

## ПОПУЛЯЦИИ ИСТОЧНИКОВ В ОБЗОРЕ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ ТЕЛЕСКОПОМ ART-XC В СОСТАВЕ СРГ: МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2019 г. И. А. Мереминский<sup>1\*</sup>, Р. А. Буренин<sup>1</sup>, Р. А. Кривонос<sup>1</sup>,  
И. Ю. Лапшов<sup>1</sup>, М. Н. Павлинский<sup>1</sup>, С. Ю. Сазонов<sup>1</sup>,  
А. Ю. Ткаченко<sup>1</sup>, Е. В. Филиппова<sup>1</sup>, А. Е. Штыковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 10.08.2018 г.; после доработки 10.11.2018 г.; принята к публикации 28.11.2018 г.

Рассмотрена возможность проведения обзора плоскости Галактики на энергиях выше 5 кэВ с помощью телескопа СРГ/ART-XC во время перелета спутника в точку L2. Предложена одна из возможных площадок для такого обзора. Показано, что в обзоре площадью 10 кв. град и продолжительностью 10 сут можно будет обнаружить порядка сотни катаклизмических переменных со светимостями  $10^{31}–10^{34}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Такая репрезентативная выборка может позволить существенно уточнить функцию светимости и другие свойства популяции катаклизмических переменных в Галактике.

*Ключевые слова:* обзоры неба, рентгеновские источники, катаклизмические переменные, коронально-активные звезды.

DOI: 10.1134/S0320010819020050

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование популяций рентгеновских источников в Галактике является нетривиальной задачей, для успешного решения которой необходимо сочетание нескольких составляющих.

Во-первых, необходимо провести рентгеновский обзор большой площади (поскольку Млечный Путь занимает значительную долю небесной сферы), обеспечив при этом хорошее угловое разрешение (так как плотность источников высока) и высокую чувствительность. При этом из-за сильного поглощения на нейтральном газе и пыли в диске Галактики желательно, чтобы обзор покрывал область энергий выше 5 кэВ.

Во-вторых, для определения оптических компаньонов рентгеновских источников и их классификации требуются данные в оптическом и инфракрасном диапазонах. Следует также отметить сложность измерения расстояний до рентгеновских источников в Галактике.

Наконец, требуется верно оценить неполноту выборки, чтобы иметь возможность экстраполировать результаты сравнительно небольшого обзора на Галактику в целом.

Несмотря на все возникающие сложности, подобные исследования крайне важны для изучения

популяционных свойств галактических рентгеновских источников (в первую очередь, коронально-активных звезд и катаклизмических переменных), излучение которых складывается в крупномасштабный рентгеновский фон Млечного Пути. В частности, важно получить достаточно большую выборку катаклизмических переменных с измеренными массами белых карликов.

В 2019 г. планируется запуск астрофизической обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (СРГ), на борту которой будут установлены два рентгеновских телескопа: eROSITA (Предель и др., 2010; Мерлони и др., 2012) и ART-XC (Павлинский и др., 2011, 2016). Основной задачей обсерватории будет проведение обзора всего неба. В соответствии с рекомендациями рецензента, заменить на: При этом научные наблюдения начнутся раньше, на этапе перелета СРГ к точке Лагранжа L2 системы Солнце–Земля — месту проведения последующего обзора всего неба. Именно во время перелета предполагается провести обзор участка галактического диска. Ранее мы рассмотрели возможность проведения глубокого внегалактического обзора (Мереминский и др., 2018) площадью около 1 кв. градуса с целью получения большой выборки активных ядер галактик (АЯГ). В настоящей работе будет рассмотрена возможность проведения обзо-

\*Электронный адрес: i.a.mereminskiy@gmail.com

ра области плоскости Галактики площадью около 10 кв. градусов.

Целью работы является получение реалистичной оценки на чувствительность такого обзора и определение размера выборки галактических источников разных типов, которую можно будет получить с помощью телескопа ART-XC.

## ВЫБОР ПЛОЩАДКИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Несмотря на то что наиболее интересной областью для обзоров Галактики является ее центральная часть, высокая плотность источников и сильное поглощение в оптическом диапазоне делают задачу отождествления источников в этой области практически невыполнимой, если принять во внимание характерную точность локализации, достигаемую с помощью телескопа ART-XC ( $\approx 10''$  для слабых источников, Мереминский и др., 2018). Кроме того, однократно рассеянные на зеркальной системе телескопа (т.е. нефокусированные) фотоны от ярких источников, в первую очередь маломассивных рентгеновских двойных в балдже Галактики, приведут к сильному “загрязнению” обзора и уменьшению его полезной площади. Поэтому было решено выбрать такую площадку плоскости Галактики, в которой нет ярких рентгеновских источников, а пространственная плотность звездного населения достаточно велика. Этим условиям удовлетворяет площадка размером  $5^\circ \times 2^\circ$  с центром в  $(l, b) = (17.5^\circ, 0.0^\circ)$ . Примерно на этих долготах фоновое излучение, создаваемое диском Галактики, характеризуется максимальной яркостью (см. рис. 4 в Ревнивцев и др., 2006). Ближайший к полю яркий источник — маломассивная система с нейтронной звездой GX 17+2 — лежит в  $20'$  от границы площадки, а значит, фотоны однократного отражения от него будут служить дополнительным источником фона на значительной части поля. Учет влияния ярких источников важен при планировании и проведении подобных обзоров: так, например, вспышка рентгеновского транзиента 4U 1630-47, произошедшая во время обзора спирального рукава Наугольника телескопом NuSTAR (Бодаги и др., 2014), привела к существенному снижению достигнутой чувствительности, поэтому в наше моделирование был добавлен источник GX 17+2.

В целом обзор такой площадки позволит получить большую выборку источников, населяющих диск Галактики, а также измерить характерный размер их высотного распределения над плоскостью диска (Ревнивцев и др., 2008).

## МАССОВАЯ МОДЕЛЬ ГАЛАКТИКИ

В отличие от АЯГ, которые в первом приближении распределены в пространстве однородно, галактические источники распределены по небу сильно анизотропно. Для создания реалистичной популяции галактических источников мы воспользовались простым приближением, в котором пространственная плотность рентгеновских источников в каждой точке Галактики прямо пропорциональна плотности звездного населения. Для описания распределения звезд мы использовали модель экспоненциального звездного диска с отверстием в центре (модель 2 из работы Лопез-Корредора и др., 2005):

$$\rho(R) = \rho_\odot e^{\frac{R_\odot}{1970 \text{ пк}} + \frac{3740 \text{ пк}}{R_\odot} - \frac{R}{1970 \text{ пк}} - \frac{3740 \text{ пк}}{R}} \times \quad (1)$$

$$\times e^{-\frac{|z|}{h_z(R)}} M_\odot \text{ пк}^{-3},$$

$$h_z(R) = 285(1 + 0.21 \text{ кпк}^{-1}(R - R_\odot) + \quad (2)$$

$$+ 0.056 \text{ кпк}^{-2}(R - R_\odot)^2) \text{ пк},$$

где  $R$  — это галактоцентрический радиус,  $R_\odot = 7.9 \text{ кпк}$  — радиус, на котором расположена Солнечная система,  $\rho_\odot = 0.05 M_\odot \text{ пк}^{-3}$  — плотность звезд в окрестности Солнечной системы, а  $z$  — высота над Галактической плоскостью. Вкладом балджа Галактики было решено пренебречь, поскольку выбранная для обзора площадка соответствует  $R > 1.9 \text{ кпк}$ , а характерный масштаб экспоненциального балджа —  $0.7 \text{ кпк}$  (Двек и др., 1995).

При моделировании объем Галактики разбивался на ячейки размером  $10 \times 10 \times 10 \text{ пк}^3$ , далее отбирались только те ячейки, которые попадают в площадку обзора. В центре каждой ячейки рассчитывалась плотность звездного населения диска, затем ячейке приписывалась полная масса находящаяся в ней звезд.

При наблюдениях галактических источников, особенно обладающих мягкими тепловыми спектрами, важно правильно учесть вклад поглощения на межзвездном веществе. В моделировании рассчитывалось поглощение на луче зрения для каждого источника в зависимости от расстояния до него и его координат в соответствии с моделью распределения газа в Галактике (Наканиши, Софу, 2003, 2016). Для ближайших источников поглощение фиксировалось на величине  $N_H = 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Наибольшая величина поглощения составила  $3.4 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$  для далеких источников в плоскости диска.

## ПОПУЛЯЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Разыгрывались источники трех типов — коронально-активные звезды, катаклизмические переменные и маломассивные рентгеновские двойные

системы. Вклад коронально-активных звезд и катаклизмических переменных в рентгеновский фон (так называемый хребет) Галактики составляет более 80% (Ревнивцев и др., 2009). Маломассивные рентгеновские двойные — редкие объекты, но из-за своей высокой светимости они могут наблюдаться с больших расстояний, поэтому такие источники также были добавлены в моделирование. Кроме галактических источников, в моделирование были добавлены АЯГ, следуя процедурам, описанным Мереминским и др. (2018).

### Коронально-активные звезды

Самые распространенные галактические рентгеновские источники — это коронально-активные звезды. Мы использовали аналитическое приближение функции светимости, полученной в работе Сазонова и др. (2006) на основе каталогов звезд, зарегистрированных в рентгеновском обзоре всего неба обсерватории ROSAT (Макаров, 2003; Хюнш и др., 1999):

$$\begin{aligned} dN/d\lg L_{0.1-2.4 \text{ кэВ}}(L), M_{\odot}^{-1} &= & (3) \\ &= \begin{cases} \rho_{\odot} \times (L/L_{\text{crit}})^{-0.5}, & L \leq L_{\text{crit}}, \\ \rho_{\odot} \times (L/L_{\text{crit}})^{-1.1}, & L > L_{\text{crit}}, \end{cases} \end{aligned}$$

где  $L_{\text{crit}} = 10^{29.5}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , причем рассматривались только светимости выше  $10^{28}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Далее светимости источников пересчитывались в стандартный рентгеновский диапазон 2–10 кэВ с использованием соотношения (3) из работы Сазонова и др. (2006), которое учитывает, что с увеличением светимости спектр излучения звездных корон становится жестче. Следует отметить, что использованное приближение функции светимости предсказывает заметное количество источников со светимостями  $L_X \gtrsim 10^{32.5}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  (здесь и далее  $L_X$  — это светимость в диапазоне 2–10 кэВ). Однако существование такой популяции ярких источников не совместимо с измеренными кривыми подсчетов источников в Галактике. Поэтому было решено ограничить сверху диапазон допустимых светимостей величиной  $L_{X,\text{max}} = 10^{32}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , что близко к наблюдаемым значениям для ярчайших рентгеновских звезд (см., например, Варвик, 2014).

Спектры коронально-активных звезд хорошо описываются моделью излучения многотемпературной плазмы с плоским распределением меры эмиссии по температуре (модель *sevmkl* в XSPEC, Сазонов и др., 2012). При этом максимальная температура плазмы тем выше, чем выше  $L_X$ . Использовалась линейная зависимость максимальной температуры плазмы  $T_{\text{eff}}$  от светимости  $L_X$ ,

подобранная таким образом, чтобы воспроизводить наблюдаемую зависимость светимости в стандартном рентгеновском диапазоне (2–10 кэВ) от светимости в мягком (0.1–2.4 кэВ) диапазоне:

$$T_{\text{eff}} = 0.56 \lg(L_X) - 14.27 \text{ кэВ}. \quad (4)$$

Обилия всех элементов были приняты равными солнечному.

### Катаклизмические переменные

Катаклизмические переменные являются более редкими, но также и более яркими объектами: светимости промежуточных полярков могут достигать  $L_X = 10^{34}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Для моделирования их популяции использовалось аналитическое приближение функции светимости  $dN/d\lg L$ , полученной в работе Сазонова и др. (2006) и продолженной в область низких светимостей в работе Буренина и др. (2016):

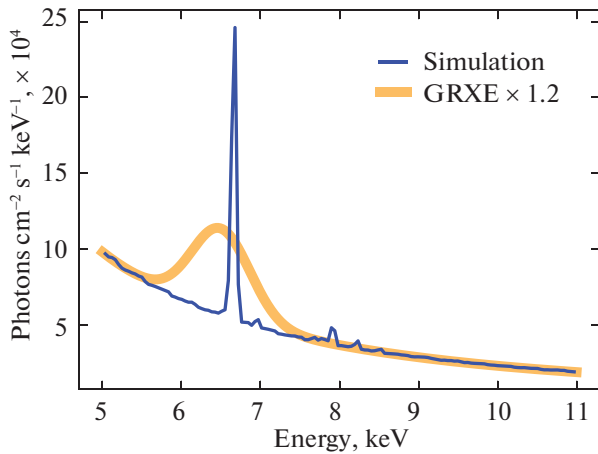
$$\begin{aligned} dN/d\lg L_{0.5-2 \text{ кэВ}}(L), M_{\odot}^{-1} &= & (5) \\ &= \begin{cases} \rho_{\odot} \times 10^{-5}, & L \leq L_{\text{crit}}, \\ \rho_{\odot} \times 10^{-5} \times (L/L_{\text{crit}})^{-1.2}, & L > L_{\text{crit}}, \end{cases} \end{aligned}$$

где  $L_{\text{crit}} = 10^{30.5}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Отметим, что плоская часть функции светимости (до  $L_{\text{crit}}$ ) должна рассматриваться скорее как верхний предел на количество слабых катаклизмических переменных, поскольку измерения в этом диапазоне светимостей пока отсутствуют. Впрочем, как следует из работы Сазонова и др. (2006), вклад катаклизмических систем на таких светимостях гораздо меньше вклада коронально-активных звезд. Светимости разыгрывались в диапазоне  $L_{0.5-2 \text{ кэВ}}$  от  $10^{28}$  до  $10^{34}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , затем рассчитывалась светимость в стандартном рентгеновском диапазоне  $L_X = 2.12 L_{0.5-2 \text{ кэВ}}$  в предположении степенного спектра с показателем 1.6 (Буренин и др., 2016), близкого к более реалистичному спектру, использованному далее.

Для описания спектров катаклизмических переменных использовалась спектральная модель, описанная в работе Сулейманова и др. (2005). Поскольку форма спектра в данной модели зависит от массы белого карлика, использовалось значение  $M_{WD} = 0.6 M_{\odot}$ , поскольку получающийся в этом случае спектр соответствует наблюдаемому спектру рентгеновского хребта Галактики (Кривонос и др., 2007; Тюрлер и др., 2010).

### Маломассивные рентгеновские двойные

Маломассивные рентгеновские двойные (ММРД) системы — самые яркие и редкие из рассматриваемых в данной работе объектов. В



**Рис. 1.** Сравнение спектра суммарного излучения смоделированных источников (в пересчете на квадратный градус, синим) и модельного спектра рентгеновского хребта Галактики из работ Ревнивцева и др. (2006) и Ревнивцева, Молькова (2012) (оранжевым). Нормировка модельного спектра увеличена на 20%. Большая ширина линии в модельном спектре обусловлена энергетическим разрешением телескопа RXTE.

активном состоянии их светимости находятся в диапазоне  $L_X = 10^{34} - 10^{38}$  эрг  $s^{-1}$ , а в неактивном —  $L_X = 10^{31} - 10^{33}$  эрг  $s^{-1}$  (см., например, Хейнке и др., 2003). Нами рассматривались только активные системы: хотя количество систем в неактивном состоянии плохо известно, известно, что их вклад в формирование излучения хребта Галактики мал.

Для моделирования популяции ММРД использовалась функция светимости, полученная в работе Гильфанова и др. (2004) в результате усреднения по выборке близких галактик. Эта функция светимости была продолжена (с сохранением наклона  $\frac{dN}{dL} \propto L^{-1}$ ) в область меньших светимостей, что согласуется с наблюдениями ММРД в нашей Галактике, по крайней мере, до светимостей  $L_X \approx 10^{35}$  эрг  $s^{-1}$  (Гребенев, Мереминский, 2015). При этом нормировка функции светимости не изменялась, что может привести к переоценке количества ММРД в Галактике в нашем моделировании в  $\approx 1.7$  раз (см. рис. 10 из работы Гильфанов и др., 2010).

При моделировании спектры ММРД с низкой светимостью ( $L_X \lesssim 10^{36}$  эрг  $s^{-1}$ ) описывались степенным законом с наклоном 1.9. Подобная простая модель хорошо согласуется с наблюдениями (Ревнивцев и др., 2008, и ссылки там же).

Как отмечено ранее, в моделирование была добавлена известная яркая рентгеновская двойная GX 17+2, находящаяся рядом с выбранной площадкой обзора. При этом для нее использовалась

спектральная модель из работы Фаринелли и др. (2005).

### *Суммарное излучение рентгеновских источников*

Поскольку однократно отраженные фотоны могут попадать на детекторы телескопа из-за пределов его номинального поля зрения, для моделирования использовалась площадка большего размера —  $7^\circ \times 4^\circ$ . В центральную область не попало ни одной ММРД, при этом две достаточно яркие (с потоками около  $10^{-11}$  эрг  $s^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) ММРД оказались недалеко от границ площадки обзора. Также около границы площадки оказалась яркая система GX 17+2.

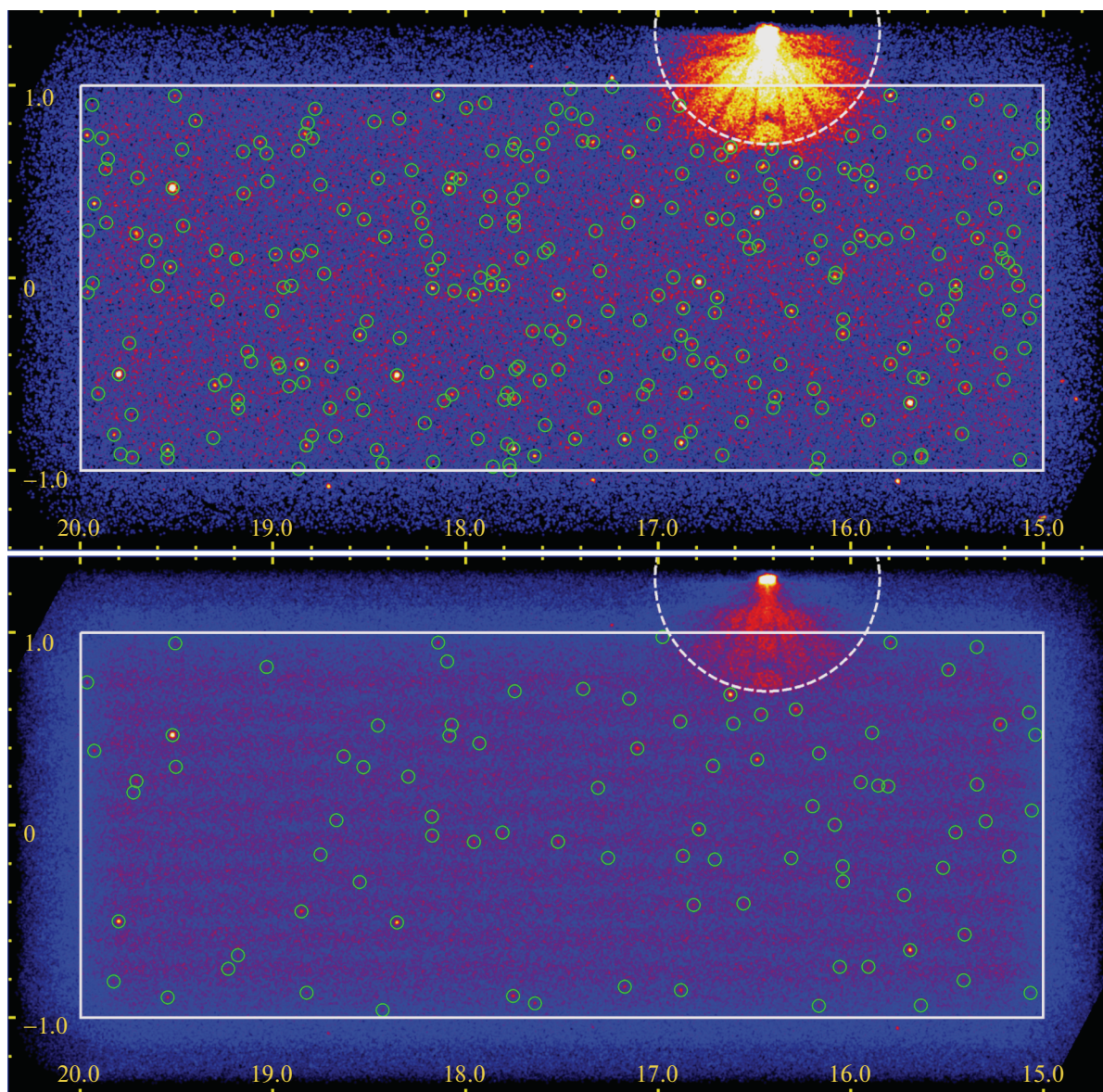
Чтобы проверить, насколько хорошо использованная модель воспроизводит свойства реальных популяций источников, был получен суммарный спектр источников, расположенных в площадке обзора и имеющих  $|b| < 0.5^\circ$ . Он приведен на рис. 1. Для сравнения приведен модельный спектр рентгеновского хребта Галактики, полученный в работе Ревнивцева и др. (2006), — степенной закон с наклоном 2.1 и широкой линией железа на энергии около  $\approx 6.5$  кэВ; нормировка поверхностной яркости и эквивалентная ширина линии железа взяты из результатов глубокого скана Галактической плоскости на  $l = 18.5^\circ$  (Ревнивцев, Мольков, 2012). Видно, что использованная нами модель верно воспроизводит форму спектра рентгеновского хребта, но предсказываемый поток оказывается завышен на 20%. Это расхождение тем не менее укладывается в наблюдаемый разброс измерений яркости рентгеновского хребта вдоль Галактической плоскости (Ревнивцев и др., 2006).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

В целом процедура моделирования повторяла использованную в работе Мереминского и др. (2018). Однако было внесено несколько уточнений в процедуру генерации отклика детекторов ART-XC на входящий фотон. Во-первых, вместо теоретически рассчитанной эффективности детектора использовалась кривая эффективности, полученная в ходе калибровок (Ткаченко и др., 2018). Во-вторых, с помощью ПО GEANT4 (Агостинелли и др., 2003) для каждого фотона разыгрывалось выделение энергии в объеме детектора.

Исходный каталог источников подавался на вход программного пакета SIXTE<sup>1</sup>, с помощью которого генерировались фотоны, приходящие на

<sup>1</sup> <http://www.sternwarte.uni-erlangen.de/research/sixte/index.php>

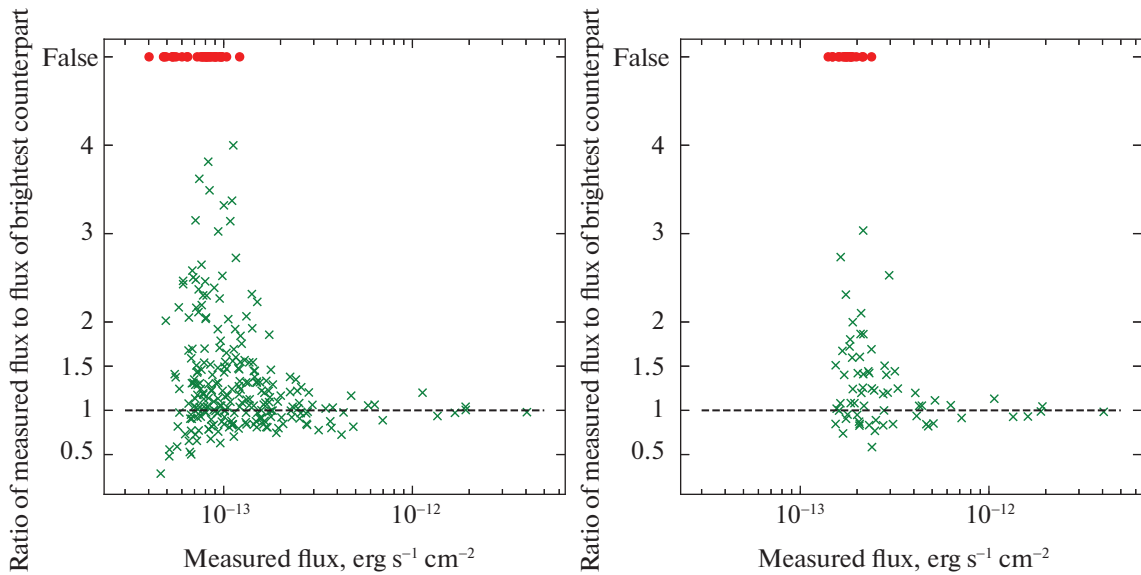


**Рис. 2.** Рентгеновские изображения неба в диапазоне 5–11 кэВ, полученные телескопом ART-XC по модельным данным: сверху — в случае низкого фона частиц ( $10^{-3}$  отсчетов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{кэВ}^{-1}$ ), внизу — в случае высокого фона ( $10^{-2}$  отсчетов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{кэВ}^{-1}$ ). Белый прямоугольник соответствует области, в которой детектировались источники ( $5^\circ \times 2^\circ$ ), зарегистрированные источники показаны зелеными кружками. Цветовая шкала логарифмическая, черный цвет соответствует нулевому темпу счета, а белый — удесятеренному среднему значению по полю. Яркий источник в правом верхнем углу — GX 17+2, вокруг него хорошо заметна область, засоренная фотонами однократного отражения, радиус пунктирной окружности —  $35'$ .

торец зеркальной системы ART-XC площадью  $1212.8 \text{ см}^2$ . Полное время экспозиции составило 832 кс, допустимые энергии для фотонов были ограничены интервалом 3–45 кэВ. Наблюдения проводились в режиме сканирования “змейкой” — в течение 64 кс телескоп двигался по прямой параллельно плоскости Галактики, затем направление оптической оси телескопа опускалось на  $10'$  по галактической широте и проводился скан

в противоположном направлении. Всего было выполнено 13 таких сканов, полностью покрывающих площадку.

Моделирование проводилось для двух уровней фона частиц — низкого ( $10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{кэВ}^{-1}$ ) и высокого ( $10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{кэВ}^{-1}$ ). Эти значения соответствуют разбросу ожидаемых темпов счета фоновых событий в точке Лагранжа L2 (Тенцер и др., 2010).



**Рис. 3.** Соотношение между измеренным потоком зарегистрированного источника и потоком ярчайшего компаньона из исходного каталога: слева — для случая низкого фона частиц, справа — для случая высокого фона. Красными точками указаны ложные источники.

В результате были получены карты неба в диапазоне энергий 5–11 кэВ (рис. 2), соответствующему максимальной чувствительности телескопа ART-XC. Далее проводился поиск источников с использованием оптимального фильтра, аналогично процедурам, использованным при моделировании внегалактического обзора (Мереминский и др., 2018).

### ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, РАЗМЕР ВЫБОРКИ ИСТОЧНИКОВ И ДРУГИЕ СВОЙСТВА ОБЗОРА

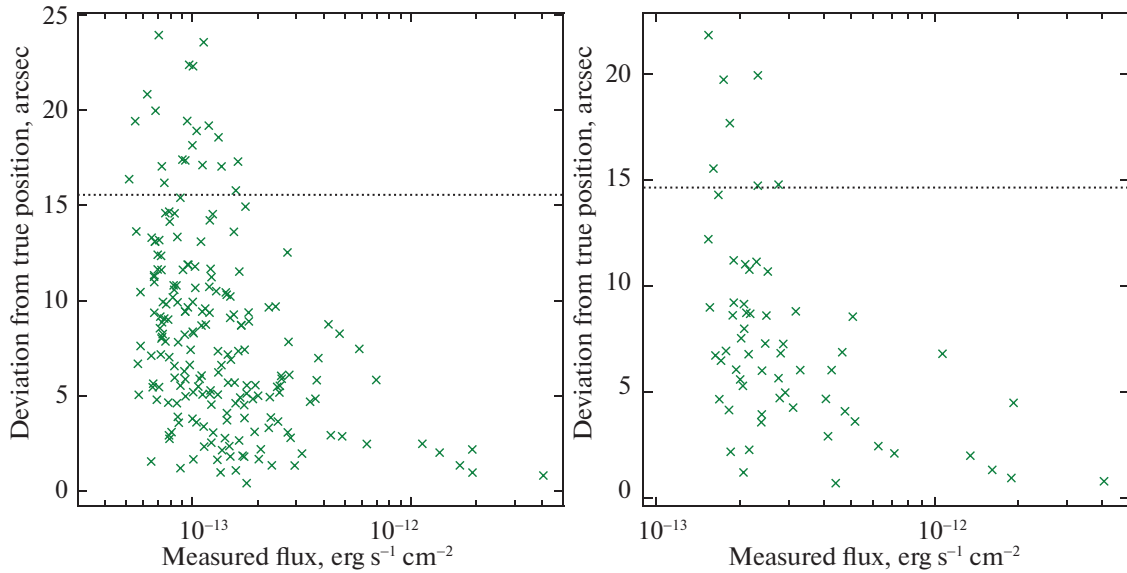
Всего в поле размером  $5^\circ \times 2^\circ$  в случае низкого фона было зарегистрировано 280 источников, а в случае высокого фона — 88 источников. При этом были исключены источники, попадающие в область радиусом  $35'$  вокруг GX 17+2, загрязненную однократно отраженными фотонами (рис. 2). Порог регистрации составил  $4.0 \times 10^{-14}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  и  $1.4 \times 10^{-13}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  соответственно. Как было показано ранее (Мереминский и др., 2018), порог смешивания достигается при плотностях источников на небе порядка 100 кв. град $^{-1}$ . В данном обзоре при выбранной экспозиции плотность источников оказывается существенно ниже этого критического значения, поэтому смешивание не играет заметной роли.

Для отождествления зарегистрированных источников с источниками из исходного каталога

использовался подход, аналогичный использованному во внегалактическом обзоре (Мереминский и др., 2018): для источников со значимостью детектирования  $S$  использовался радиус отождествления

$$R_{\text{match}}(S) = \begin{cases} 30'', & S \leq 5, \\ 30'' - 10'' \times (S - 5), & 5 < S \leq 6, \\ 20'', & S > 6. \end{cases} \quad (6)$$

В случае если поток зарегистрированного источника отличался от потока наиболее яркого источника в кружке отождествления более чем в пять раз или в кружок отождествления вообще не попадал ни один источник из каталога, считалось, что источник ложный. В случае низкого фона таких источников оказалось 36 (13%), а в случае высокого — 20 (23%). На рис. 3 показана зависимость измеренного потока источника от потока ярчайшего каталожного компаньона внутри  $R_{\text{match}}$ . На низких потоках измеренные потоки могут существенно отличаться от потоков ярчайших компаньонов по нескольким причинам: из-за смешивания, из-за отличия истинного спектра от предполагаемого при переводе отсчетов в поток (для пересчета использовался степенной спектр с показателем 1.7, это привело к переоценке потоков от самых “мягких” источников в нашем каталоге — коронально-активных звезд со светимостями  $\sim 10^{31}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  — на десятки процентов) или из-за смещения Эддингтона.



**Рис. 4.** Отклонения измеренных положений источников от их истинных координат: слева — для случая низкого фона частиц, справа — для случая высокого фона. Пунктирной линией показан 90% квантиль распределения отклонений.

Для успешного отождествления и классификации источников необходимо как можно точнее определить их небесные координаты. Среди полных выборок истинных источников 65% и 72% в случае низкого и высокого фона соответственно имеют точность локализации лучше 10", причем для источников с потоком, превышающим порог детектирования в два и более раз (т.е.  $8.0 \times 10^{-14}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> и  $2.8 \times 10^{-13}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> для низкого и высокого фона соответственно), медианное отклонение от ярчайших компаньонов составляет 6.7" и 4.3". Можно предположить, что полнота идентификации для ярких источников будет достаточно высокой. Как при низком, так и при высоком уровне фона примерно 90% источников будут находиться в пределах 15" от измеренных положений (рис. 4).

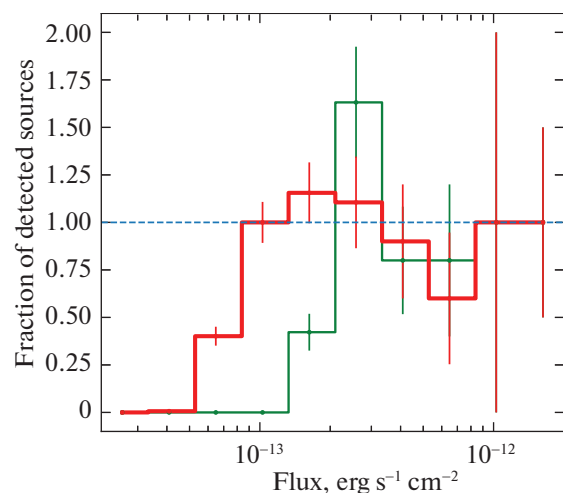
Благодаря знанию исходного каталога источников оказывается возможным оценить чувствительность обзора. Для этого в узких диапазонах по потоку мы определяли отношение количества зарегистрированных источников к количеству источников в исходном каталоге. Полученные значения представлены на рис. 5. На потоках выше  $10^{-13}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> чувствительность обзора приближается к 100%, вне зависимости от уровня фона.

Зная порог детектирования и зависимость полноты выборки зарегистрированных источников от потока, можно посчитать, какую долю излучения хребта Галактики составляет излучение от источников ярче порога детектирования. Для случая низкого фона порог детектирования составляет  $4.0 \times$

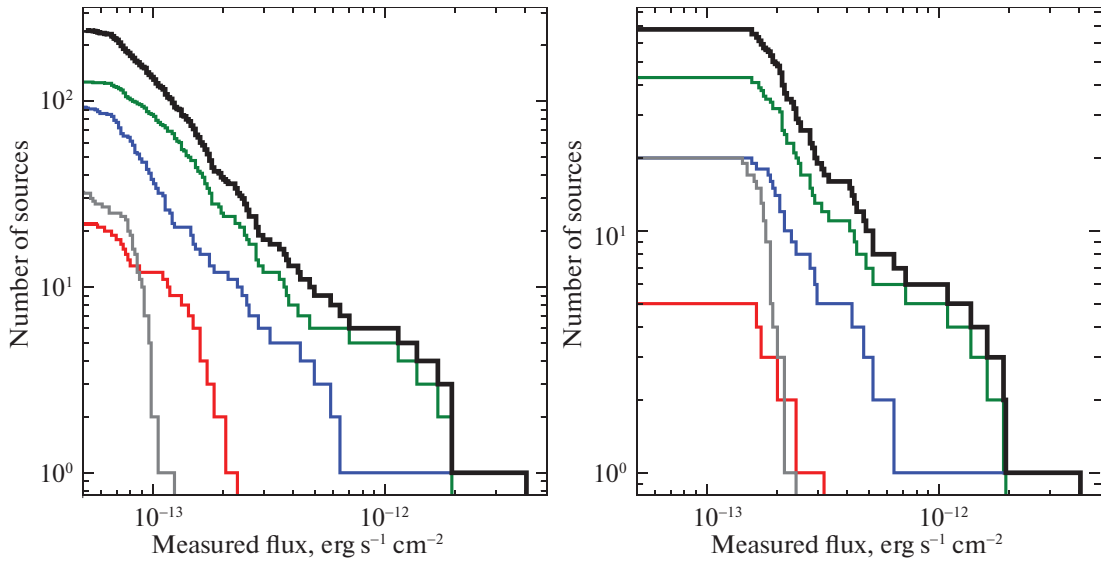
$\times 10^{-14}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup>, для высокого фона —  $1.4 \times 10^{-13}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup>, а доля разрешенного излучения составляет 20% и 11% соответственно в диапазоне 5–11 кэВ.

### СВОЙСТВА ОБНАРУЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

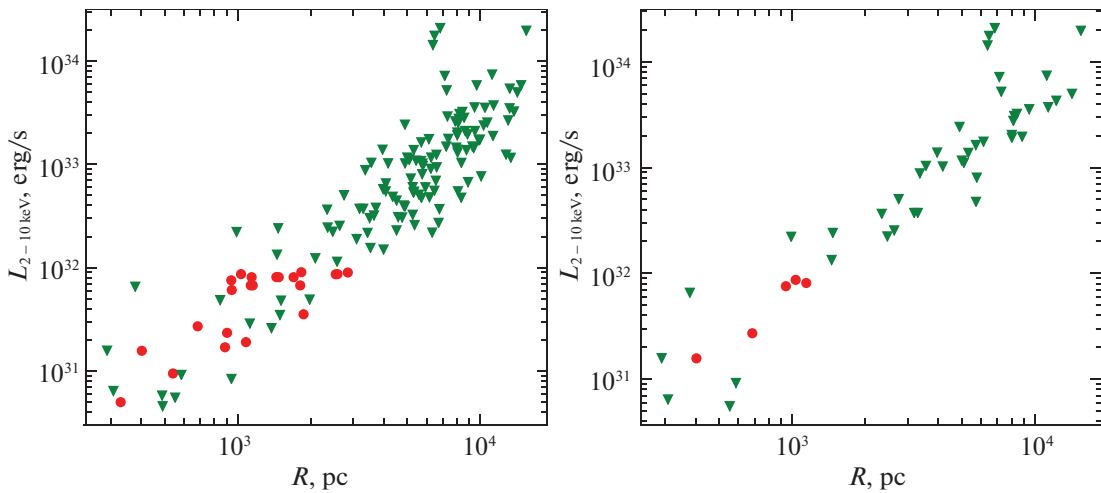
Таким образом, при ожидаемых уровнях фона частиц в обзоре Галактической плоскости удастся обнаружить несколько десятков или сотен источников. Из кривых подсчетов, представленных на рис. 6, видно, что наиболее распространенными



**Рис. 5.** Доля зарегистрированных источников в зависимости от потока, в диапазоне 5–11 кэВ. Красным показано отношение для случая низкого, а зеленым — для случая высокого фона.



**Рис. 6.** Кривые подсчетов для разных типов источников: слева — для случая низкого фона частиц, справа — для высокого. Красным показаны коронально-активные звезды, зеленым — катаклизмические переменные, синим — АЯГ, серым — ложные источники. Черным показана суммарная кривая подсчетов.



**Рис. 7.** Светимости и расстояния до источников в обзоре: слева — для случая низкого фона частиц, справа — для высокого. Красными точками показаны коронально-активные звезды, зелеными треугольниками — катаклизмические переменные.

источниками будут катаклизмические переменные. Следующими по распространенности будут АЯГ, и, наконец, самыми редкими — коронально-активные звезды, что ожидаемо, учитывая их небольшие светимости и мягкие спектры.

На диаграмме “светимость–расстояние” (рис. 7) видно, что наиболее распространенные объекты в обзоре — это катаклизмические переменные со светимостями  $L_X \approx 10^{33}$  эрг  $s^{-1}$ , расположенные на расстояниях в 5–10 кпк. Для большинства обнаруженных коронально-активных звезд можно будет определить расстояния по данным Gaia

(Байлер-Джонс и др., 2018), но для основной массы катаклизмических переменных (гораздо более слабых в оптике объектов) это сделать будет крайне сложно из-за высокой плотности звезд в плоскости Галактики (см., например, каталог белых карликов по данным Gaia Гентиле Фусилло и др., 2018).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор площадью  $\sim 10$  кв. град в плоскости Галактики, проведенный в течение 10 дней на этапе



перелета обсерватории СРГ в точку L2, станет рекордно глубоким обзором Галактики большой площади на энергиях выше 5 кэВ. Все проводившиеся до сих пор рентгеновские обзоры Галактики были ограничены одним или несколькими из следующих факторов: мягкий рентгеновский диапазон (и, следовательно, сильное влияние межзвездного поглощения на отбор объектов), низкая чувствительность, недостаточно хорошее угловое разрешение, малая площадь покрытия неба. Телескоп ART-XC позволит провести уникальный обзор благодаря сочетанию чувствительности в относительно жестком рентгеновском диапазоне, сравнительно большого поля зрения и достаточно хорошего углового разрешения.

Как обсуждалось в настоящей работе, оптимальным с точки зрения получения большой выборки источников и минимизации проблем, связанных с их регистрацией и последующим отождествлением, может оказаться проведение обзора в поле с координатами  $l \approx 15-20^\circ$ ,  $|b| < 1^\circ$ . При продолжительности обзора в 10 дней порог регистрации точечных источников ожидается на уровне  $\sim (0.5 - 2) \times 10^{-13}$  эрг  $\text{с}^{-1}$   $\text{см}^{-2}$  (неопределенность связана с уровнем фона частиц на орбите СРГ). При этом смешивание источников не должно стать значительной проблемой.

Основным результатом такого обзора может стать репрезентативная выборка из порядка сотни катаклизмических переменных в широком диапазоне рентгеновских светимостей  $L_X \sim 10^{31} - 10^{34}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Такая выборка, полученная в жестком рентгеновском диапазоне, необходима для уточнения функции светимости и других свойств галактической популяции катаклизмических переменных. Серьезной проблемой, однако, может оказаться поиск оптических/инфракрасных партнеров таких объектов среди огромного количества слабых звезд в плоскости Галактики.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 16-29-13070-офи-м).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агостинелли и др. (S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, et al.), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **506**, 250 (2003).
2. Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, G. Mantelet, and R. Andrae), *Astron. J.* **156**, 58 (2018).
3. Бодаги и др. (A. Bodaghee, J.A. Tomsick, R. Krivonos, D. Stern, F.E. Bauer, F.M. Fornasini, et al.), *Astrophys. J.* **791**, 68 (2014).
4. Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г., Ткаченко А.Ю. и др., *Письма в Астрон. журн.* **42**, 273 (2016) [R.A. Burenin, M.G. Revnvtsev, A.Y. Tkachenko, V.S. Vorob'ev, A.N. Semena, A. V. Meshcheryakov, et al.), *Astron. Lett.* **42**, 240 (2016).]
5. Фаринелли и др. (R. Farinelli, F. Frontera, A.A. Zdziarski, L. Stella, S.N. Zhang, M. van der Klis, et al.), *Astron. Astrophys.* **434**, 25 (2005).
6. Гентиле Фусилло и др. (N.P. Gentile Fusillo, P.-E. Tremblay, B.T. Gänsicke, C.J. Manser, T. Cunningham, E. Cukanovaitė, et al.), *ArXiv eprints* (2018).
7. Гильфанов и др. (M. Gilfanov), *MNRAS* **349**, 146 (2004).
8. Хюнш и др. (M. Hünsch, J.H.M.M. Schmitt, M.F. Sterzik, and W. Voges), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **135**, 319 (1999).
9. Хейнке и др. (C.O. Heinke, J.E. Grindlay, P.M. Lugger, H.N. Cohn, P.D. Edmonds, D.A. Lloyd, et al.), *Astrophys. J.* **598**, 501 (2003).
10. Кривонос и др. (R. Krivonos, M. Revnvtsev, E. Churazov, S. Sazonov, S. Grebenev, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **463**, 957 (2007).
11. Макаров (V.V. Makarov), *Astron. J.* **126**, 1996 (2003).
12. Мереминский И.А., Филиппова Е.В., Буренин Р.А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 87 (2018) [I.A. Mereminskiy, E.V. Filippova, R.A. Burenin, S.Y. Sazonov, M.N. Pavlinsky, A.Y. Tkachenko, et al., *Astron. Lett.* **44**, 67 (2018).]
13. Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Böhringer, T. Boller, H. Brunner, et al.), *ArXiv e-prints* (2012).
14. Наканиши и Софу (H. Nakanishi and Y. Sofue), *Publ. Astron. Soc. Japan* **55**, 191 (2003).
15. Наканиши и Софу (H. Nakanishi and Y. Sofue), *Publ. Astron. Soc. Japan* **68**, 5 (2016).
16. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, et al.), in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 8147 of Proc. SPIE, p. 814706 (2011).
17. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, A. Krivchenko, A. Rotin, M. Kuznetsova, et al.), in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, Vol. 9905 of Proc. SPIE, p. 99051J (2016).
18. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, H. Böhringer, W. Bornemann, H. Bräuninger, H. Brunner, et al.), in *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*, Vol. 7732 of Proc. SPIE, p. 77320U (2010).
19. Ревнивцев и др. (M. Revnvtsev, S. Sazonov, M. Gilfanov, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **452**, 169 (2006).
20. Ревнивцев и др. (M. Revnvtsev, A. Lutovinov, E. Churazov, S. Sazonov, M. Gilfanov, S. Grebenev, et al.), *Astron. Astrophys.* **491**, 209 (2008).

21. Ревнивцев и др. (M. Revnivitsev, S. Sazonov, E. Churazov, W. Forman, A. Vikhlinin, and R. Sunyaev), *Nature* **458**, 1142 (2009).
22. Сазонов и др. (S. Sazonov, R. Sunyaev, and M. Revnivitsev), *MNRAS* **420**, 388 (2012).
23. Тюрлер и др. (M. Türler, M. Chernyakova, T.J.-L. Courvoisier, P. Lubiński, A. Neronov, N. Produit, et al.), *Astron. Astrophys.* **512**, A49 (2010).
24. Тенцер и др. (C. Tenzer, G. Warth, E. Kendziorra, and A. Santangelo), in *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV*, Vol. 7742 of Proc. SPIE, p. 77420Y (2010).
25. Ткаченко и др. (A. Tkachenko, M. Pavlinsky, I. Lapshov, V. Levin, V. Akimov, A. Krivchenko, et al.), in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 10699 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 106995E (2018).