планируемая продолжительность миссии составляет 6.5 года.

ART-XC является абсолютно новым объектом для отечественного приборостроения. Это первый отечественный опыт использования зеркал косого падения и уникальных стриповых полупроводниковых детекторов российского производства.

Для корректной интерпретации научной информации, получаемой с телескопа ART-XC, необходимы достоверные модели основных параметров его детекторов и зеркальных систем. В данной статье представлены такие модели, сформированные на основании экспериментальных исследований характеристик рентгеновских зеркал и детекторов по отдельности и в комплексе.

#### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Телескоп ART-XC (Astronomical Roentgen Telescope — X-ray Concentrator) представляет собой 7 одинаковых соосных оптических модулей, каждый из которых содержит рентгеновскую зеркальную систему (р.з.с.), в фокусе которой размещен рентгеновский спектрометрический и координаточувствительный детектор, установленный в узел рентгеновского детектора (у.р.д., см. рис. 1).

Конструктивно все р.з.с. объединены в рентгеновскую оптическую систему *POC*, а все у.р.д. в комплекс рентгеновских детекторов *КРД*. *POC* и *КРД* совмещены посредством конического углепластикового корпуса. Поле зрения каждого де-



**Рис. 1.** Телескоп ART-XC и его основные элементы. *РОС* – рентгеновская оптическая система, *КРД* – комплекс рентгеновских детекторов.

тектора ограничено трехслойным (Al–Cu–Sn) коллиматором. Для калибровки детекторов в полете каждый детекторный блок оснащен выдвигающимся калибровочным рентгеновским источником из комбинации изотопов <sup>241</sup>Am и <sup>55</sup>Fe, который обеспечивает загрузку детектора на уровне ≤500 отсчетов/с с высоты ~7 см.

Объектами исследований являлись p.з.c., y.p.д., а также комплекс p.з.c.–y.p.д.

Р.з.с. представляет собой 28 коаксиальных зеркальных оболочек с профилем Wolter-I (парабола–гипербола) [4, 5], консольно вклеенных в несущий "паук" (см. рис. 2).

Материал оболочек р.з.с. — сплав кобальт—никель. Покрытие зеркальной поверхности — иридий, толщиной десятки нанометров, плотностью 90% от номинальной. По коэффициенту отражения рентгеновского излучения в диапазоне энергий до 25—30 кэВ иридий сопоставим с многослойными покрытиями и более предпочтителен по сравнению с золотом, начиная с энергии выше 10 кэВ. В Маршалловском космическом центре (MS-FC/NASA) было изготовлено 8 р.з.с., 7 из которых были установлены в летном образце телескопа ART-XC, 8-я получила статус запасной. В 2014 году все зеркальные системы прошли калибровку в MSFC/NASA [6].

Полупроводниковый рентгеновский детектор ART-XC (рис. 3) создан в Институте космических исследований (ИКИ) РАН. Основой детектора является кристалл CdTe размером 30 × 30 мм и толщиной 1 мм, изготовленный фирмой Acrorad специально для данного детектора [7].

Измерение координаты попадания фотона на поверхность детектора обеспечивают 48 параллельных токопроводов – стрипов на каждой стороне кристалла. Стрипы на двух сторонах взаимно перпендикулярны. Информация со стрипов каждой стороны кристалла считывается с помощью отдельной микросхемы ASIC (applicationspecific integrated circuit) VA64TA1 норвежской компании Ideas.

Рабочая площадь детектора составляет 28.56 × × 28.56 мм<sup>2</sup>, размер номинального пикселя изоб-



**Рис. 2.** Р.з.с. АRT-XC. **а** – оптическая схема Wolter I; **б** – общий вид р.з.с. *1* – зеркальные оболочки; *2* – "паук"; *3* – внешняя нагреваемая оболочка;  $Dfr_{28}$ ,  $Dfr_1$  – входная апертура соответственно внешней и внутренней оболочек;  $f_W$  – фокусное расстояние р.з.с.



**Рис. 3.** У.р.д. ART-XC. *1* – CdTe-детектор; *2* – детекторный узел; *3, 8, 9* – соответственно нижняя, средняя и верхняя электронные платы; *4* – основание у.р.д.; *5* – герметичный бокс; *6* – рентгенопрозрачное окно; *7* – корпус у.р.д.; *10* – крышка у.р.д.; *11* – входная апертура у.р.д.

ражения 595 × 595 мкм. Герметичный корпус кристалла детектора имеет входное окно из бериллия  $\emptyset$ 30.05 мм и толщиной 100 мкм. Геометрический центр кристалла в модуле у.р.д.29 смещен относительно центра входного отверстия на -0.11 мм по оси *X* и на -0.37 мм по оси *Y*. Рабочая зона детектора, расположенная под входным отверстием, имеет площадь 689.6 мм<sup>2</sup>, что соответ-

ствует телесному углу ~0.31 град<sup>2</sup> для пары р.з.с.<br/>– детектор.

В ходе создания телескопа ART-XC, в ИКИ РАН было собрано и испытано более 30 детекторных модулей, 7 из которых были установлены в летном образце телескопа.

Для испытаний комплекса p.з.c.–y.p.д. использовалась запасная p.з.c. с идентификатором MS6 совместно с детекторным модулем, имеющим номер у.р.д.29. Испытания проводились в течение года с октября 2016 по сентябрь 2017 г.

#### УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной экспериментальной установкой являлся наземный испытательный калибровочный стенд ИКИ РАН. В нем проводились исследования характеристик р.з.с. и у.р.д. по отдельности и при их взаимодействии. Кроме того, в статье использованы результаты калибровок р.з.с. на стенде MSFC/NASA.

Испытательный стенд позволяет в условиях вакуума сформировать квазипараллельный поток рентгеновских фотонов, направленный на объект исследования, и ориентировать объект с высокой точностью относительно направления этого потока.

Стенд состоит из двух основных частей: вакуумной камеры длиной 4 м и Ø1 м и состыкованной с ней вакуумируемой трубы длиной 60 м с переменным диаметром от 600 до 309 мм. Вакуумная камера находится в помещении класса ISO-8 и предназначена для размещения объекта исследований. Вакуумируемая труба обеспечивает коллимацию рентгеновского излучения от источника, установленного на ее конце.

В качестве источников рентгеновского излучения использовались сменные микрофокусные рентгеновские трубки фирмы Oxford Instruments с различными анодами, а также рентгеновская трубка Mini-X Ag фирмы Amptek. В испытаниях в основном использовались трубки с анодами из хрома, меди и молибдена. На рис. 4 показаны вакуумная камера, узел источника рентгеновского излучения, размещенный на краю вакуумируемой трубы, и объекты исследования — р.з.с. и у.р.д. внутри вакуумной камеры.

От рентгеновской трубки детектор размещался на расстоянии ~64 м, а р.з.с. на расстоянии ~61 м. Оба объекта устанавливались на гексаподах, обеспечивающих дистанционное управление их положением.

Поле зрения детектора ограничено коллиматором в виде трубы с внутренним диаметром 40 мм, в основании которого располагается блок калибровочного источника, позволяющий дистанционно вводить в поле зрения детектора источник <sup>241</sup>Am и <sup>55</sup>Fe. Температура детектора стабилизировалась в диапазоне  $-22 \pm 1^{\circ}$ C при помощи внешнего элемента Пельтье, охлаждаемого водой, температура которой поддерживалась в диапазоне 10–11°C.

Основой калибровочного стенда MSFC/NASA является труба длиной 103.3 м. При такой базе

фокусное расстояние р.з.с. составляет 2772.4 мм. В фокальной плоскости использовался детектор XR-100T-CdTe Amptek с размером кристалла  $5 \times 5$ мм, который мог перемещаться в фокальной плоскости по двум координатам. Для определения эффективной площади р.з.с. детектор XR-100T-CdTe передвигался последовательно с шагом 5 мм по двум координатам, полученные спектры по 9 (3 × 3) положениям суммировались, угловые размеры синтезированной детекторной площадки составляли ~18.6' × 18.6'. Этот подход применялся для определения эффективной площади р.з.с. для энергий <15 кэВ. На энергиях >15 кэВ детектор не передвигался, а выставлялся в фокус р.з.с. Эффективная площадь определялась по спектру, набранному в одном положении детектора, т.е. по плошалке 5  $\times$  5 мм<sup>2</sup> с угловыми размерами  $\sim$ 6.2'  $\times$  6.2'.

#### ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе проведенных исследований решались следующие задачи [8]:

 проводилось согласование модели и результатов калибровки эффективной площади рентгеновской оптической системы в комплексе с детектором;

 определялось энергетическое разрешение детектора;

– исследовалась зависимость от энергии величины W90 (диаметр зоны, куда попадает 90% событий двукратных отражений D2) и PSF (point spread function) в фокальной плоскости р.з.с.

# МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ Р.3.С.

Модельная эффективная площадь р.з.с. была получена методом трассировки лучей в программной среде IDL. Геометрическая модель учитывала зеркальные оболочки, "паук" с девятью ребрами, центральную диафрагму и внутреннюю бленду. Геометрия этих элементов считалась идеальной. Отражающая поверхность оболочек была задана 10-нм слоем иридия на никелевой основе с шероховатостью (RMS) поверхности 1 нм. Коэффициенты отражения были рассчитаны по уравнениям Френеля и модифицированы при помощи фактора Нево-Кросе [9] для учета шероховатости поверхности.

В расчетную модель были добавлены фильтры и конструкции, стоящие на пути излучения в реальном телескопе: майларовый фильтр с напыленным слоем алюминия перед входом в р.з.с., коллиматор детекторного модуля и кожух детектора с бериллиевым окном. Фотоны собирались с площадки Ø28.56 мм, соответствующей геометрическому размеру детектора ART-XC. Модели-



**Рис. 4.** Испытательный стенд и объекты исследования внутри него: **a** – вакуумная камера (вид снаружи), **б** – узел рентгеновской трубки, **в** – гексапод с р.з.с. внутри вакуумной камеры, **г** – гексапод с у.р.д. внутри вакуумной камеры. 1 – вакуумная камера; 2 – торцевой вход; 3 – боковой вход; 4 – источник рентгеновского излучения; 5 – край вакуумируемой трубы; 6 – шибер, отсоединяющий узел рентгеновской трубки от вакуумируемой трубы для снятия трубки; 7 – система вакуумирования узла рентгеновской трубки; 8 – р.з.с. ART-XC; 9 – детекторный блок ART-XC; 10 – коллиматор; 11 – образцовый детектор рентгеновского излучения Amptek XR-100SDD; 12 – блок калибровочного источника; 13, 14 – платформа для установки объектов калибровки; 15, 16 – гексаподы соответственно M850.V11 и M824.3VG для дистанционного позиционирования объекта калибровки; 17 – трубки системы охлаждения детектора.

рование проводилось для источника, расположенного на расстоянии 61 м от р.з.с. (соответствует размещению в экспериментальной установке) и удаленного в бесконечность (соответствует функционированию в космосе). Учитывались фотоны, испытавшие как двукратное (D2), так и однократное отражение (рис. 5).

Предварительным этапом согласования модели и эксперимента являлся анализ результатов калибровки р.з.с. на стенде MSFC/NASA (см. рис. 6).

Модельная эффективная площадь р.з.с. с майларовой пленкой толщиной 18.4  $\pm$  0.9 мкм со слоем алюминия 110  $\pm$  5 нм по оси зрения для источника, удаленного на бесконечность, для событий D2 до-

стигает  $\sim$ 73.4 см<sup>2</sup> на энергии 8 кэВ и  $\sim$ 13.0 см<sup>2</sup> на энергии 20 кэВ.

Проведенный анализ показал, что удовлетворительное согласие модели эффективной площади р.з.с. с экспериментальными данными было достигнуто только после введения коэффициента снижения эффективной площади 0.9 во всем диапазоне энергий [6]. Данный коэффициент был использован при дальнейшей калибровке.

На основном этапе проводились испытания р.з.с. и у.р.д. на калибровочном стенде ИКИ РАН. При этом использовался следующий алгоритм согласования модели эффективной площади р.з.с. с экспериментальными данными.



**Рис. 5.** Распределение по детектору событий с однократным отражением фотонов от р.з.с.: *1* – на энергии 8 кэВ для источника, удаленного в бесконечность; *2*, *3* – на энергии 8 и 29.5 кэВ для источника, расположенного на расстоянии 61 м.



**Рис. 6. а** – модельная эффективная площадь для источника: *1*, *2* – удаленного на бесконечность, *3*, *4* – расположенного на расстоянии 61 м (*1*, *3* – для двукратного отражения, *2*, *4* – для однократного); **6** – сравнение результатов калибровки р.з.с. на стенде MSFC/NASA с моделью (расстояние до источника 103.3 м, майларовая пленка не установлена, модель умножена на k = 0.9).

Спектр, получаемый при засветке детектора через р.з.с., может быть описан следующим аналитическим выражением:

$$Sp_{MS}(N) = \int RM_{y.p.a.}(N, E'')MS_{61}(E'') \times \left(\int Mylar(E'') \left(\int Filter_{A1}(E')Tube(E)dE\right)dE''\right)dE'',$$

где E — энергия фотонов, излучаемая рентгеновской трубкой; E' — энергия фотонов после прохождения алюминиевого фильтра; E'' — энергия фотонов после прохождения майларовой пленки; N — каналы детектора; Tube(E) — спектр рентгеновской трубки;  $Filter_{Al}(E')$  — функция или матрица пропускания алюминиевого фильтра; Mylar(E'') функция пропускания майларовой пленки;  $MS_{61}(E'')$  — эффективная площадь р.з.с. по оси зрения для двойных и однократных отражений для точечного источника, отнесенного на расстояние 61 м;  $RM_{y.p.n.}(N, E'')$  — матрица отклика детектора у.р.д.

Спектр прямой засветки детектора без р.з.с. имел следующий вид:

$$Sp_{y.p.n.}(N) = \int RM_{y.p.n.}(N, E'') \times \\ \times \left(\int Mylar(E'') \left(\int Filter_{Al}(E')Tube(E)dE\right) dE''\right) dE''.$$

При умножении спектра прямой засветки на корректную модельную функцию эффективной площади р.з.с. эти два спектра должны совпадать с определенной точностью, т.е.

$$Sp_{MS}(N) = Sp_{v,p,\pi}(N)MS'_{mod}(N).$$

Под модельной функцией эффективной площади р.з.с. понимается свертка площади р.з.с. с энергетическим разрешением у.р.д.:

$$MS'_{\rm mod}(N) = A(N) \int MS_{\rm mod}(N,E) e^{-0.5 \left(\frac{N-E}{\sigma_{\rm y.p.t.}(N)}\right)^2} dE,$$

где  $MS_{mod}(N, E) = 0.9 Mylar_{mes}(N) MS_{mod-61}(N, E);$  $MS_{mod-61}$  — модельная эффективная площадь р.з.с., полученная методом гау-tracing для однократных S1 и двукратных D2 отражений, для источника, удаленного на расстояние 61 м;  $Mylar_{mes}$  — измеренная функция пропускания майларовой пленки;  $\sigma_{y.p.d.} = FWHM/2.35482$  — стандартное отклонение в зависимости от энергии измеренного энергетического разрешения у.р.д.; A — коэффициент нормировки, который определяется выражением:

$$A(N) = \int e^{-0.5 \left(\frac{N-E}{\sigma_{\text{y.p.g.}}(N)}\right)^2} dE = 1.$$

Свертка используется для сглаживания скачков функции *MS*<sub>mod</sub> на L-краях спектра иридия.

Необходимо добавить, что спектры корректировались на мертвое время, геометрическую площадь, расстояние до источника и фон.

При засветке детектора через р.з.с. его загрузка ограничивалась уровнем 500 отсчетов/с с помощью алюминиевых фильтров и регулировки тока рентгеновской трубки.

При регистрации события в детекторе у.р.д. триггером служит сигнал с максимальной амплитудой в нижней плоскости. При этом и в нижней "электронной", и в верхней "дырочной" плоскостях амплитуда передается по стрипу с максимальной амплитудой и по двум соседним. Помимо этого передается время регистрации события. При превышении порога в двух или трех стрипах амплитуда сигналов складывается с учетом индивидуальной калибровки каждого стрипа. С ростом энергии доля событий с превышением порога в двух соседних стрипах возрастает. "Программный" нижний порог по энергии для нижней плоскости у.р.д. был установлен на уровне 2.7 кэВ, для верхней плоскости — 3 кэВ.

Для каждого события имеется информация об амплитуде по нижней и по верхней плоскостям, которая позволяет уточнить уровень энергии события с минимизацией дисперсии:

$$E^{*} = \frac{\sigma_{Top}^{2}}{\sigma_{Top}^{2} + \sigma_{Bot}^{2}} E_{Bot} + \frac{\sigma_{Bot}^{2}}{\sigma_{Top}^{2} + \sigma_{Bot}^{2}} E_{Top}$$



**Рис.** 7. Изображение при прямой засветке детектора, построенное с использованием моды с субпиксельным разрешением. *1* – граница бериллиевого окна; *2* – граница алюминиевой оправки бериллиевого окна.

где  $E_{Top}$ ,  $E_{Bot}$ ,  $\sigma_{Top}$ ,  $\sigma_{Bot}$  – энергии и стандартное отклонение по "дырочной" и "электронной" плоскостям соответственно.

Такой подход позволяет на 15–20% повысить энергетическое разрешение детектора. Помимо этого, события с превышением порога в двух соседних стрипах можно использовать для получения изображений с субпиксельным пространственным разрешением.

Изображение ( $384 \times 384$  пикселя) прямой засветки излучением рентгеновской трубкой с анодом из Cr детектора с расстояния 64 м в диапазоне 6—49 кэВ с экспериментально достигнутым субпиксельным разрешением 0.595/8 мкм, в 8 раз меньшим размера пикселя, показано на рис. 7.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА ПРИ ПРЯМОЙ ЗАСВЕТКЕ

Во время испытаний р.з.с. и у.р.д. проводилась индивидуальная калибровка всех стрипов детектора посредством прямой засветки штатным калибровочным источником ( $^{241}$ Am и  $^{55}$ Fe). Интегральное время калибровок в трех сериях составило ~ $1.66 \cdot 10^5$  с. Значимых изменений в калибровочных спектрах детектора зафиксировано не было. "Мертвое" время детектора у.р.д. было равно 0.77 мс.



**Рис. 8.** Энергетические спектры (**a**) и зависимость  $\Delta E(E)$  (**б**) штатных калибровочных источников, полученные с помощью у.р.д. и образцовых детекторов. Спектры: 1 -у.р.д., 2 -детектора XR-100T-CdTe, 3 -детектора XR-100SSD. Зависимость FWHM от энергии ( $\Delta E(E)$ ): 4 -у.р.д. в виде зависимости в диапазоне 16–60 кэВ; 5 -у.р.д. в виде полинома третей степени в диапазоне 3-60 кэВ с учетом разрешения на линии 5.9 кэВ; 6 -детектора XR-100T-CdTe; 7 -детектора XR-100SSD.



Рис. 9. Спектры дублетов линий Мо (a) и Ад (б) при прямой засветке у.р.д.

Суммарные энергетические спектры и энергетическое разрешение  $\Delta E$  (FWHM), полученные при прямой засветке у.р.д. и образцовых детекторов, представлены на рис. 8.

Интегральное время набора спектра SDD (Silicon drift detector) составило ~ $1.76 \times 106$  с, CdTe ~ $2.31 \times 106$  с. Спектры не нормированы друг относительно друга по вертикальной шкале. На рис. 8 видна насыщенность спектров различными линиями <sup>55</sup>Fe, <sup>237</sup>Np, <sup>241</sup>Am, пиками вылета на Cd и Te, флуоресцентными линиями Al, Ni, Cu и примесей Ag, In, Sn, Rb, Pu, Ba, Nd и др. Сравнение измерений у.р.д. и образцовыми детекторами показало, что на линии  $^{237}$ Np 13.945 кэВ разрешение XR-100T-CdTe в ~2.36 раза, а XR-100SDD в ~5.82 раза лучше, чем у у.р.д., которое составило ~1.16 кэВ.

Для более точной оценки энергетического разрешения у.р.д. в "среднем" диапазоне энергий использовались два дублета линий молибдена (17.479 и 17.374 кэВ) и линий серебра (22.162 и 21.99 кэВ) – см. рис. 9. Молибденовая трубка использовалась при напряжении 26 кВ в комплекте с Al-фильтром 448 мкм. Серебряная трубка Mini-X работала на просвет при напряжении 50 кВ.



**Рис. 10.** PSF на детекторе, засвечиваемом через р.з.с. рентгеновской трубкой с Cr-анодом: **a** – интегральное изображение, **б** – изображение, ограниченное 10% от максимума; 1 – окружность, ограничивающая площадь, по которой строился энергетический спектр детектора; 2 – условная граница, разделяющая зоны двукратных D2 и однократных S1 отражений.



**Рис. 11.** Интегральный спектр у.р.д. (а) и профили (б) относительной яркости пикселей детектора, засвечиваемого через р.з.с. рентгеновской трубкой с Cr-анодом.

# ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ КОМПЛЕКСА Р.З.С.–ДЕТЕКТОР

При калибровках комплекса р.з.с.-детектор проверялась зависимость величины W90 (диаметр зоны, куда попадает 90% событий двукратных отражений D2) от энергии. Для этого строилось изображение PSF (Point Spread Function) по оси зрения в линиях хрома (5.4 и 5.9 кэВ), меди

(8.04 и 8.9 кэВ), молибдена (17.4 кэВ) и серебра (22.1 кэВ). На более высоких энергиях использовалась полоса 28–32 кэВ в спектре континуума от трубки с анодом из хрома.

По полученной PSF строился профиль относительной поверхностной яркости пикселей в зависимости от радиуса круговой апертуры с центром в пикселе с максимальной яркостью. По



**Рис. 12.** Зависимость доли событий D2 от углового радиуса кружка при засветке детектора через р.з.с. рентгеновской трубкой с Cr-анодом.

профилю определялась условная граница событий двукратных D2 и однократных S1 отражений. После установления границы зоны D2 строилась зависимость доли событий от радиуса круговой апертуры, по которой уже определялись величины W90 и HPD (Half Power Diameter).

HPD зеркальной системы ART-XC меньше углового размера пикселя детектора. Следовательно, в измеряемом при помощи детектора у.р.д. значении HPD должна проявляться сильная зависимость от положения центра тяжести PSF относительно геометрического центра номинального пикселя детектора. Для такой комбинации измеряемая величина HPD может находиться в пределах  $(2-4)d/\pi^{1/2}$ , где d – угловой размер пикселя. При размере пикселя детектора у.р.д. ~43.45" × 43.45" НРD может изменяться в диапазоне от ~49" – при условии фокусировки PSF точно на центр пикселя, до ~98" – в случае фокусировки PSF на стык четырех пикселей. Поэтому полученные величины HPD могут сильно отличаться от реальных.

В отличие от HPD, величина W90 зеркальной системы ART-XC в ~5 раз больше углового размера пикселя детектора у.р.д. и, следовательно, почти не зависит от положения центра тяжести PSF относительно центра пикселя, т.е. при помощи детектора у.р.д. вполне можно измерять величину W90 и исследовать ее зависимость от энергии.

Необходимо отметить, что во время испытаний, которые продолжались год, несколько раз проводилась юстировка зеркальной системы и детектора. Координаты центра тяжести PSF для разных серий отличались друг от друга. В ходе многочасовых наборов суточный перепад темпе-



**Рис. 13.** Изображение PSF с увеличением  $10^{\times}$  на детекторе, засвечиваемом через р.з.с. рентгеновской трубкой с Сганодом: **a** – сглаженное изображение; **б** – не сглаженное изображение. *I* – W90, *2* – HPD, *3* – центр тяжести PSF, *4* – геометрический центр кристалла CdTe, *5* – центр номинального пикселя детектора.

Е, кэВ	Анод	<i>U</i> , кВ	<i>I</i> , мкА	Al-фильтр, мкм	<i>R</i> <sub>min</sub> , угл.сек	W90, угл.сек	HPD, угл.сек	$\Delta X$ , мкм	$\Delta Y$ , мкм
8	Cu	18	0.5	56	608	257	70	-52	+141
17.4	Mo	26	4	448	565	267	54	-22	—7
22.1	Ag	50	5	0	478	231	70	-30	+134
29.5	Cr	44	4	448	413	207	71	15	-171

Таблица 1. Параметры калибровки комплекса р.з.с.-у.р.д.

ратуры и вибрация влияли на стабильность положения центра тяжести PSF. Температурные колебания приводили к медленным по времени перемещениям фокусного пятна в пределах 5". Вибрация главным образом сказывалась на гексаподе M850.V11 с зеркальной системой, что проявлялось в виде редких спорадических смещений фокуса по вертикальной оси. Максимальная амплитуда таких перемещений могла достигать ~25". Однако такие перемещения можно было учитывать при анализе данных.

# КАЛИБРОВКА КОМПЛЕКСА Р.З.С.–У.Р.Д. НА ЛИНИИ 5.4 кэВ

При данной калибровке набирался спектр засветки детектора у.р.д. через р.з.с. на площади Ø28.56 мм от излучения рентгеновской трубки с хромом при напряжении 18 кВ через слой алюминия 28 мкм.

На рис. 10а и 10б построены соответственно интегральное и ограниченное 10% от максимума изображения PSF на детекторе в диапазоне энергий 4.2–6.8 кэB, в который попадают линии хро-



**Рис. 14.** Спектры при засветке детектора через р.з.с. рентгеновскими трубками с анодами из Cu (**a**), Mo (**б**), Ag (**b**), Cr (**r**). Выделены диапазоны, по которым строилась PSF.

**№** 2

2020



**Рис. 15.** Изображения PSF для выделенных диапазонов энергии при засветке детектора через р.з.с. рентгеновскими трубками с анодами из Cu (**a**), Mo (**б**), Ag (**b**), Cr (**r**). Штриховой линией выделена окружность, ограничивающая область W90.

ма 5.4 и 5.9 кэВ. По глубине используется цветовая логарифмическая шкала.

Энергетический спектр строился по событиям, полученным внутри круговой апертуры Ø 28.56 мм, ограниченной на рис. 10а окружностью (1), центр которой совпадал с геометрическим центром кристалла CdTe-детектора.

Условная граница круговой зоны, которая разделяет область двукратных D2 и однократных S1 отражений (2 на рис. 10б) имеет радиус ~8.33 мм или ~608". На этом радиусе профиль относительной поверхностной яркости пикселей проходит через точку перегиба. На изображении видно, что вдоль всего детектора через центр проходит яркая полоса, которая формируется из событий, сфокусированных в центр, но для которых ASIC не смог определить координату по верхней "дырочной" плоскости. Доля таких событий невелика (<1%). На изображении видны тени от 9 ребер "паука", в который вклеены оболочки р.з.с. На основании интегрального изображения определялись W90 и HPD.



**Рис. 16.** Профили относительной поверхностной яркости пикселей в зависимости от радиуса при засветке детектора через р.з.с. трубками с анодами из Cu (**a**), Mo (**б**), Ag (**b**), Cr (**г**).

Спектр детектора, полученный на площади, ограниченной окружностью (1) на рис. 10а, представлен на рис. 11а. На рис. 116 показан профиль относительной поверхностной яркости пикселей, полученный по PSF.

Если принять радиус точки перегиба 608" за край зоны событий с двукратным отражением D2, то можно построить зависимость доли событий от углового расстояния до центра изображе-

ния и определить по этим данным W90  $\approx$  212" и HPD  $\approx$  66" (см. рис. 12).

На рис. 13а и 13б показана центральная часть PSF с увеличением  $10^{\times}$ , соответственно сглаженная двумерным гауссовым окном с  $\sigma = 297.5$  мкм или 21.72" и не сглаженная.

Здесь же приведены полученные значения W90 (1), HPD (2), центр тяжести PSF (3), геометрический центр кристалла CdTe (4). Контуры

Анод	<i>U</i> , кВ	<i>I</i> , мкА	Al-фильтр, мкм	<i>Т</i> <sub>у.р.д.</sub> , мкс	<i>С</i> <sub>у.р.д.</sub> , отсчетов/с	<i>T<sub>MS</sub></i> , мкс	$C_{MS}$ , отсчетов/с	
Мо	18	1	28	95	70	88	394	
Мо	18	4	112	54	93	34	428	
Cr	26	4	224	55	95	47	293	
Cr	44	4	448	113	215	103	314	
Cu	9	3	0	58	43.3	67	286	

Таблица 2. Данные измерений при проверке эффективной площади р.з.с.





0 76 227 533 1137 2357 4770 9573 19269 38445 76629 0 20 60 140 299 620 1255 2518 5068 10112 20155 Отсчетов на пиксель



**Рис. 17.** Изображения PSF с увеличением  $10^{\times}$  при засветке детектора через р.з.с. трубками с анодами из Cu (**a**), Mo (**б**), Ag (**b**), Cr (**r**). *1* – W90, *2* – HPD.

W90 проведены по сглаженному изображению в линейном масштабе, начиная со значения 0.5 от максимума. Номинальный пиксель (5), куда попал центр тяжести PSF, имеет номер (24, 24). Центр тяжести PSF одинаково смещен приблизительно на –50 мкм по горизонтальной и по вертикальной координате относительно геометрического центра этого пикселя.

## КАЛИБРОВКА КОМПЛЕКСА Р.3.С.–У.Р.Д. НА ЭНЕРГИЯХ ОТ 8 ДО 29.5 кэВ

Калибровка комплекса р.з.с.–у.р.д. на энергиях >5.4 кэВ осуществлялась с помощью рентгеновских трубок с анодами из Cu, Mo, Ag, Cr.

В табл. 1 сведены данные по источникам излучения, материалу анода трубки, радиусу точки пе-



**Рис. 18.** Зависимость W90 от энергии для комплекса р.з.с.–у.р.д. при расстоянии до источника 61 м.

региба, W90, HPD и смещениям  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  центра тяжести PSF относительно геометрического центра номинального пикселя, куда попадает центр PSF в четырех диапазонах энергий, лежащих выше линии хрома 5.4 кэВ.

На рис. 14 показаны спектры, а на рис. 15 изображения PSF при засветке детектора через р.з.с. рентгеновскими трубками с анодами из меди, молибдена, серебра и хрома. Пики линий выделены в диапазоне 6.8–9.6 кэВ для меди, 16.2–18.4 кэВ для молибдена, 21–23 кэВ для серебра и одна полоса в диапазоне 28–32 кэВ по континууму в спектре от хрома.

Необходимо отметить, что на более высоких, по сравнению с линией хрома, энергиях, координата по верхней "дырочной" плоскости определяется для всех событий и более светлая вертикальная полоса уже нигде не просматривается.

Изображения PSF на рис. 15 ограничены на уровне 10% от максимума и сглажены двумерным гауссом в диапазонах энергии 6.8–9.6 кэВ (рис. 15а), 16.2–18.4 кэВ (15б), 21–23 кэВ (15в) и 28–32 кэВ (15г). Радиусы, соответствующие W90: ~8.33 мм (~608"), ~7.735 мм (~565"), ~6.545 мм (~478") и ~5.65 мм (~413").

На рис. 16 показаны профили относительной поверхностной яркости пикселей, полученный для всех четырех PSF. Точки перегиба находятся на радиусах ~608", ~565", ~478" и ~413" соответственно. Необходимо отметить, что с увеличением энергии фотонов радиус точки перегиба умень-



**Рис. 19.** Изображение на детекторе при прямой засветке (**a**) у.р.д. и засветке через р.з.с. (**б**) рентгеновской трубкой с анодом из Мо при напряжении 18 кВ, токе 1 мкА через алюминиевый фильтр 28 мкм: **a** – без р.з.с. в диапазоне энергий 4–18 кэВ в линейном масштабе; **б** – через р.з.с. в логарифмическом масштабе с ограничением 10% от максимума. Штриховой линией выделена окружность  $\emptyset$ 28.56 мм, или ~34.76', для расстояния до источника 61 м.



**Рис. 20.** Интегральные спектры (**a**–**B**) и их отношения (**r**) при прямой засветке у.р.д. и засветке через р.з.с. рентгеновской трубкой с анодом из Мо при напряжении 18 кВ, токе 1 мкА через алюминиевый фильтр 28 мкм: **a**, **б** – спектры в логарифмическом масштабе (**a**: *1* – при прямой засветке у.р.д. ( $Sp_{y,p,d}$ ), *2* – при засветке через р.з.с. в пределах диаметра 28.56 мм ( $Sp_{MS}$ ), штриховой линией показана кривая прозрачности по фотопоглощению фильтра; **б** – спектр прямой засветки детектора, умноженный на модельную эффективную площадь р.з.с. (*3* –  $Sp_{y.p.d}$ . $MS_{mod}$ , *4* –  $Sp_{pileup}$ )); **в** – спектры в линейном масштабе ( $5 - Sp_{MS}$ ,  $6 - Sp_{y.p.d}$ . $MS_{mod} + Sp_{pileup}$ ,  $7 - Sp_{y.p.d}$ . $MS'_{mod} + Sp_{pileup}$ , где  $MS'_{mod} - модель р.з.с.$ , свернутая с энергетическим разрешением у.р.д.); **г**:  $8 - Sp_{MS}/(Sp_{y.p.d}$ . $MS_{mod} + Sp_{pileup}$ ),  $9 - Sp_{MS}/(Sp_{y.p.d}$ . $MS'_{mod} + Sp_{pileup}$ ).

шается. При этом поверхностная яркость пикселей с однократными отражениями S1 возрастает.

На рис. 17 показаны изображения четырех PSF с увеличением  $10^{\times}$ , на которых обозначены W90 (*I*) и HPD (*2*).

Для энергетической линии молибдена центр тяжести PSF почти совпал с геометрическим центром пикселя. Сдвиги оказались минимальными, и величина HPD получилась близкой к нижнему предельному значению.

Несколько неожиданным результатом оказалось наличие зависимости величины W90 р.з.с. от энергии (см. рис. 18). Данная зависимость не была выявлена на более раннем этапе при испытаниях зеркальной системы на стенде в MSFC/NASA.

возможно, что этот результат может быть как-то связан с особенностями данной конкретной р.з.с. или конечным расстоянием 61 м до источника. ПРОВЕРКА МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ Р.З.С.

> Для проверки модели эффективной площади р.з.с. была проведена серия экспериментов, во время которых детектор засвечивался при помо-

Также явилось неожиданным, что величина

W90 оказалась минимальной и примерно равной на крайних энергиях 4.2–6.8 и 28–32 кэВ, а на ли-

нии молибдена максимальной. Следует отметить,

что в линии меди величина W90 ~ 257" оказалась

достаточно близкой к величине W90 ~ 249.2", полученной на стенде в MSFC/NASA [10]. Вполне



**Рис. 21.** Интегральные спектры (**a**–**B**) и их отношения (**r**) при прямой засветке у.р.д. рентгеновской трубкой с анодом из Мо при напряжении 18 кВ, токе 4 мкА через алюминиевый фильтр 112 мкм: **a**, **б** – спектры в логарифмическом масштабе (**a**:  $1 - Sp_{y.p.д.}$ ,  $2 - Sp_{MS}$ ,  $3 - Sp_{y.p.д.}MS_{mod}$ ;  $4 - Sp_{pileup}$ , штриховая линия – кривая прозрачности по фотопоглошению Al-фильтра); **б** – спектры в линейном масштабе ( $5 - Sp_{MS}$ ,  $6 - Sp_{y.p.d.}MS_{mod} + Sp_{pileup}$ ,  $7 - Sp_{y.p.d.}MS_{mod} + Sp_{pileup}$ ; **г**:  $8 - Sp_{MS}/(Sp_{y.p.d.}MS_{mod} + Sp_{pileup})$ ,  $9 - Sp_{MS}/(Sp_{y.p.d.}MS_{mod} + Sp_{pileup})$ .

щи рентгеновской трубки как напрямую, так и через р.з.с. В табл. 2 сведены основные параметры этих измерений: данные по источнику излучения, интегральное время прямой засветки детектора ( $T_{y.p.д.}$ ), средняя скорость счета при прямой засветке ( $C_{y.p.д.}$ ), интегральное время засветки детектора через р.з.с. ( $T_{MS}$ ) и средняя скорость счета во время засветки детектора через р.з.с. ( $C_{MS}$ ).

Для проверки модели эффективной площади р.з.с. в "среднем" диапазоне энергий использовалась трубка с анодом из молибдена при напряжении 18 кВ. Проведены две серии экспериментов: на первой ток трубки составлял 1 мкА и использовался алюминиевый фильтр 28 мкм, на второй эти параметры составляли 4 мкА и 112 мкм. Выбор напряжения 18 кВ был обусловлен желанием исключить из спектра континуума характеристические линии молибдена. Результаты первой серии измерений представлены на рис. 19 и 20.

На рис. 20 показаны интегральные спектры событий в единицах "отсчеты/(с · кэВ)" при прямой засветке у.р.д. и засветке через р.з.с. рентгеновской трубкой с анодом из Мо при напряжении 18 кВ, токе 1 мкА через алюминиевый фильтр 28 мкм.

Спектры ограничены диапазоном 3.3–18.0 кэВ, нижняя граница которого взята из расчета ≥1% прозрачности алюминиевого фильтра, верхняя граница 18 кэВ определяется напряжением на рентгеновской трубке 18 кВ.

В спектре  $Sp_{MS}$  на энергиях выше 19 кэВ наблюдается эффект наложений, описываемый модельным спектром  $Sp_{pileup}$ , доля которого незначительна: ~0.08% от общего числа событий. На рис. 20а также показана кривая прозрачности по



**Рис. 22. а** – спектры образцового детектора XRT-100T-CdTe при его засветке рентгеновской трубкой с Мо-анодом с расстояния 61 м. В 1-й серии измерений (*I*) ток на трубке 1 мкА, толщина Al-фильтра 28 мкм, во 2-й (*2*) – 4 мкА и 112 мкм соответственно; **б** – отличия спектров (*Run<sub>MS</sub>* – *Run*)/σ в диапазоне 2.4–18 кэВ, полученных в 1-й серии измерений (*3*) и во 2-й (*4*), где *Run<sub>MS</sub>* – спектр XRT-100T-CdTe при засветке у.р.д. через р.з.с., *Run* – спектр XRT-100T-CdTe при засветке у.р.д. напрямую, **б** – стандартное отклонение.

фотопоглощению алюминиевого фильтра толщиной 28 мкм.

Для проверки модели р.з.с. использовался интегральный спектр  $Sp_{MS}$ , полученный по площадке Ø28.56 мм и, соответственно, включающей в себя события D2 и S1. При таком подходе исключалась неопределенность в правильности определения границ зон событий D2 и S1.

По первой серии экспериментов видно, что модель р.з.с. сравнительно хорошо согласуется с измерениями. Амплитуда отклонений не превысила 15%. При этом наибольшие отклонения были зафиксированы на малых энергиях ниже 5 кэВ и в районе L-скачков иридия, особенно на скачке L3 2p3/2 (11.215 кэВ), где амплитуда отклонений составила ~13.3% относительно модели р.з.с.  $MS'_{mod}$ .

Рентгеновский поток в диапазоне 4.3–17.4 кэВ при засветке через р.з.с., т.е. по спектру  $Sp_{MS}$ , составил 538.40 ± 0.09 отсчетов/с. Поток по спектру  $Sp_{y.p.д.}MS_{mod}$  составил 520.50 ± 0.23 отсчетов/с. Энергетический диапазон 4.3–17.4 кэВ был выбран из расчета ≥10% прозрачности по фотопоглощению алюминиевого фильтра толщиной 28 мкм (~4.3 кэВ) и отступления на половину энергетического разрешения у.р.д. от крайней энергии 18 кэВ при напряжении 18 кВ (18 – FWHM<sub>у.р.д.</sub>(18 кэВ)/2 = 17.4 кэВ). Относительная разница потоков [ $F(Sp_{MS}) - F(Sp_{y.p.д.}MS_{mod})$ ]/ $F(Sp_{MS})$  составила 3.45 ± 0.05%. Основное отличие "набежало" в районе L-скачков иридия 10–14 кэВ.

Результаты второй серии измерений представлены на рис. 21 и 22.

 $(F(Sp_{MS})) =$  На рис. 22 по спектру XRT-100T-CdTe с филь-

ков иридия 10-14 кэВ.

тром 112 мкм (2) хорошо видно, что ниже 5 кэВ, где событий не должно было бы быть в принципе, есть полка, которая тянется до 2 кэВ на уровне  $\sim 7 \cdot 10^{-2}$  отсчетов/(с · см<sup>2</sup> · кэВ), или ~3.5% от максимума. Причиной образования этой полки явля-

Диапазон энергии 3.3–18 кэВ был сохранен,

Во второй серии экспериментов максималь-

Рентгеновский поток в диапазоне 5.4-17.4 кэВ

хотя фильтр толщиной 112 мкм становится про-

ная амплитуда отклонений ~17% была получена в

области высоких энергий. График отношения по

второй серии (рис. 21г) несколько отличается от

графика, полученного в первой серии (рис. 20г).

при засветке через р.з.с., т.е. по спектру  $Sp_{MS}$ , со-

ставил  $610.50 \pm 0.16$  отсчетов/с. Поток по спектру

 $Sp_{v,p,n}MS_{mod}$  составил 590.95  $\pm$  0.30 отсчетов/с.

Нижняя граница 5.3 кэВ выбрана из расчета ≥10%

прозрачности по фотопоглощению алюминиево-

го фильтра толщиной 112 мкм. Относительная

разница в потоках составила 3.30 ± 0.06%. Основ-

ное отличие снова накапливается в районе L-скач-

напряжении 18 кВ, токах 1 и 4 мкА не менялся

при засветке у.р.д. напрямую и через р.з.с. Для

контроля рентгеновского потока использовался

детектор XR-100T-CdTe, установленный прямо

под входом в р.з.с. В первой и второй серии изме-

рений с зеркальной системой и без нее значения

критерия согласия  $\chi^2$  на степень свободы получи-

лись 0.91 и 0.98 соответственно, т.е. статистиче-

ски потоки были одинаковыми.

Поток фотонов от молибденовой трубки при

зрачным ≥1% на энергиях выше 5.3 кэВ.



**Рис. 23.** Модельные и реальные спектры детекторов XR-100SDD и у.р.д., пример энергетического отклика детектора CZT NuSTAR. *1* – модель спектра молибденовой трубки при напряжении 18 кВ; *2* – спектр, полученный детектором XR-100SDD; *3* – модельный спектр трубки с учетом пропускания Al-фильтра 112 мкм и эффективности кремниевого детектора XR-100SDD; *4* – кривая пропускания по фотопоглощению Al-фильтра 112 мкм; *5* – пример отклика детектора CZT NuSTAR на энергию 17.58 кэВ; *6* – результат свертки с энергетическим разрешением у.р.д.; модельные спектры засветки у.р.д. Мо-трубки при напряжении 18 кВ: *7*, *9* – прямая засветка через фильтры 28 и 112 мкм, *8*, *10* – засветка через р.з.с. с фильтрами 28 и 112 мкм соответственно; *11–14* – реальные спектры при тех же условиях.

ются события, "перекачанные" из более высоких энергий.

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ДЕТЕКТОРА

Для понимания влияния энергетического отклика детектора на кривую отношения  $Sp_{MS}/(Sp_{v,p,\mu}MS'_{mod} + Sp_{pileup})$  необходимо иметь энергетическую матрицу отклика у.р.д. и знать спектр трубки. Матрицы отклика у.р.д.29 нахолятся на этапе разработки. поэтому вместо нее было решено использовать матрицу отклика детектора CZT проекта NuSTAR [11], находящуюся в открытом доступе и свернутую с энергетическим разрешением детектора у.р.д. Спектр рентгеновской трубки с молибденовым анодом и напряжением 18 кВ был смоделирован и умножен на пропускание алюминиевого фильтра и на эффективность регистрации кремниевого детектора XR-100SDD. Модельный спектр с фильтром 112 мкм сопоставлялся с реальным спектром, полученным при помощи детектора XR-100SDD. Эти спектры приведены на рис. 23.

Отличие от реального спектра заметно на энергиях ниже 10 кэВ, но для оценок это не столь существенно.

На рис. 24 для модельных спектров в диапазоне 3.3–8 кэВ представлены отношения:  $Sp_{MS}/(Sp_{RMF}MS_{mod})$  и  $Sp_{MS}/(Sp_{RMF}MS_{mod})$ , где  $Sp_{RMF}$ – спектральный отклик детектора на фотон (RMF – redistribution matrix function) при засветке через Alфильтры 28 и 112 мкм.

Качественно графики на рис. 20, рис. 21 и рис. 23 похожи. Наиболее существенное отличие в графиках наблюдается в районе L-скачков иридия в



Рис. 24. Отношения  $Sp_{MS}/(Sp_{RMF}MS_{mod})$  и  $Sp_{MS}/(Sp_{RMF}MS'_{mod})$  для модельных спектров при разной толщине алюминиевого фильтра. 1, 3 –  $Sp_{MS}/(Sp_{RMF}MS_{mod})$  для Al-фильтров соответственно 28 и 112 мкм; 2, 4 –  $Sp_{MS}/(Sp_{RMF}MS'_{mod})$  для Al-фильтров 28 и 112 мкм.



**Рис. 25.** Интегральные спектры (**a**–**B**) и их отношения (**r**) при прямой засветке у.р.д. и засветке через р.з.с. рентгеновской трубкой с анодом из молибдена при напряжении 26 кВ, токе 4 мкА через Al-фильтр 224 мкм: **a**, **б** – спектры в логарифмическом масштабе ( $1 - Sp_{y.p.д.}, 2 - Sp_{MS}, 3 - Sp_{y.p.d.}MS_{mod}, 4 - Sp_{pileup}$ , штриховая линия – кривая прозрачности по фотопоглощению Al-фильтра); **b** – спектры в линейном масштабе ( $5 - Sp_{MS}, 6 - Sp_{y.p.d.}MS_{mod} + Sp_{pileup}, 7 -$  $<math>Sp_{y.p.d.}MS'_{mod} + Sp_{pileup}$ ); **г**:  $8 - Sp_{MS}/(Sp_{y.p.d.}MS_{mod} + Sp_{pileup}), 9 - Sp_{MS}/(Sp_{y.p.d.}MS'_{mod} + Sp_{pileup})$ .

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 2 2020

диапазоне 10–14 кэВ, что говорит о том, что модель р.з.с. не очень хорошо их описывает.

При тестировании в более жестком диапазоне энергий использовалась трубка с анодом из хрома при напряжении 26 кВ и токе 4 мкА. Толщина алюминиевого фильтра была увеличена до 224 мкм.

При напряжении на трубке 26 кВ правый край спектра излучения трубки оказывается чуть ниже К-края кадмия 26.711 кэВ, тем самым исключается "перекачка" событий в область малых энергий за счет вылета из детектора флуоресцентных фотонов кадмия. Фильтр предназначался еще и для подавления линий хрома в спектре трубки.

На рис. 25 показаны интегральные спектры и их отношения при прямой засветке у.р.д. и засветке через р.з.с. рентгеновской трубкой с анодом из молибдена при напряжении 26 кВ, токе 4 мкА через алюминиевый фильтр 224 мкм.

Прозрачность фильтра на уровне ≥1% начинается на энергиях выше 6.9 кэВ и совпадает с энергией, на которой наблюдается излом на графиках на рис. 27 (см. ниже).

В данной серии экспериментов модельный спектр хорошо согласуется с экспериментальными данными в диапазоне 14–26 кэВ. В районе L-скачков иридия повторяется та же картина, что и в предыдущих сериях с молибденом. Ниже 6.9 кэВ наблюдается излом в спектре, который объясняется наличием "хвоста" в отклике детектора и незначительной долей линий хрома, проходящей через фильтр. В интервале 8–25 кэВ амплитуда отклонений модели от экспериментальных данных не превышает 10%. Поток от трубки по данным XR-100T-CdTe был статистически одинаковым в двух сериях измерений с зеркальной системой и без нее. Критерий согласия для них составил  $\chi^2_{dof} = 0.96$ .

Рентгеновский поток в диапазоне 6.9–25.3 кэВ при засветке через р.з.с., т.е. по спектру  $Sp_{MS}$ , составил 359.75 ± 0.13 отсчетов/с, поток по спектру  $Sp_{y,p,d}MS_{mod}$  составил 359.0 ± 0.2 отсчетов/с соответственно. Энергетический диапазон 6.9–25.3 кэВ был выбран из расчета ≥10% прозрачности по фотопоглощению алюминиевого фильтра 224 мкм на энергии ~6.9 кэВ и отступления на половину энергетического разрешения у.р.д. от крайней энергии 26 кэВ при высоком напряжении 26 кВ (26 – FWHM<sub>y,p,d</sub>. (26 кэВ)/2 = 25.3 кэВ). Потоки практически совпали, относительная разница в потоках составила 0.21 ± 0.05%.

Для испытаний р.з.с. на энергиях >26 кэВ использовалась трубка с анодом из хрома при напряжении 44 кВ и токе 4 мкА. Толщина алюминиевого фильтра была увеличена до 448 мкм. При энергии выше К-края кадмия и теллура в детекторе начинает работать перекачка части событий в область малых энергий за счет вылета из детекто-



**Рис. 26.** Интегральный спектр событий при прямой засветке у.р.д. трубкой с анодом из Cr при напряжении 44 кВ и токе 4 мкА.

ра флуоресцентных фотонов кадмия и теллура. Минимальная энергия вылета 22.984 кэВ, и соответственно спектр в диапазоне 22—44 кэВ не должен содержать "перекачанных" событий и пригоден для проверки модели р.з.с. на высоких энергиях. Сравнительно толстый алюминиевый фильтр непрозрачен для мягких фотонов и поэтому на малых энергиях могут присутствовать только события, связанные с вылетом флуоресцентных фотонов из детектора. Результаты испытаний представлены на рис. 26 и 27.

На спектре  $Sp_{y.р.д.}$  в линейном масштабе, представленном на рис. 26, хорошо видны провалы на К-скачках кадмия 26.711 кэВ и теллура 31.814 кэВ. Прозрачность на уровне  $\geq 1\%$  фильтра 448 мкм начинается на энергиях выше 8.8 кэВ. Полка в спектре на энергиях ниже 9 кэВ связана с "перекачанными" событиями за счет вылета К-квантов из детектора. Простые оценки показывают, что доля таких событий ~15% относительно "не перекачанных" событий.

Модельный спектр наложений, представленный на рис. 27, был получен с учетом модификации на энергиях ниже 20 кэВ. Доля  $Sp_{pileup} \sim 0.04\%$ от общего числа событий.

Рис. 27 показывает, что в спектре  $Sp_{y.p.д.}MS_{mod}$ ниже 10 кэВ наблюдается существенное отличие, которое объясняется тем, что спектр  $Sp_{y.p.д.}$  умножается на эффективную площадь р.з.с. на данной энергии, в то время как надо использовать эффективную площадь р.з.с. на энергии с добавлением энергии К-фотона. Для энергий выше 22 кэВ "перекачанных" событий нет и поправки делать не нужно. Примечательно, что на энергии 31.7 кэВ графики  $Sp_{y.p.д.}$  и  $Sp_{MS}$  пересекаются, и это говорит



**Рис. 27.** Интегральные спектры (**a**-**B**) и их отношение (**r**) при прямой засветке у.р.д. и засветке через р.з.с. рентгеновской трубкой с анодом из Сг при напряжении 44 кВ, токе 4 мкА и через Al-фильтр 448 мкм: **a**, **б** – спектры в логарифмическом масштабе (**a**:  $1 - Sp_{y.p.g.}$ ,  $2 - Sp_{MS}$ , штриховая линия – кривая прозрачности по фотопоглощению Al-фильтра; **б**:  $3 - Sp_{y.p.g.}$   $MS_{mod}$ ,  $4 - Sp_{pileup}$ ); **в** – спектры в линейном масштабе ( $5 - Sp_{MS}$ ,  $6 - Sp_{y.p.g.}MS_{mod} + Sp_{pileup}$ ); **г** –  $Sp_{MS}/(Sp_{y.p.g.}MS_{mod} + Sp_{pileup})$ .

о том, что р.з.с. имеет эффективную площадь 1 см<sup>2</sup> на данной энергии для источника, удаленного на 61 м.

По графикам на рис. 27 видно, что амплитуда отклонений достигает ~14% в диапазоне 20–32 кэВ, там, где наблюдается превышение модели над данными измерений. В то же время в диапазоне 32–40 кэВ отклонения имеют противоположный знак, и их амплитуда достигает 60–70%. Но эта информация вряд ли будет иметь существенное значение при анализе данных наблюдений из-за малости величины эффективной площади р.з.с. на этих энергиях.

Поток от трубки по данным XR-100T-CdTe был статистически одинаковым в двух сериях измерений с зеркальной системой и без нее,  $\chi^2_{dof} = 1.06$ .

Рентгеновский поток в диапазоне 20-40 кэВ при засветке через р.з.с., т.е. по спектру  $Sp_{MS}$ , со-

ставил 98.08  $\pm$  0.08 отсчетов/с, поток по спектру *Sp*<sub>у.р.д.</sub>*MS*<sub>mod</sub> составил 103.66  $\pm$  0.04 отсчетов/с соответственно. Относительная разница в потоках составила 5.38  $\pm$  0.09%.

Рентгеновская трубка фирмы Oxford Instruments должна работать при напряжениях выше 10 кВ. Тем не менее, для тестирования в наиболее "мягком" диапазоне энергий было предложено использовать трубку с медным анодом при напряжении 9 кВ и уровне тока 3 мкА. Такое напряжение было обусловлено желанием исключить из спектра характеристическую линию меди. Результаты тестирования представлены на рис. 28.

Сразу же необходимо оговорить, что в данной серии измерений поток от трубки оказался менее стабильным по сравнению с предыдущими сериями измерений. По данным детектора XR-100T-CdTe, в диапазоне энергий 3.7–8.4 кэB, при засветке трубкой у.р.д. через р.з.с. поток оказался на 5.55 ±



**Рис. 28.** Интегральные спектры (**a**–**B**) и их отношение (**r**) при прямой засветке у.р.д. и засветке через р.з.с. рентгеновской трубкой с анодом из Сu при напряжении 9 кВ и величине тока 3 мкА: **a**, **б** – спектры в логарифмическом масштабе  $(1 - Sp_{y.p.a.}, 2 - Sp_{MS}, 3 - Sp_{y.p.a.}MS_{mod}, 4 - Sp_{pileup})$ ; **в** – спектры в линейном масштабе  $(5 - Sp_{MS}, 6 - Sp_{y.p.a.}MS_{mod} + Sp_{pileup})$ ; **г** –  $Sp_{MS}/(Sp_{y.p.a.}MS_{mod} + Sp_{pileup})$ .

 $\pm 0.45\%$  выше, чем при прямой засветке у.р.д. Амплитуда отклонений не превысила ~10% в диапазоне 3–9 кэВ.

Рентгеновский поток в диапазоне 3.7-8.4 кэВ при засветке через р.з.с., т.е. по спектру  $Sp_{MS}$ , составил  $309.81 \pm 0.08$  отсчетов/с, поток по спектру *Sp*<sub>у.р.д.</sub>*MS*<sub>mod</sub> оказался чуть больше и составил  $316.50 \pm 0.22$  отсчетов/с соответственно. Энергетический диапазон 3.7-8.4 кэВ был выбран из расчета отступления на половину энергетического разрешения у.р.д. от порога регистрации фотонов 3 кэВ  $(3 + FWHM_{y,p,n}(3 \kappa 3B)/2 = 3.7 \kappa B)$  и отступления на половину энергетического разрешения у.р.д. от крайней энергии 9 кэВ при высоком напряжении 9 кВ (9 – FWHM<sub>у.р.д.</sub>(9 кэВ)/2 = 8.4 кэВ). Относительная разница в потоках получилась -2.11 ±  $\pm 0.07\%$ , что отличается по величине и по знаку от данных по разнице потоков по данным детектора XR-100T-CdTe. Однако различие может оказаться заметно меньше, если учесть различие детекторов

у.р.д. и XR-100T-CdTe в эффективности регистрации фотонов на энергиях ≤5 кэВ и энергетическом разрешении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На калибровочном стенде ИКИ РАН были проведены испытания р.з.с. и у.р.д. телескопа ART-XC проекта "Спектр-РГ". Для калибровок использовались запасные образцы р.з.с. и у.р.д. с идентификаторами MS6 и у.р.д.29.

Получены данные по энергетическому разрешению у.р.д., PSF комплекта р.з.с.—у.р.д. с расстояния 61 м до источника для различных энергий. По этим данным получены профили относительной поверхностной яркости пикселей, определено положение условной границы событий с двукратным и однократным отражением в зависимости от энергии. Определена зависимость W90 от энергии. Было проведено сравнение математической модели эффективной площади р.з.с. по оси зрения для источника, удаленного на 61 м, с полученными данными. В модели р.з.с. были использованы никелевые оболочки с шероховатостью 1 нм, покрытые слоем иридия толщиной 10 нм.

Экспериментальные данные хорошо согласуются с моделью р.з.с., относительная разница в потоках не превысила 3.5% в основном диапазоне энергий 4-20 кэВ и  $\leq 5.4\%$  в "жестком" диапазоне 20-40 кэВ. Отличия, доходящие в максимуме до 15%, могут быть объяснены использованием приближения  $Sp_{y.p.d.}MS_{mod}$  и сопутствующими "краевыми" эффектами.

При сравнении реальных и модельных спектров возникли некоторые сомнения в корректности модели р.з.с. в области L-скачков иридия 10— 14 кэВ. Для более "тонкого" исследования р.з.с. в этом диапазоне планируется провести измерения при помощи XR-100SDD в фокальной плоскости р.з.с.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа была поддержана грантом Министерства образования и науки РФ № 14.W03.31.0021.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Pavlinsky M., Sunyaev R., Churazov E., Vikhlinin A., Sazonov S., Revnivtsev M., Arefiev V., Lapshov I., Akimov V., Levin V., Buntov M., Semena N., Grigirivich S., Babyshkin V., Predehl P. et al. // Proc. SPIE. Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy IV. 2009. V. 7437. P. 743708. https://doi.org/10.1117/12.837361
- Pavlinsky M., Akimov V., Levin V., Krivchenko A., Rotin A., Kuznetsova M., Lapshov I., Tkachenko A., Semena N., Buntov M., Glushenko A., Arefiev V., Yaskovich A., Grebenev S., Sazonov S. et al. // Proc. SPIE. Space Telescopes and Instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray. 2016. V. 9905. P. 99051J. https://doi.org/10.1117/12.2230974

- Predehl P., Andritschke R., Babyshkin V., Becker W., Bornemann W., Bräuninger H., Brunner H., Boller T., Burwitz V., Burkert W., Clerc N., Churazov E., Countindo D., Dennerl K., Dwelly T. et al. // Proc. SPIE. Space Telescopes and Instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray. 2016. V. 9905. P. 99051K. https://doi.org/10.1117/12.2235092
- 4. Gubarev M., Ramsey B., O'Dell L., Elsner R., Kilaru K., McCracken J., Pavlinsky M., Tkachenko A., Lapshov I. // Proc. SPIE. Space Telescopes and Instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray. 2012. V. 8443. P. 84431U. https://doi.org/10.1117/12.926207
- Семена Н.П., Сербинов Д.В., Яскович А.Л., Ткаченко А.Ю., Павлинский М.Н. // ПТЭ. 2018. № 3. С. 100. https://doi.org/10.7868/S0032816218020222
- Gubarev M., Ramsey B., Kolodziejczak J.J., O'Dell S.L., Elsner R., Zavlin V., Swartz D., Pavlinsky M., Tkachenko A., Lapshov I. // Proc. SPIE. Space Telescopes and Instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray. 2014. V. 9144. P. 91444U. https://doi.org/10.1117/12.2056595.
- Levin V., Pavlinsky M., Akimov V., Kuznetsova M., Rotin A., Krivchenko A., Lapshov I., Oleinikov V. // Proc. SPIE. Space Telescopes and Instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray. 2014. V. 9144. P. 914413. https://doi.org/10.1117/12.2056311
- Pavlinsky M., Tkachenko A., Levin V., Krivchenko A., Rotin A., Kuznetsova M., Lapshov I., Krivonos R., Semena A., Semena N., Serbinov D., Shytkovsky A., Vaskovich A., Oleinikov V., Glushenko A. et al. // Experimental Astronomy. 2018. V. 45/ Issue 3. P. 315. https://doi.org/10.1007/s10686-018-9582-5
- Nevot L., Croce P. // Revue de Physique appliqué. 1980.
  V. 15(3). P. 761.
- Krivonos R., Tkachenko A., Burenin R., Filippova E., Lapshov I., Mereminskiy I., Molkov S., Pavlinsky M., Sazonov S., Gubarev M., Kolodziejczak J., O'Dell S.L., Swartz D., Zavlin V., Ramsey B.D. // Experimental Astronomy. 2017. V. 44. Issue 1. P. 147. https://doi.org/10.1007/s10686-017-9555-0
- Kitaguchi T., Grefenstette B., Harrison F., Miyasaka H., Bhalerao V., Cook W.R. III, Mao P., Rana V., Boggs S., Zoglauer A. // Proc. SPIE. UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XVII. 2011. V. 8145. P. 814507. https://doi.org/10.1117/12.896972