

МОРФОЛОГИЯ И СПЕКТРЫ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ G18.1-0.1 ПО ДАННЫМ SRG/eROZITA

© 2023 г. А. М. Быков^{1*}, Ю. А. Уваров^{1**}, М. Р. Гильфанов^{2***}, П. С. Медведев^{2****}

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 07.12.2022 г.; принята к публикации 08.12.2022 г.

Представлены результаты анализа данных наблюдений остатка сверхновой (ОСН) G18.1-0.1, выполненные на рентгеновском телескопе eROZITA обсерватории SRG в рамках программы наблюдений галактического “хребта”. Построено изображение, целиком покрывающее окрестность остатка, расположенного в сложной для анализа области диффузного излучения центрального радиана Галактики. Высокая чувствительность рентгеновского телескопа в диапазоне энергий 0.5–2.3 кэВ и угловое разрешение $\sim 16''$ позволили впервые построить изображение и определить морфологию асимметричной протяженной области взаимодействия эжекты сверхновой G18.1-0.1 с окружающей средой. Спектральный анализ диффузного рентгеновского излучения ОСН, за вычетом дискретных источников, хорошо аппроксимируется моделью излучения тепловой плазмы, учитывающей поглощение в межзвездной среде. Полученные в результате анализа значения температуры плазмы $T = 0.49^{+0.14}_{-0.13}$ кэВ и $N_H = 5.8^{+1.3}_{-1.0} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ согласуются с ранее полученными оценками. В спектре горячей плазмы G18.1-0.1 обнаружен избыток Si, обилие которого составляет $2.0^{+1.5}_{-0.7}$ солнечных.

Ключевые слова: остатки сверхновых звезд, рентгеновская астрономия, SRG/eROZITA.

DOI: 10.31857/S0320010823010023, **EDN:** РКНКСР

ВВЕДЕНИЕ

Остаток сверхновой G18.1-0.1, расположенный в галактической плоскости в первом галактическом квадранте, был открыт Одегард (1986) в рамках радиообзора галактической плоскости на частоте 57.5 МГц. Позже этот ОСН наблюдался в различных диапазонах (Броган и др., 2006; Войсин и др., 2016; Лихи и др., 2014; Парон и др., 2013; Ранасингх, Лихе, 2018; Хьюит, Юзеф-Задах, 2009). Радионаблюдения показали, что ОСН G18.1-0.1 относится к классу оболочечных остатков и имеет радиус $\sim 4'$. Инфракрасные наблюдения зарегистрировали излучение молекул H_2 от окрестности остатка (Фробрих и др., 2015). Радионаблюдения также показывают молекулярное излучение из этой области в линии молекулы CO от излучающей структуры, существенно превышающей размер остатка (Войсин и др., 2016; Парон и др., 2013; Ранасингх, Лихе, 2018). ОСН находится

на границе этой структуры. Кроме того, Парон и др. (2013) наблюдали несколько комплексов НII в непосредственной окрестности остатка, а также 3 звезды класса O и 4 звезды класса B0-5. В рамках гипотезы, что структура из молекулярного облака, ОСН и областей НII, а также местоположение горячих звезд являются физически связанными, Парон и др. (2013) оценили расстояние до нее в 4 кпк. Позднее Лихи и др. (2014) на основе данных наблюдений спектров поглощения НI оценили дальность до остатка в 5.6 кпк, при этом подтвердив оценку на расстояние до областей НII в 2.9–4.1 кпк. Из анализа Лихи и др. (2014) следует, что остаток и области НII пространственно разнесены. Они заключили, что радиус остатка ≈ 8.9 пк, и он, вероятно, находится на стадии адиабатического расширения Седова и имеет возраст ~ 5000 лет. Однако позднее Ранасингх, Лихе (2018) на основе анализа данных обзора VLA галактической плоскости в линии излучения НI 21 см несколько скорректировали эти оценки, поместив остаток на расстояние 6.4 ± 0.2 кпк.

Рентгеновские наблюдения ОСН G18.1-0.1 были выполнены Сугизаки и др. (2001) с помощью

* Электронный адрес: byk@astro.ioffe.ru

** Электронный адрес: uv@astro.ioffe.ru

*** Электронный адрес: gilfanov@iki.rssi.ru

**** Электронный адрес: tomedvedev@iki.rssi.ru

телескопа ASCA в рамках обзора части галактической плоскости. Область “хребта” в центральном радиане Галактики является сложной для рентгеновских наблюдений протяженных объектов из-за большого числа дискретных источников, попадающих в поле зрения телескопа, а также из-за неоднородного диффузного излучения. Угловое разрешение телескопа ASCA, полная ширина гауссовой PSF детектора GIS которого на уровне полуамплитуды составляет $\sim 1.2'$ для энергии фотона 1 кэВ, не позволяет эффективно фильтровать излучение фоновых точечных источников от излучения изучаемых объектов, размер которых порядка нескольких угловых минут. Тем не менее Сугизаки и др. (2001) удалось исследовать спектр излучения G18.1-0.1 и получить для него в рамках модели нетеплового степенного спектра следующую аппроксимацию: $N_H = 7.72^{+2.73}_{-2.82} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, $\Gamma = 8.62^{+1.38}_{-2.05}$.

Остаток G18.1-0.1 наблюдался обсерваторией Chandra с экспозицией ~ 10 кс. Поле наблюдения было недостаточно для полного покрытия остатка. Парон и др. (2013) исследовали точечный источник CXO J182438.1-131039, проецирующийся на остаток, и отождествили его со звездой спектрального класса O (O3–O5), но диффузное излучение остатка в данных Chandra не было исследовано. Позднее, на основе тех же данных, в работе Лихи и др. (2014) был найден еще один компактный источник с координатами $l \approx 18.17$, $b \approx -0.21$, проецирующийся на остаток, была построена карта излучения остатка в диапазоне 1–5 кэВ и получена аппроксимация спектра диффузного излучения остатка моделью теплового излучения оптически тонкой плазмы АРЕС: $N_H = (5.7 \pm 0.8) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, $T = 0.44^{+0.12}_{-0.07}$ кэВ. Однако морфологическая структура диффузного излучения ОСН по данным наблюдений телескопа Chandra на построенной карте не выделяется.

Телескоп еРОЗИТА (Предел и др. 2021), установленный на борту обсерватории СРГ (Сюняев и др. 2021), позволяет выполнять наблюдения широкого поля протяженных источников с высокими чувствительностью и спектральным разрешением в диапазоне энергий 0.5–2.3 кэВ и угловым разрешением ($\sim 16''$ на 1.5 кэВ). Ниже данные наблюдений еРОЗИТА используются для исследования ОСН G18.1-0.1.

НАБЛЮДЕНИЯ СРГ

Прямоугольная область площадью ~ 25 квадратных градусов, расположенная в галактической плоскости в окрестности галактической широты

$l = 20^\circ$, наблюдалась телескопом еРОЗИТА в октябре 2019 г. в рамках программы калибровочных наблюдений. Техника растрового сканирования неба телескопом СРГ позволила получить почти однородную экспозицию во внутренней части сканированной области, эффективное значение которой с поправками на виньетирование составляет ~ 2.4 кс (0.5–2.3 кэВ). Однако ОСН G18.95-1.1 расположен на границе области, поэтому экспозиция наблюдений остатка неоднородная, возрастает от значения ~ 2.1 кс на юге до значения ~ 2.7 кс на севере. Область сканирования полностью покрывает окрестность источника, что позволяет выбрать физически обоснованную фоновую область для спектрального анализа. Хорошее угловое разрешение детектора еРОЗИТА позволяет исключить из анализа точечные источники, проецирующиеся на остаток. На основе данных еРОЗИТА была построена скорректированная на экспозицию рентгеновская карта ОСН, и был проведен спектральный анализ его излучения. На построенной карте впервые обнаружено диффузное рентгеновское излучение области взаимодействия эжекты сверхновой с окружающей средой, и детектированы два дискретных рентгеновских источника, ранее обнаруженных обсерваторией Chandra (Лихи и др., 2014).

Анализ изображений

Детекторы телескопа еРОЗИТА наиболее чувствительны в диапазоне энергий 0.5–2.3 кэВ. Рентгеновская карта, полученная для этого диапазона энергий, представлена на рис. 1 вместе

Таблица 1. Области, использовавшиеся для спектрального анализа

Область	α	δ	Размер/радиус, угл. мин
SNR	18:24:37.0	–13:11:40.0	4
bkg1	18:24:34.0	–13:10:59.0	5–7
bkg2	18:24:24.3	–13:21:03.2	4
1	18:24:37.6	–13:10:36.7	0.5
2	18:24:46.4	–13:12:17.0	0.5

Примечание. Перечислены области, использовавшиеся для спектрального анализа. Остаток — SNR, области фона — bkg1, bkg2 и точечные источники, окрестности которых исключались из спектрального анализа: 1 (2CXO J182437.6-131036), 2. Для кольцевой области bkg1 приведены значения внутреннего и внешнего радиусов.

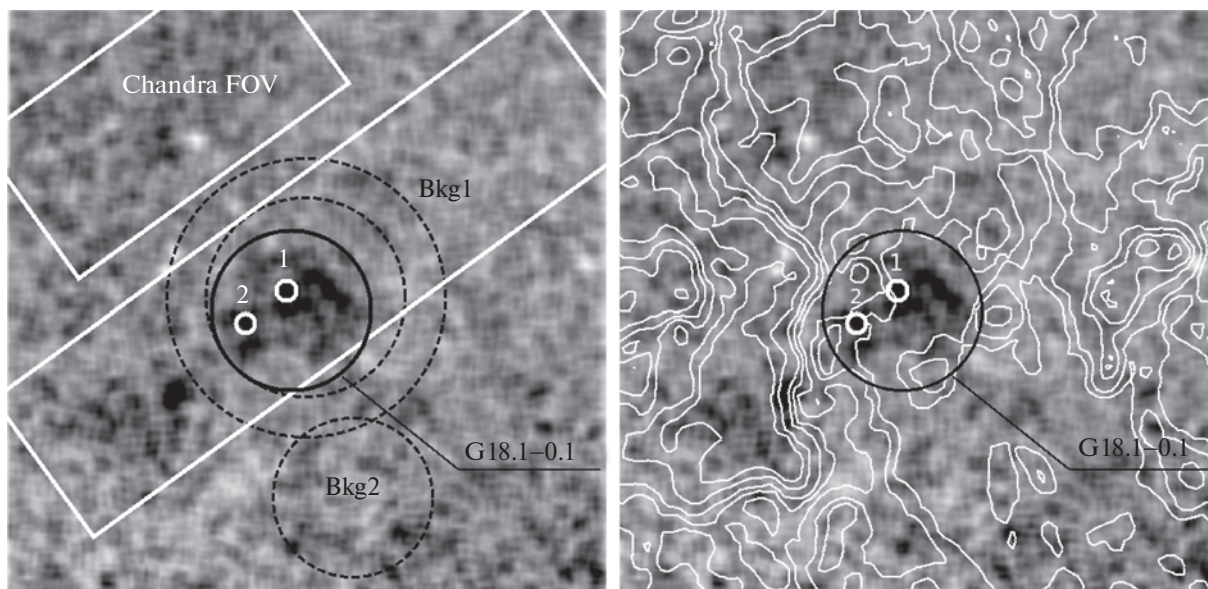


Рис. 1. Рентгеновская карта СРГ окрестности остатка G18.1-0.1. Более темный цвет на карте соответствует более ярким областям. Остаток целиком содержится внутри показанной черным цветом окружности (область SNR), спектр излучения которой использовался для анализа. Белыми окружностями показаны точечные источники 1 и 2, окрестности которых исключались из спектрального анализа. На левой панели черным пунктиром показаны кольцевая (bkg1) и круговая (bkg2) области фона. Белым цветом показано поле зрения обсерватории Chandra, наблюдавшей остаток с экспозицией ~ 10 кс. На правой панели на рентгеновскую карту наложены контуры радиоизлучения в молекулярной линии $^{13}\text{CO}(1-0)$ по данным обзора FCRAO GRS (Джексон и др. 2006).

с наложенными на нее контурами интенсивности излучения в молекулярной линии $^{13}\text{CO}(1-0)$ по данным обзора FCRAO GRS (Джексон и др., 2006), полем зрения обсерватории Chandra, наблюдавшей этот источник с экспозицией ~ 10 кс, и точечными источниками 1, 2, окрестности которых исключались из спектрального анализа (табл. 1). Центром круговой области 1 является положение точечного источника 2CXO J182437.6–131036 (каталог CSC¹ v.2), совпадающего с позицией пика рентгеновского излучения на карте СРГ, а также с позицией яркого инфракрасного точечного источника 18d24m37.6s–13d10m36.9s из каталога 2MASS² (Скруцки и др., 2006) в пределах $1''$. Эта позиция отстоит на ~ 7.5 угл. сек от положения точечного источника CXO J182438.1–131039 из каталога CSC v.1.1, который исследовался в работе Парон и др. (2013) и был отождествлен по своим спектральным свойствам рентгеновского излучения со звездой спектрального класса О (О3–О5). Оптический двойник для этого источника не был обнаружен. Поскольку в каталогах CSC версий 2 и 1.1 есть только один точечный источник в пределах $1'$ радиуса, можно заключить, что точечный

источник 2CXO J182437.6–131036 является уточненным положением источника CXO J182438.1–131039 из предыдущей версии каталога. Положение точечного источника 2, определенное по пику излучения на рентгеновской карте СРГ, отстает примерно на ~ 15 угл. сек от положения точечного источника $l \approx 18.17$, $b \approx -0.21$, обсуждавшегося в работе Лихи и др. (2014). Однако, учитывая то, что в 30-секундной окрестности этой области нет других точечных источников, а также погрешность записи координат источника в работе Лихи и др. (2014), равную ~ 30 угл. сек, наш источник 2 можно отождествить с источником $l \approx 18.17$, $b \approx -0.21$ Лихи и др. (2014). В данных наблюдений обсерватории Chandra также присутствует третий слабый точечный источник с координатами $l \approx 18.138$, $b \approx -0.218$, не обсуждавшийся в работе Лихи и др. (2014). Поток излучения от него в три раза меньше потока от CXO J182438.1–131039.

Спектральный анализ

Для спектрального анализа использовался пакет XSPEC³ v. 12.11.1 (Арnaud, 1996). Для моделирования излучения плазмы применялась спектральная модель APEC, описывающая излуче-

¹<http://exc.cfa.harvard.edu/csc/>

²<http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/2mass.html>

³<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

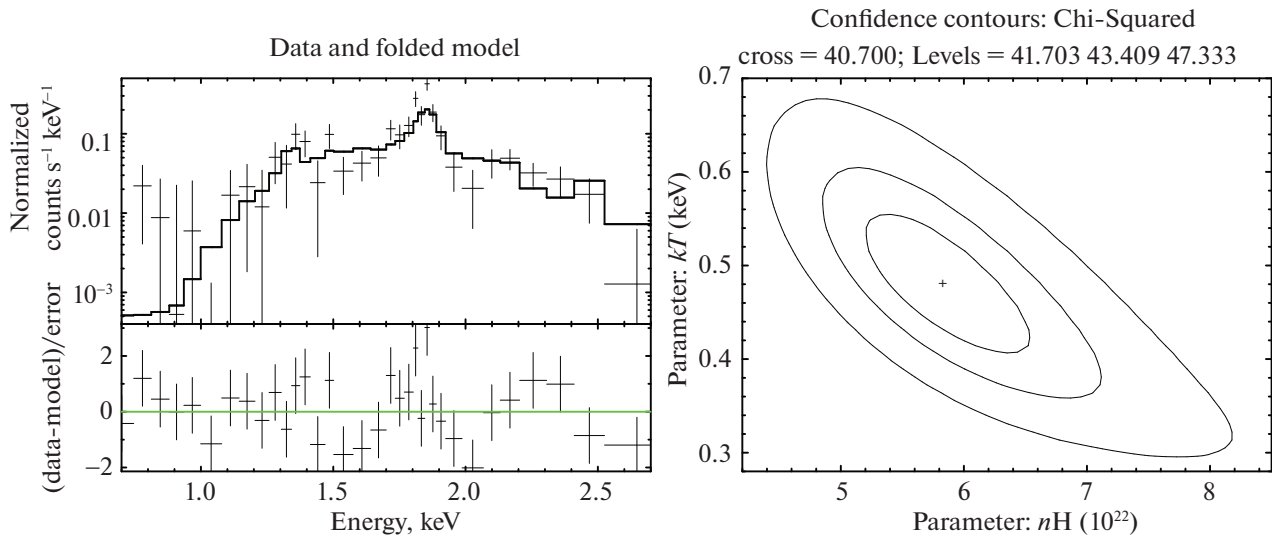


Рис. 2. На левой панели показан спектр излучения остатка вместе с аппроксимирующей его моделью *tbabs * apec*. На правой панели показаны контуры уровней значимости 1σ , 90 и 99% для параметров N_H и T спектральной модели излучения всего остатка *tbabs * apec*.

ние столкновительно ионизованного разреженного газа и использующая сечения из базы данных AtomDB⁴. Для учета межзвездного поглощения применялась модель TBABS с сечениями поглощения и соответствующими обилиями элементов из работы Вильмс и др. (2000).

Анализ проводился на основе комбинированных данных еРОЗИТА от телескопов 1–4, 6, поскольку они не подвержены эффектам светового излучения на низких энергиях. Спектр остатка был сгруппирован с помощью утилиты *grppha* пакета FTOOLS⁵ (Nasa High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (Heasarc) 2014) так, чтобы на каждый бин приходилось более 30 зарегистрированных фотонов. В качестве областей фона использовались кольцевая область *bkg1*, окружающая остаток, и круглая область *bkg2*, характеризующаяся слабым диффузным излучением и расположенная вблизи остатка (табл. 1). В обоих случаях параметры аппроксимирующих спектральные данные моделей совпадали между собой в пределах статистических ошибок, поэтому далее приводятся результаты, полученные при использовании фона из области *bkg1*. Из-за быстрого падения эффективной площади детекторов еРОЗИТА на энергиях выше 2.3 кэВ, анализ спектров проводился в диапазоне энергий 0.2–3.0 кэВ.

Параметры спектральной модели *tbabs * apec*, аппроксимирующей анализируемые спектры, при-

ведены в табл. 2. Спектр излучения всего остатка и контуры значимости для параметров N_H , T приведены на рис. 2. Полученные в результате аппроксимации значения температуры и N_H согласуются с результатом работы Лихи и др. (2014). В спектре остатка наблюдается сильная линия Si на энергии 1.7–1.84 кэВ. Для исследования этой спектральной особенности спектр всего остатка аппроксимировался моделью *tbabs * vares* с варьирующимся обилием Si и солнечным обилием остальных элементов. Было получено значение обилия Si, равное $2.0^{+1.5}_{-0.7}$ с ошибками на уровне значимости 90% (или $2.0^{+2.2}_{-1.0}$ с ошибками на уровне значимости 99%). Таким образом, в спектре остатка зарегистрировано превышение обилия Si над солнечным на уровне значимости $\approx 99\%$.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных еРОЗИТА построена карта рентгеновского излучения остатка G18.1-0.1 в диапазоне энергий 0.5–2.3 кэВ, скорректированная на экспозицию. На этой карте впервые идентифицировано диффузное рентгеновское излучение яркой асимметричной протяженной структуры остатка. Выполненный спектральный анализ излучения ОСН в диапазоне 0.2–3.0 кэВ показал, что его спектр может быть аппроксимирован моделью *tbabs * apec* со значением отношения χ^2 к числу степеней свободы ~ 1.1 . Полученные значения температуры плазмы $0.49^{+0.14}_{-0.13}$ кэВ и $N_H = 5.8^{+1.3}_{-1.0} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ в пределах ошибок хорошо

⁴<http://www.atomdb.org/>

⁵<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/>

Таблица 2. Параметры спектральных моделей, описывающих излучение остатка

Область	$N_{\text{H}}, 10^{22} \text{ см}^{-2}$	$T, \text{ кэВ}$	$N_a, \frac{10^{-14}}{4\pi D^2} \int n_e n_{\text{H}} dV$	dof	χ^2/dof
SNR	$5.8^{+1.3}_{-1.0}$	$0.49^{+0.14}_{-0.13}$	$4.8^{+14.2}_{-2.8} \times 10^{-2}$	37	1.14
SNR ^a	$5.5^{+1.7}_{-1.2}$	$0.46^{+0.15}_{-0.16}$	$3.9^{+22.6}_{-2.4} \times 10^{-2}$	36	0.97

^a Спектральная модель *tbabs* * *vapec*, варьирующееся значение обилия Si $2.0^{+1.5}_{-0.7}$.

Примечание. Приведены параметры моделей *tbabs* * *apex* (*tbabs* * *vapec*), ошибки указаны на уровне значимости 90%.

согласуются с результатом Лихи и др. (2014) ($T = 0.44^{+1.2}_{-0.7}$ кэВ, $N_{\text{H}} = (5.7 \pm 0.8) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$).

В спектре излучения остатка наблюдается сильное излучение в линии Si на энергии 1.7–1.84 кэВ. Полученная с использованием модели *vapec* с варьируемым обилием Si оценка показывает, что обилие кремния составляет $2.0^{+1.5}_{-0.7}$ солнечных. Это первое свидетельство несолнечного обилия элементов в остатке G18.1-0.1. Данные наблюдений G18.1-0.1 согласуются с интерпретацией оболочечного остатка на седовской стадии эволюции (Лихи и др., 2014), также как и для ряда других наблюдаемых молодых ОСН (Грин и др., 2009; Слейн и др., 2015). Избыток кремния в протяженной структуре, вероятно, связан с нагревом эжекты возвратной ударной волной. Такие структуры, в частности, обнаружены в наблюдениях еРОЗИТА другого ОСН G18.95-1.1 (Быков и др., 2002), также расположенного в центральном радиане Млечного Пути.

Поиск возможного компактного остатка звезды прародителя G18.1-0.1 пока не дает значимых результатов. В поле ОСН детектированы три дискретных рентгеновских источника, два из которых были обнаружены наблюдениями обсерватории Chandra и обсуждались в работах Парон и др. (2013) и Лихи и др. (2014). Точечный источник СХО J182438.1-131039 был предварительно идентифицирован Парон и др. (2013) с массивной звездой раннего спектрального класса. На основе имеющихся данных Chandra его $N_{\text{H}} = 2.2^{+0.8}_{-0.5} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и поток (поглощенный) $3.6^{+1.4}_{-1} \times 10^{-14} \text{ эрг/см}^2/\text{с}$. Что не совпадает в пределах ошибок со значением N_{H} , полученным для ОСН G18.1-0.1 $N_{\text{H}} = 5.8^{+1.3}_{-1.0} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Следует отметить, что полученные значения несколько отличаются от значений, полученных в работе Парон и др. (2013) из-за использующихся различных моделей межзвездного поглощения (TBABS в нашей работе и WABS в Парон и др., 2013). Спектр этого источника, построенный на основе данных обсерватории Chandra, приведен на рис. 3 (см. также

работу Парон и др., 2013). Можно отметить, что в спектрах СХО J182438.1-131039 и ОСН G18.1-0.1 наблюдается линия кремния, и он разумно описывается моделью теплового излучения оптически прозрачной плазмы.

Второй компактный источник с координатами $l \approx 18.17$, $b \approx -0.21$ (Лихи и др., 2014) и потоком $(2.3 \pm 1.2) \times 10^{-14} \text{ эрг/см}^2/\text{с}$, судя по наблюдениям обсерватории Chandra с высоким угловым разрешением, является протяженным с размером $\sim 30''$. Третий точечный рентгеновский источник с координатами $l \approx 18.138$, $b \approx -0.218$, видимый в данных наблюдений обсерватории Chandra, и не обсуждавшийся в работе Лихи и др. (2014), в 3 раза слабее, чем СХО J182438.1-131039, и его спектральный анализ требует большей доступной экспозиции. На карте еРОЗИТА его позиция проецируется на границу ОСН. Однако, учитывая слабость источника и угловое разрешение еРОЗИТА $\sim 16''$, собранная обсерваторией еРОЗИТА статистика не позволяет ни выделить этот источник на изображении, ни сделать значимые заключения о его спектре.

Работа основана на наблюдениях телескопа еРОЗИТА, расположенного на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ была построена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской Федеральной космической программы при участии Немецкого Центра Космических Исследований (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/еРОЗИТА был построен консорциумом немецких институтов во главе с МРЕ при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ был спроектирован, построен, запущен и эксплуатируется НПО Лавочкина и его субподрядчиками. Научные данные получены антеннами в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре, финансируемыми Роскосмосом. Данные еРОЗИТА, использованные в данной работе, были обработаны с использованием программного комплекса eSASS, разработанного немецким консорциумом еРОЗИТА, и собственного программного обеспечения для анализа данных,

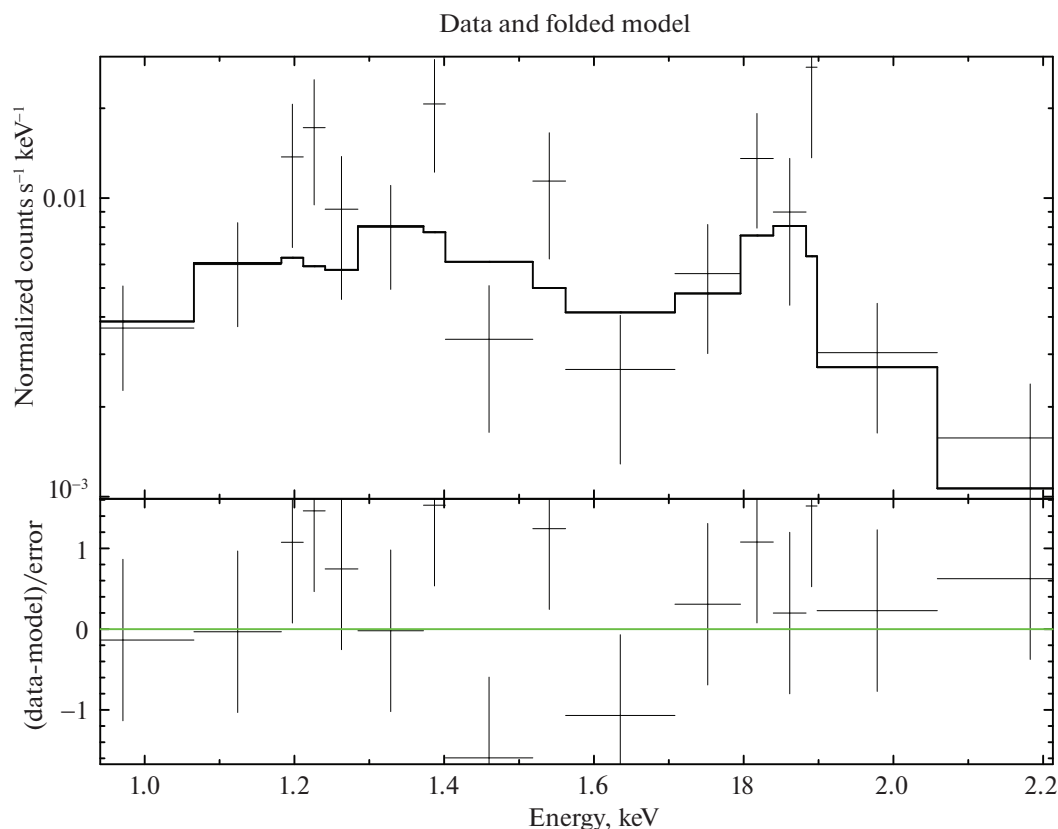


Рис. 3. Спектр излучения точечного источника 1 вместе с аппроксимирующей его моделью *tbabs * apec*.

разработанного российским консорциумом еРОЗИТА.

В статье используются данные обзора галактического диска в молекулярных линиях Бостонского университета — FCRAO Galactic Ring Survey (GRS). Анализ спектров источников А.М. Быкова был поддержан грантом РФФИ 21-72-20020. Часть вычислений была выполнена на компьютерах МСЦ РАН. Работы по построению изображений источников Ю.А. Уварова поддержаны в рамках темы 0040-2019-0025 ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнауд (K.A. Arnaud), In G.H. Jacoby and J. Barnes, eds., *Astron. Data Analys. Software and Systems V*, v. 101 of *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, p. 17 (1996).
2. Бродан и др. (C.L. Brogan, J.D. Gelfand, B.M. Gaensler, N.E. Kassim, and T.J.W. Lazio), *Astrophys. J.* **639**, L25 (2006).
3. Быков и др. (A.M. Bykov, Y.A. Uvarov, E.M. Churazov, M.R. Gilfanov, and P.S. Medvedev), *Astron. Astrophys.* **661**, A19 (2022).
4. Вильмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
5. Войсин и др. (F. Voisin, G. Rowell, M.G. Burton, A. Walsh, Y. Fukui, and F. Aharonian), *MNRAS* **458**, 2813 (2016).
6. Грин (D.A. Green), *Bull. Astron. Soc. India* **37**, 45 (2009).
7. Джексон и др. (J.M. Jackson, J.M. Rathborne, R.Y. Shah, R. Simon, T.M. Bania, D.P. Clemens, E.T. Chambers, A.M. Johnson, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **163**, 145 (2006).
8. Лихи и др. (D. Leahy, K. Green, and W. Tian), *MNRAS* **438**, 1813 (2014).
9. Одергард (N. Odegard), *Astron. J.* **92**, 1372 (1986).
10. Парон и др. (S. Paron, W. Weidmann, M.E. Ortega, J.F. Albacete Colombo, and A. Pichel), *MNRAS* **433**, 1619 (2013).
11. Предел и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, H. Böhringer, Bogomolov, A., et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
12. Ранасингх, Лихе (S. Ranasinghe and D.A. Leahy), *Astron. J.* **155**, 204 (2018).

13. Скруцки и др. (M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M.D. Weinberg, S. Schneider, J.M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, et al.), *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
14. Слэйн и др. (P. Slane, A. Bykov, D.C. Ellison, G. Dubner, and D. Castro), *Space Sci. Rev.* **188**, 187 (2015).
15. Сугизаки и др. (M. Sugizaki, K. Mitsuda, H. Kaneda, K. Matsuzaki, S. Yamauchi, and K. Koyama), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **134**, 77 (2001).
16. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, H. Brunner, R. Burenin, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
17. Фробрих и др. (D. Froebrich, S.V. Makin, C.J. Davis, T.M. Gledhill, Y. Kim, B.-C. Koo, J. Rowles, J. Eisloffel, et al.), *MNRAS* **454**, 2586 (2015).
18. Хьюит, Юзеф-Задех (J.W. Hewitt and F. Yusef-Zadeh), *Astrophys. J. Lett.* **694**, L16 (2009).
19. HEASARC (Nasa High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC)), HEASoft: Unified Release of FTOOLS and XANADU (2014).