

Наблюдаемость одиночных нейтронных звезд на СРГ/eROSITA

А.Д. Хохрякова^{1,2}, А.В. Бирюков^{2,3}, С.Б. Попов^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики



Четырехлетний обзор неба с использованием телескопа eROSITA на борту обсерватории Спектр-РГ (СРГ) с фокусирующей оптикой позволит получить наилучший обзор в мягком (0.5–2 кэВ) и стандартном (2–10 кэВ) рентгеновских диапазонах, как с точки зрения чувствительности, так и с точки зрения углового разрешения. Мы провели исследование возможности обнаружения различных типов одиночных нейтронных звезд с помощью eROSITA. Среди уже известных объектов eROSITA сможет зарегистрировать более 160 пульсаров, 21 магнитар, 7 центральных компактных объектов, все семь источников Великолепной семерки и две другие рентгеновские одиночные нейтронные звезды в течение четырехлетней миссии. Кроме того, ожидается, что eROSITA сможет обнаружить аккрецирующие одиночные нейтронные звезды, а также открывать новые остывающие нейтронные звезды и магнитары.

Введение

Исследования астрофизических объектов можно в первом приближении разделить на изучение отдельных источников, по которым имеется большое количество данных, и на изучение достаточно больших и по возможности однородных выборок. Первый подход позволяет, как правило, в деталях проверить применимость физических механизмов к исследуемым объектам. Второй дает возможность определять общие характеристики источников (температура, основные пути эволюции и т.п.). С инструментальной точки зрения для первой задачи подходят инструменты с небольшим полем зрения, позволяющие достигать очень слабых потоков и высокого углового разрешения. В современной рентгеновской астрономии это, в первую очередь, космические обсерватории XMM-Newton и Chandra. Вторая задача обычно требует обзорных наблюдений. В рентгеновском диапазоне сейчас такой обзор проводят инструменты спутника СРГ, предшественником которого была немецкая космическая обсерватория ROSAT (Truemper 1993, Truemper 1982).

В данной работе мы изучаем наблюдаемость различных типов одиночных нейтронных звезд с помощью телескопа eROSITA на борту спутника СРГ. Четырехлетний обзор с помощью этого инструмента с фокусирующей оптикой позволит получить наилучший обзор неба в мягком (0.5–2 кэВ) и стандартном (2–10 кэВ) рентгеновском диапазоне как с точки зрения чувствительности, так и углового разрешения. Кроме того, на борту СРГ установлен российский телескоп ART-XC, который также проведет полный обзор неба в стандартном рентгеновском диапазоне. Это будет чрезвычайно важно для изучения различных субпопуляций нейтронных звезд.

Телескоп eROSITA (extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array) на борту СРГ, успешно запущенного в июле 2019 года, за 4 года обзорных наблюдений сделает 8 полных обзоров неба в диапазоне энергий от нескольких десятых кэВ до 10 кэВ. Один оборот (скан) совершается каждые 4 часа. Подробное описание eROSITA представлено в работе (Merloni et al., 2012).

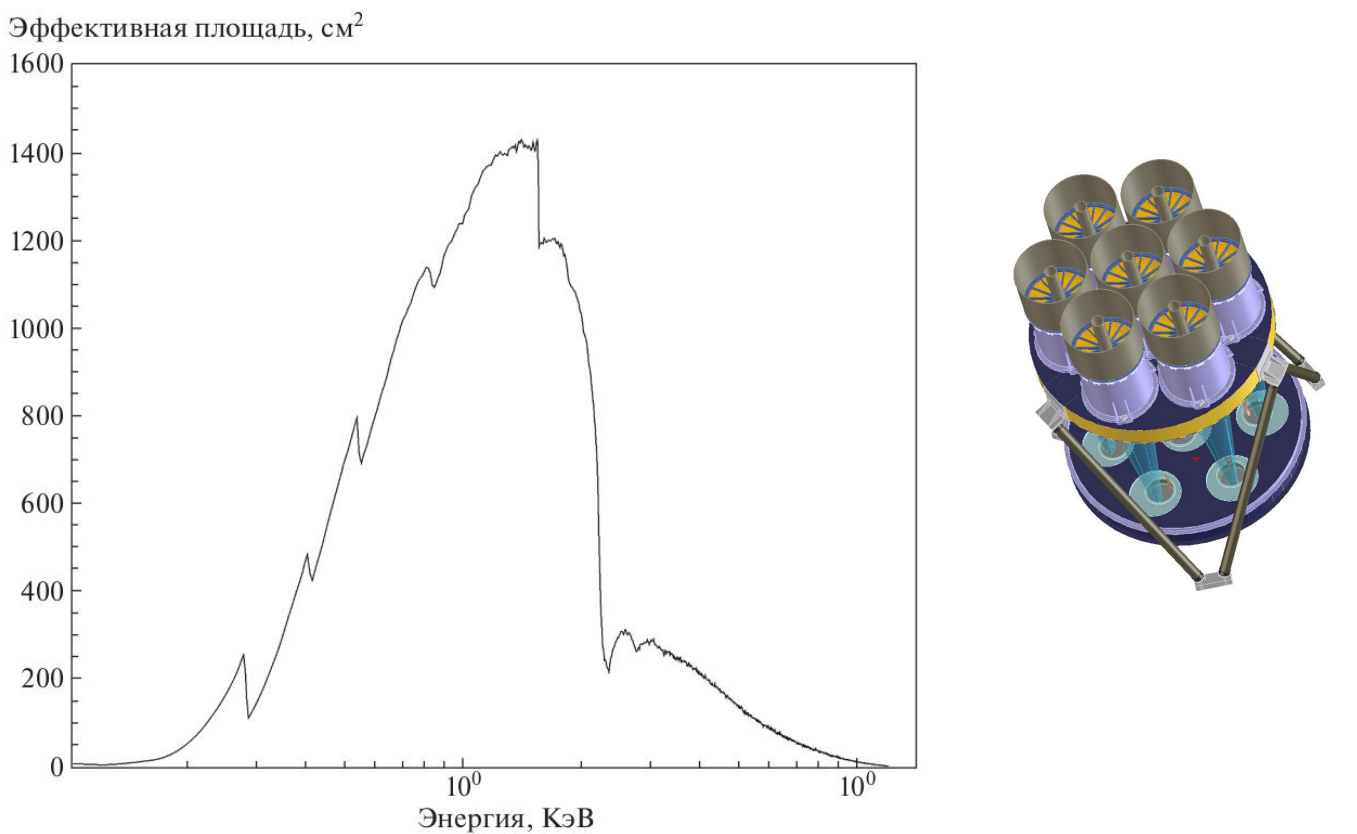


Рис. 1. Зависимость эффективной площади телескопа eROSITA от энергии фотонов. Данные представлены в предположении, что 5 из 7 телескопов закрыты фильтрами, отсекающими мягкую часть спектра.

Пульсары

Пульсары (классические и миллисекундные) и вращающиеся радиотранзиенты (Rotating Radio Transients, RRATs) составляют основную часть популяции известных нейтронных звезд. Всего в каталоге ATNF (Manchester et al., 2005) содержится > 2720 радиопульсаров (включая RRATs). Мы исследовали возможность регистрации рентгеновского излучения пульсаров. Для этого мы строим спектральную модель такого излучения. Мы предполагаем, что спектр является суммой теплового и степенного.

Для оценки температуры в недрах (рассчитанной с учетом красного смещения) мы использовали выражение из Igoshev & Popov 2018, являющееся аналитическим приближением результатов моделирования из работы Shternin et al. 2011 для звезды массой 1.32 M_{sun}:

$$T_{in} = b \left(\frac{t}{1 \text{ yr}} \right)^a \exp(-t/\tau_c),$$

где параметры $b = 6.56 \times 10^8 \text{ K}$, $a = -0.185$, $\tau_c = 8.58 \times 10^5 \text{ лет}$. Далее температуру поверхности (с учетом красного смещения) мы оценивали как

$$T_{surf} = 83.67 \text{ K} \left(\frac{T_{in}}{1 \text{ K}} \right)^{1/2}.$$

Это примерная оценка, которая тем не менее неплохо фитирует более точные расчетные данные (см. Potekhin et al. 1997).

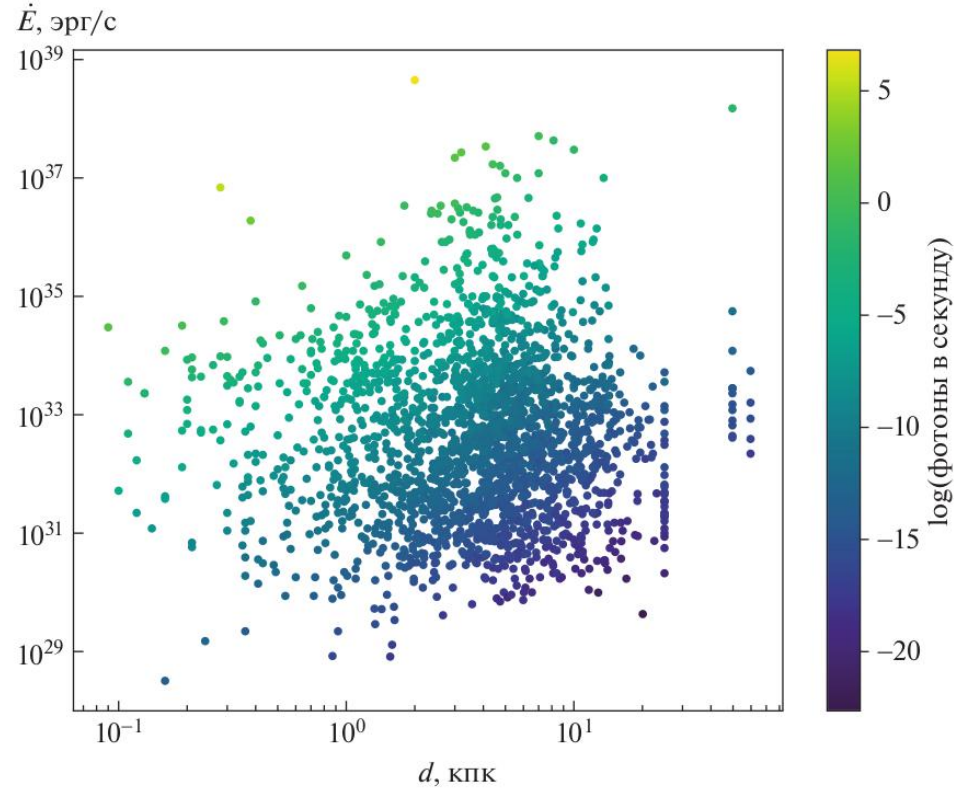


Рис. 2. Диаграмма “Потери вращательной энергии - Расстояние” для пульсаров из ATNF с известными мерами дисперсии. Логарифм темпа счета фотонов показан цветом. Количество пульсаров с потоком больше порогового значения $F_x = 0.01$ равно 162.

Для нормировки степенной части спектра, связанной с нетепловым магнитосферным излучением, зависящим от $\dot{E}_{\text{rot}}$, мы использовали рентгеновскую светимость, являющуюся суммой двух слагаемых. В жестком диапазоне (2–10 кэВ) мы рассчитывали светимость, следуя работе Possenti et al. 2002:

$$L_X[2 - 10] = 3.8 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{\dot{E}}{10^{38} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{1.34}$$

и в мягком диапазоне (0.1–2 кэВ), согласно Becker 2009:

$$L_X[0.1 - 2] = 4.4 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{\dot{E}}{10^{38} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{0.997}.$$

Полная светимость в диапазоне 0.1–10 кэВ равна их сумме. Для степенной части, мы использовали фотонный индекс $\Gamma = 1.7$ (Becker 2009). Количество регистрируемых фотонов в секунду:

$$\dot{N}_{\text{detected}} = \int_{E_1}^{E_2} \frac{(4\pi R^2 \pi B_E(T, E) E^{-1} + C E^{-\Gamma}) e^{-\sigma N_H} S_{\text{eff}}(E) dE}{4\pi d^2},$$

где E – энергия фотона (кэВ), E_1, E_2 – границы чувствительности телескопа, $S_{\text{eff}}(E)$ – зависимость эффективной площади eROSITA от энергии фотона (см. рис. 1), C – константа нормировки, $B_E(T, E)$ – функция Планка, d – расстояние до источника, N_H – колонковая плотность атомов водорода. Количество пульсаров с ожидаемым темпом счета фотонов больше порогового значения $F_{x,\text{min}} = 0.01 \text{ c}^{-1}$ оказалось 162 (см. рис. 2). В это число входят как классические, так и миллисекундные пульсары (см. рис. 3).

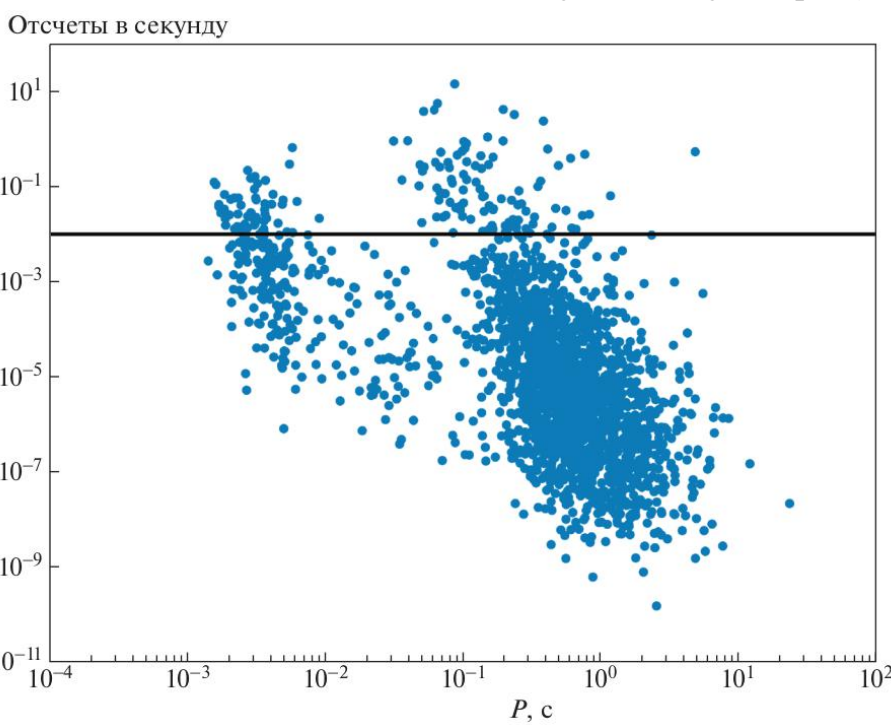


Рис. 3. Темп счета фотонов в зависимости от периода пульсара P. Горизонтальная линия отделяет пульсары, поток фотонов от которых больше необходимого для регистрации значения $F_x = 0.01$.

Критерии поиска новых источников

Можно выделить два основных подхода к выявлению новых одиночных нейтронных звезд. Первый подразумевает кросс-корреляцию, т.е. использование данных различных инструментов в разных диапазонах спектра. В частности, нейтронные звезды отличает высокое отношение потоков в мягком рентгеновском и в оптическом диапазонах. Второй, в целом менее эффективный подход, основан исключительно на рентгеновских данных. Введем отношение жесткости (отношение разности и суммы потоков в мягкой и жесткой частях рентгеновского спектра) для eROSITA:

$$HR_{eR} = \frac{(1 - 10 \text{ keV}) - (0.1 - 1 \text{ keV})}{(1 - 10 \text{ keV}) + (0.1 - 1 \text{ keV})}.$$

Эту величину можно достаточно просто получить из наблюдений. При этом она позволяет отделить различные классы объектов. На рис. 4 мы сравниваем HR_{eR} для разных типов нейтронных звезд и активных ядер галактик (АЯГ). Для АЯГ мы провели оценки жесткости для различных значений красного смещения z и химических составов Z в предположении, что спектр является степенным с показателями фотонного спектра $\Gamma = 1.9$ и 1.7. Темп регистрации фотонов:

$$\dot{N}_{\text{detected}} = \int_{E_1}^{E_2} \frac{C E^{-\Gamma} e^{-\sigma(E) N_H(z)} S_{\text{eff}}(E)}{4\pi D_L^2} dz dE,$$

где D_L – фотометрическое расстояние, $\sigma(E) = Z\sigma_0$, Z – химический состав (значение параметра, равное единице, соответствует солнечной металличности).

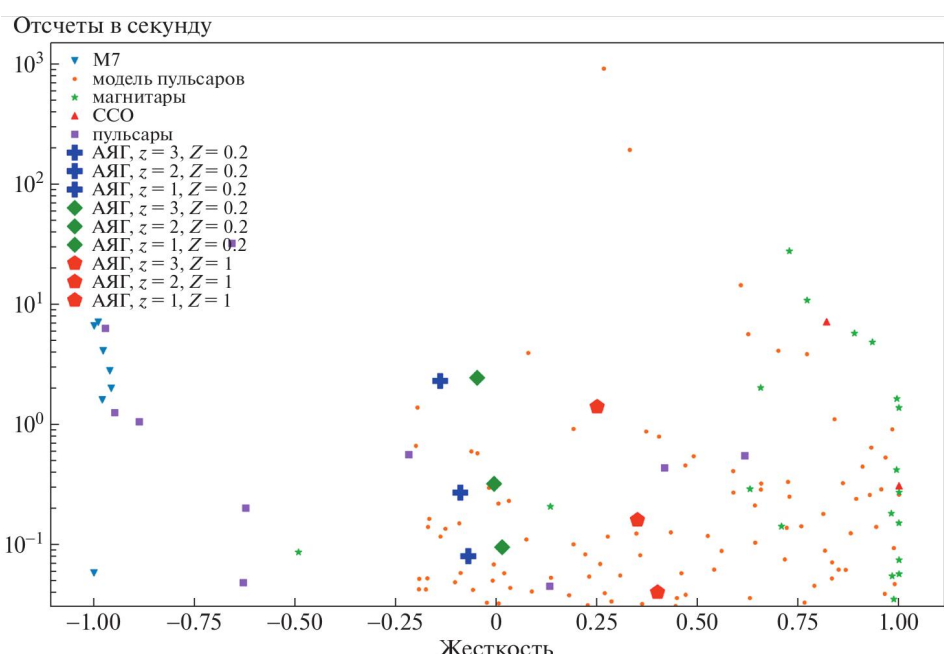


Рис. 4. Диаграмма “Жесткость – Отсчеты в секунду” для различных типов нейтронных звезд и АЯГ, которые может зарегистрировать eROSITA. Оранжевые точки – пульсары из каталога ATNF, рентгеновское излучение которых было смоделировано с помощью нашей модели, описанной выше. Фиолетовыми квадратами обозначены пульсары с известным тепловым рентгеновским излучением. Зеленые ромбы обозначают АЯГ с фотонным индексом $\Gamma = 1.7$, а синие плюсы и красные пятиугольники – АЯГ с $\Gamma = 1.9$.

Великолепная семерка

Великолепная семерка – это близкие одиночные нейтронные звезды с тепловым излучением. Их возраст примерно $10^5 - 10^6$ лет. Температуры поверхности, ответственной за наблюдаемое рентгеновское излучение, составляют от ~40 до ~100 эВ. Все эти объекты были открыты спутником ROSAT. Как и для других типов нейтронных звезд, мы исследовали наблюдаемость этих объектов, используя спектральные параметры из литературы. Для всех объектов этого типа мы использовали тепловые спектры с поглощением с параметрами, приведенными в табл. 2.

Таб. 2. Спектральные параметры и результаты моделирования, из которых следует, что все объекты Великолепной семерки могут наблюдаться на eROSITA. Источники: Burwitz et al. 2003, Haberl et al. 2004, van Kerkwijk et al. 2004, Haberl et al. 2003, Zane et al. 2005, Haberl et al., 2004.

Name	kT eV	R/d km/kpc	N_H 10^{20} cm^{-2}	photons/s
J1856-3754	63	36.7	0	6.6
J0720-3125	85.2	19.3	1.38	7.1
J1605+3249	98	9.1	0	4.1
J1308+2127	95.1	12.35	7.1	2.8
J2143+0654	101.4	7.42	3.65	2
J0806-4123	95.6	6.29	0.4	1.6
J0420-5022	44.8	20	1.01	0.16

Оценка уровня темнового сигнала eROSITA и минимальных наблюдаемых потоков

Семь ПЗС-матриц eROSITA работают в покадровом режиме. В каждой из них раз в 50 мс кадр размером 384×384 пиксела быстро переносится из области накопления в область хранения, откуда считается за ~10 мс. Если наблюдается известный объект, то обладая телеметрической информацией об ориентации телескопа, можно рассчитать координаты изображения источника в кадре. А следовательно, и измерить число отсчетов детектора внутри диафрагмы выбранного размера и центрированной на источник. Складывая эти числа, полученные на разных кадрах, и вычитая из них накопленный темновой сигнал, мы тем самым можем получить оценку рентгеновского потока от источника, т.е. провести его фотометрию. Если общее число отсчетов в диафрагме за некоторое время накопления будет статистически превышать ожидаемое количество фотонов от темнового сигнала ПЗС-матриц, то тогда можно будет говорить об уверенном обнаружении источника. Точность же фотометрии будет определяться количеством накопленных фотонов, т.е. яркостью источника и эффективным временем экспозиции. Следуя Merloni et al. (2012) и предполагая Пуассоновское распределение темновых отсчетов на телескопе, мы получили уточненную оценку минимального потока. А именно, для того, чтобы говорить о статистически значимом детектировании источника, количество зарегистрированных отсчетов внутри апертуры должно быть больше такого минимального целого N , что

$$\sum_{n=0}^N \frac{\mu_{\text{bkg}}^n}{n!} \exp(-\mu_{\text{bkg}}) \geq 1 - \alpha,$$

где $\alpha = 2.87 \times 10^{-7}$ – уровень значимости обнаружения, а $\mu_{\text{bkg}} = \frac{5\pi}{16} f_{\text{bkg},0} t_{\text{exp}}$.

Время экспозиции $t_{\text{exp}} = 1627 \text{ с}$, а коэффициент $5\pi/16 = \pi/4 \cdot 0.8$ отражает тот факт, что область интегрирования мы считаем кругом и что 20% всех фотонов от источника оказываются за ее пределами. При этом минимальный обнаружимый поток будет выражаться как

$$F_{x,\text{min}} = \frac{N - \mu_{\text{bkg}}}{t_{\text{exp}}} \approx 11.5 \times 10^{-3} \text{ отс./с},$$

Однако возможность обнаружения (известных) точечных источников определяется не только аппаратными характеристиками телескопа и детектора, но и алгоритмом обработки данных. Например, достаточно изменить размер апертуры интегрирования, и оценка минимального потока также изменится. Вероятно, конкретный алгоритм работы с данными не будет оставаться неизменным в течении всего времени функционирования аппарата. Однако простая оценка чувствительности, приведенная выше, вполне может рассматриваться как разумное консервативное приближение. С учетом всего сказанного выше для дальнейших оценок в нашей работе мы используем нижнюю оценку потока по порядку величины, а именно $F_{x,\text{min}} = 0.01$ отсчета за секунду.

Магнитары

Магнитары – это молодые нейтронные звезды с сильным магнитным полем (~ 10^{14} - 10^{15} Гс), причём их наблюдательные проявления связаны с диссипацией энергии магнитного поля (см. Turolla et al., 2015). В списке McGill Online Magnetar Catalog (Olausen & Kaspi, 2014) имеется спектральная информация о 30 магнитарах и кандидатах, относящаяся к спокойной фазе активности. Мы использовали эту информацию, чтобы рассчитать темпы счета на eROSITA. Для всех них темпы счета оказались достаточно высокими, от ~ 10^{-3} до ~30 отсчетов в секунду. То есть, можно ожидать, что даже в спокойном состоянии источников eROSITA сможет зарегистрировать 21 известный магнитар согласно нашему критерию регистрируемости $F_x > 0.01$.

Таб. 1. Спектральные модели из литературы и темпы счета для eROSITA, соответствующие этим моделям. Нижние 3 объекта являются кандидатами.

Name	kT keV	Γ	N_H 10^{22} cm^{-2}	photons/s
CXOU J010043.1-721134	0.30 ± 0.68	...	0.063	0.21
4U 0142+61	0.41	3.88	1	27.7
SGR 0418+5729	0.32	...	0.115	0.0071
SGR 0501+4516	0.5	3.84	0.88	2.0
SGR 0526-66	0.44	2.5	0.604	0.14
1E 1048.1-5937	0.7	2.3	0.97	5.7
1E 1547.0-5408	0.54	1.9	3.46	1.38
PSR J1622-4950	0.5	...	5.4	0.0015
SGR 1627-41	...	2.9	10	0.0025
CXOU J164710.2-455216	0.59	3.86	2.39	0.035
1RXS J170849.0-400910	0.456	2.792	1.36	4.8
CXOU J171405.7-381031	...	3.45	3.95	0.15
SGR J1745-2900	0.64	...	18.7	0.0039
SGR 1806-20	0.55	1.6	6.9	0.27
XTE J1810-197	0.18	...	0.63	0.51
Swift J1822.3-1606	0.12	...	0.453	0.086
SGR 1833-0832	1.2	...	10.4	0.057
Swift J1834.9-0846	0.96	...	12.9	0.022
1E 1841-045	0.45	1.9	2.2	1.6
3XMM J185246.6+003317	0.65	...	1.36	0.055
SGR 1900+14	0.47	1.9	2.12	0.42
SGR 1935+2154	0.48	2.1	1.6	0.18
1E 2259+586	0.37	3.75	1.012	10.8
AX J1818.8-1559	...	1.53	6.3	0.021
AX J1845.0-0258	...	1	7.8	0.0031
PSR J1846-0258	...	1.1	4	0.074

Центральные компактные объекты

Центральные компактные объекты (Central Compact Objects, CCO) – это источники мягкого теплового рентгеновского излучения, расположенные близко к геометрическому центру молодых (0.3–7 тысяч лет) остатков сверхновых (De Luca, 2017). Мы исследовали возможность наблюдения CCO на eROSITA, используя метод, описанный выше. Согласно нашему критерию регистрируемости $F_x > 0.01 \text{ c}^{-1}$, eROSITA сможет зарегистрировать семь из числа известных центральных компактных объектов.

Таб. 3. Спектральные параметры и полученные темпы счета для CCO. Параметры ($kT, N_H, R/d$) взяты из источников, указанных в колонке Ref.

Name	kT eV	R/d km/kpc	N_H 10^{20} cm^{-2}	photons/s	Ref.
1E 0102.2-7219	155 ± 517	0.24 ± 0.005	100	0.001	Pavan et al. 2020
RX J0822.0-4300	155	3.8	10	3.1	Vigano et al. 2013
1E 1207.4-5209	110	4.6	3	1.3	Vigano et al. 2013
CXOU J160103.1-513353	483	0.09	246	0.02	Park et al. 2009
1WGA J1713.4-3949	570 ± 320	0.59 ± 0.32	47	7.15	Cassam-Chenai et al. 2004
XMMU J172054.5-372652	420 ± 3	0.6	410	0.3	Lovchinsky et al. 2011
CXOU J181852.0-150213	474	0.06	3.4	0.005	Klochkov et al. 2016
CXOU J185238.6+004020	220	0.5	20	0.2	Vigano et al. 2013
CXO J232327.9+584842	219	1.1	40	0.5	Vigano et al. 2013

Заключение

Мы провели исследование наблюдаемости различных типов одиночных нейтронных звезд на инструменте eROSITA на борту спутника Спектр-РГ. Было проведено моделирование и расчет спектров радиопульсаров, вращающихся радиотранзиентов, магнитаров, центральных компактных объектов, Великолепной семерки. Основные результаты: среди уже известных объектов eROSITA сможет зарегистрировать за четырехлетнюю миссию ~162 пульсара, 21 магнитар, 7 компактных центральных объектов, Великолепную семерку и 2 другие рентгеновские одиночные нейтронные звезды. Кроме того, мы ожидаем, что eROSITA сможет зарегистрировать аккрецирующие нейтронные звезды, а также открыть новые остывающие нейтронные звезды и магнитары.