

Поиск красных карликов среди объектов "первого света" и в области глубокого обзора экваториальной зоны неба по данным eROSITA

Алексей А. Шляпников 

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

aas@craocrimea.ru

Абстракт

В работе представлено отождествление звёзд нижней части Главной последовательности среди объектов «первого света» и глубокого обзора экваториальной области неба, выполненного телескопом eROSITA на орбитальной обсерватории Спектр-Рентген-Гамма. Из 2868 объектов «первого света» и 27910 рентгеновских источников eFEDS в первом случае 67, а во втором 110, возможно, являются кандидатами на идентификацию с красными карликами. 15 звёзд ранее были классифицированы, как рентгеновские источники. В области идентификации двух звёзд попадают галактики. Несколько отождествлений содержат близко расположенные объекты. Список идентифицированных объектов, комментарии к нему и поисковые карты доступны на сайте:

http://craocrimea.ru/~aas/CATALOGUES/CSAST/CSAST_X-ray.html.

Ключевые слова: рентгеновские источники, звёзды – красные карлики, идентификация.

1. Введение

Обнаружение рентгеновского потока от звёзд карликов нижней части Главной последовательности является признаком существования у этих объектов коронального излучения. Пребывая в спокойном состоянии и во время вспышек, температуры в коронах достигают миллионы градусов. Учитывая открытие значительного числа экзопланет вблизи красных карликов, изучение их рентгеновского излучения представляет особый интерес в связи с возможностью существования жизни на внесолнечных планетах.

Детектирование рентгеновского излучения у рассматриваемых объектов ранее было затруднено невысокой чувствительностью регистрирующего оборудования орбитальных обсерваторий, а их идентификация – значительной неоднозначностью в определении координат. После запуска обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (СРГ) [1] появилась возможность более глубокого обзора рентгеновских источников на значительных участках неба и, соответственно, идентификации среди этих объектов красных карликов.

Работа ориентирована на дополнение либо уточнение информации о рентгеновском излучении объектов, вошедших в новый «Каталог звёзд с активностью солнечного типа» (КЗАСТ), описание которого содержится в Приложении к монографии [2]. Ниже представлены исследования двух областей неба, наблюдения которых были выполнены телескопом eROSITA [3]. В первой части описан эксперимент по независимой обработке и возможной идентификации красных карликов в общедоступном изображении области «первого света» телескопа eROSITA. Вторая часть посвящена поиску звёзд нижней части Главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела, удовлетворяющих определённым критериям, среди объектов глубокого обзора экваториальной зоны неба по данным eROSITA [4]. В каждой части приведены гиперссылки к результатам проведенных исследований и идентификационным картам изученных объектов.

2. Наблюдательное оборудование и критерии отбора объектов

Обсерватория Спектр-Рентген-Гамма успешно запущена в июле 2019 года, а уже в декабре «первый свет» наблюдений на телескопе eROSITA, в составе бортового оборудования СРГ, был предоставлен широкому кругу астрономической общественности [5].

Рентгеновский телескоп eROSITA (extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array – телескоп для широкоугольного обзора в рентгеновском диапазоне) обладает значительным полем (~ 1 градус в диаметре) для регистрации неба в диапазоне энергий от 0.2 до 8.0 кэВ. Телескоп также может выполнять наблюдения больших участков неба. Максимальный поддерживаемый размер прямоугольников с равномерным сканированием области составляет 12.5×12.5 градуса.

Отбор объектов рентгеновского диапазона, обнаруженных в результате проводимого исследования, для включения или анализа уже имеющейся информации в КЗАСТ, осуществлялся следующим образом. Для перекрёстной идентификации рентгеновских источников со звёздами в изучаемых областях, производилась их выборка из второго набора данных каталога GAIA (Gaia DR2) [6]. Основным критерием отбора звёзд стало их расположение в нижней части Главной последовательности (рис. 1), т.е. удовлетворение следующим требованиям:

$$T_{\star} < 7000^{\circ} \text{ K} \quad (1)$$

$$L_{\star} < 1.1 L_{\odot} \quad (2)$$

$$L_{\star} \geq 6.136^{-6} \times T_{\star} - 0.022 \quad (3)$$

То есть, эффективная температура звёзд $< 7000^{\circ} \text{ K}$, светимость < 1.1 светимости Солнца. Неравенство 3 отсекает из каталога GAIA белые карлики, расположенные в нижней левой части диаграммы Герцшпрунга-Рассела. Дополнительно применялся критерий отбора по радиусу. Он должен был не превышать 1.1 радиуса Солнца.

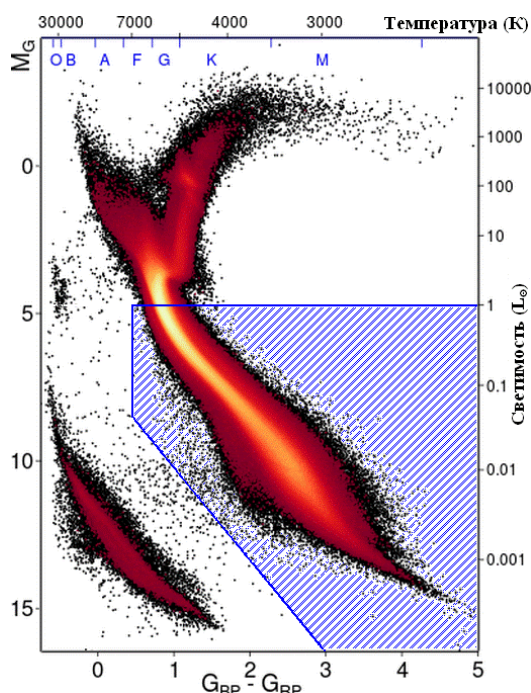


Рис. 1. Выделен штриховкой фрагмент диаграммы Герцшпрунга-Рассела, внутри которого отбирались звезды для идентификации с рентгеновскими источниками.

3. Область «первого света»

Как было отмечено выше, для обработки «первого света» наблюдений телескопа eROSITA использовалось изображение (рис. 2) представленное в открытом доступе на сайте [5].



Рис. 2.

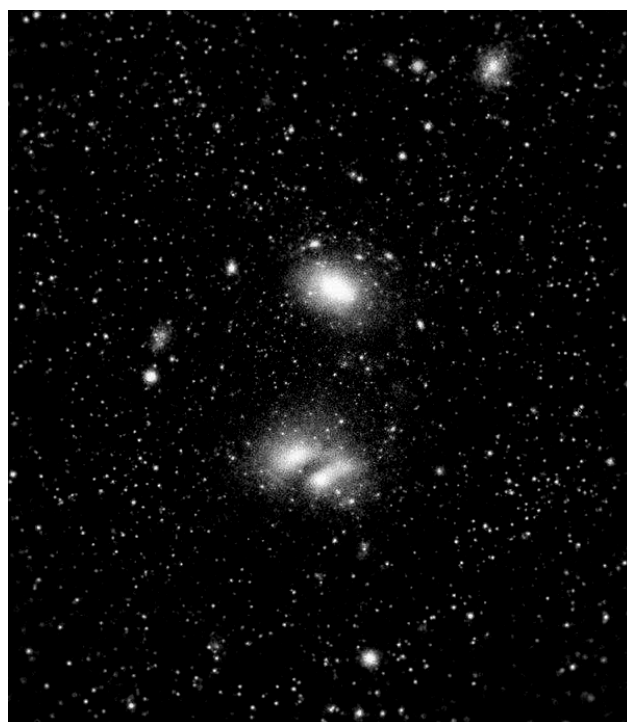


Рис. 3.

На рисунке 3 показано рабочее изображение, полученное путём комбинирования из трех рентгеновских диапазонов «цветного» изображение области взаимодействующих скоплений галактик ACO 3391 и ACO 3395.

3.1. Астрометрическая калибровка изображения и извлечение объектов

Для астрометрической калибровки рабочего изображения из базы данных SIMBAD [7] была выполнена выборка рентгеновских источников, попадающих в изучаемую область (квадратные синие маркеры на рис. 4). Учитывая, что среди найденных объектов многие имели «неточечную» морфологию, являясь галактиками, для повышения точности астрометрической калибровки отбирались лишь те, которые имели фотометрический профиль изображения наиболее близкий к звёздному, либо являлись звёздами.

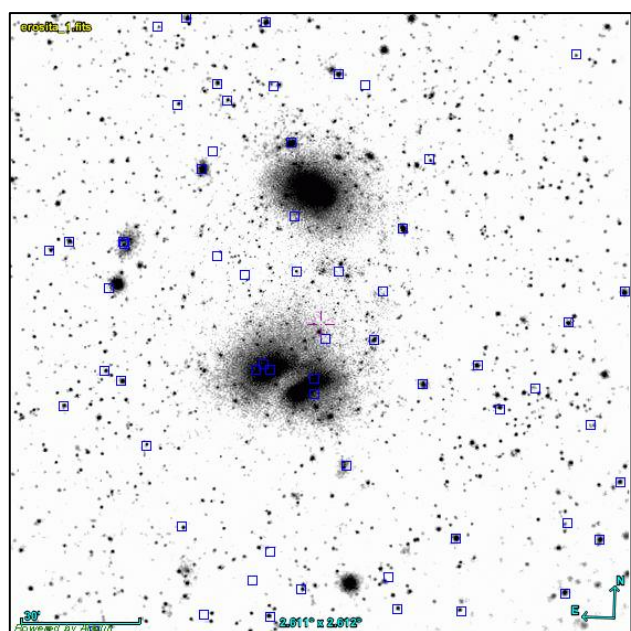


Рис. 4.

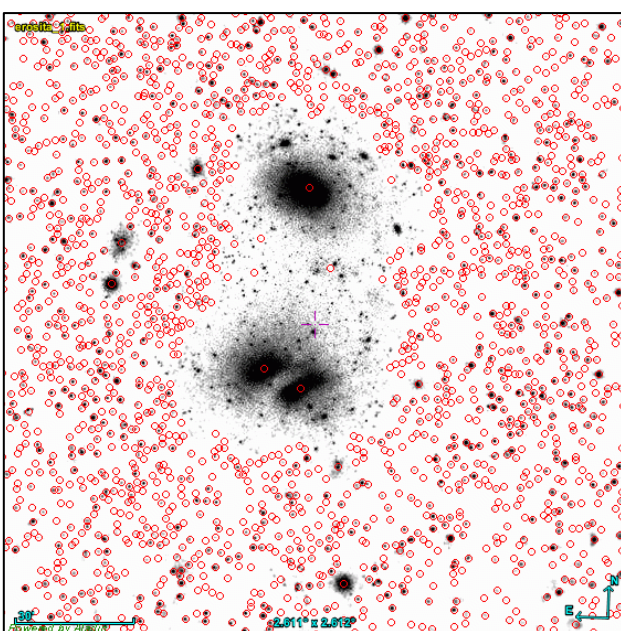


Рис. 5.

После выполнения астрометрической редукции изображение было обработано с помощью программы Sextractor [8]. 2485 объектов рентгеновского диапазона было выделено (маркеры – красные окружности на рис. 5). Обратим внимание на «зоны избегания» обусловленные значительным фоном от скопления галактик АСО 3391 и АСО 3395, в которых для выделения объектов необходима специальная обработка, что не планировалось при проведении данной работы.

3.2. Отождествление объектов

Учитывая, что размер пикселя в рабочем изображении составляет $\sim 15''$, поиск кандидатов на отождествление выделенных рентгеновских источников с оптическими объектами производился в области менее $40''$ для избегания краевых эффектов обработки. После перекрёстной идентификации выделенных рентгеновских источников с каталогом GAIA DR2 список совпадений составил 2868 объектов. Очевидно, что при размере поиска объектов GAIA DR2 в областях радиусом $< 20''$, имеют место неединичные совпадения. В данном случае в области рентгеновского излучения попадало до 6 объектов GAIA DR2. С целью получения однозначного соответствия между рентгеновскими источниками и красными карликами, области с неединичными совпадениями были исключены из дальнейшего рассмотрения. После их исключения в списке осталось 899 объектов, 67 из которых удовлетворяют критериям по температуре, радиусу и светимости, т.е. расположены в нижней части Главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рассела.

Поиск объектов из списка по базе данных SIMBAD в радиусе $20''$ дал три совпадения. В 5 угловых секундах от объекта с координатами R.A. = $94^{\circ}.66799$ и Decl. = $-52^{\circ}.76853$ находится галактика LEDA 438949. Однако звезда, представленная в списке на идентификацию, имеет параллакс 2.5014 mas , и собственные движения по прямому восхождению и склонению соответственно: -16.362 mas/yr и 5.604 mas/yr , т.е. не может быть галактикой, хотя по фотометрическим параметрам объекты могут быть близки.

Обнаруженный в процессе обработки наблюдений обсерватории eROSITA объект с координатами R.A. = $96^{\circ}.40647$ и Decl. = $-53^{\circ}.20178$ находится в $12''$ от положения рентгеновского источника 1RXS J062538.9-531207 (рис. 6.). Звезда – кандидат на отождествление с рентгеновским источником eROSITA отмечена цифрой 1. Малая красная окружность соответствует ошибке в определении координат 1RXS J062538.9-531207 ($10''$). Большая красная окружность – утроенный радиус. Зелёной окружностью отмечено положение источника eROSITA. Как видно по рисунку положения 1RXS и eROSITA перекрываются, а звезда из списка (отмечена цифрой 1) попадает в область eROSITA и при утроенном радиусе ошибок в область 1RXS.

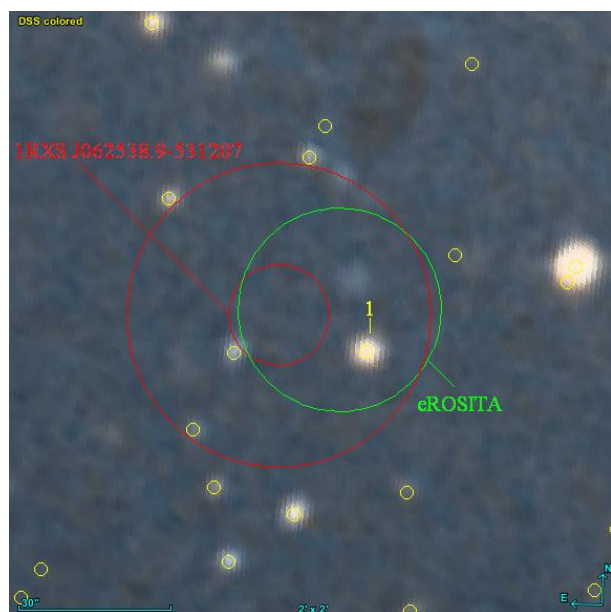


Рис. 6.

Возможно, источником рентгеновского излучения является неизвестный диффузный объект (галактика ?) над звездой.

Третий объект из базы данных SIMBAD – звезда CD-55 1454, находящаяся на самом краю поля области eROSITA с координатами R.A. = $96^{\circ}.50304$ и Decl. = $-55^{\circ}.10263$.

Рассмотрение её в качестве кандидата на отождествление с источником eROSITA требует дополнительных исследований.

Список отождествлённых объектов и поисковые карты размещены по адресу:

http://craocrimea.ru/~aas/CATALOGUES/CSAST/CSAST_eROSITA/CSAST_eROSITA_1.html.

4. Область eFEDS

Исследование экваториальной области неба (eFEDS - eROSITA Final Equatorial Depth Survey) стало самым длительным по времени наблюдением в период проверки возможностей приборов телескопа eROSITA. В целом было затрачено около 100 часов. Поле eFEDS имеет площадь примерно 140 град² и состоит из четырех отдельных прямоугольных областей сканирования по 35 град². Выбор площадки был обусловлен наличием значительного числа многоволновых наблюдений данной области неба [4].

По результатам глубокого обзора eFEDS было опубликовано два каталога рентгеновских источников: однозначно обнаруженные источники в диапазоне 0,2–2,3 кэВ и жесткие (2,3–5 кэВ) источники, наблюдавшиеся в многодиапазонном режиме [4]. В данной работе для идентификации объектов из нового каталога КЗАСТ [2] были выбраны 27910 рентгеновских источников с высокой степенью вероятности обнаружения, которые составляют основной каталог eFEDS [5].

4.1. Поиск красных карликов из КЗАСТ в каталоге eFEDS

Распределение на небесной сфере в проекции AITOFF звёзд из «Каталога звёзд с активностью солнечного типа» и область объектов eFEDS продемонстрирована на рис. 7. Каталог КЗАСТ (версия 2.0 от 8 августа 2021 года) содержит 314618 объектов.

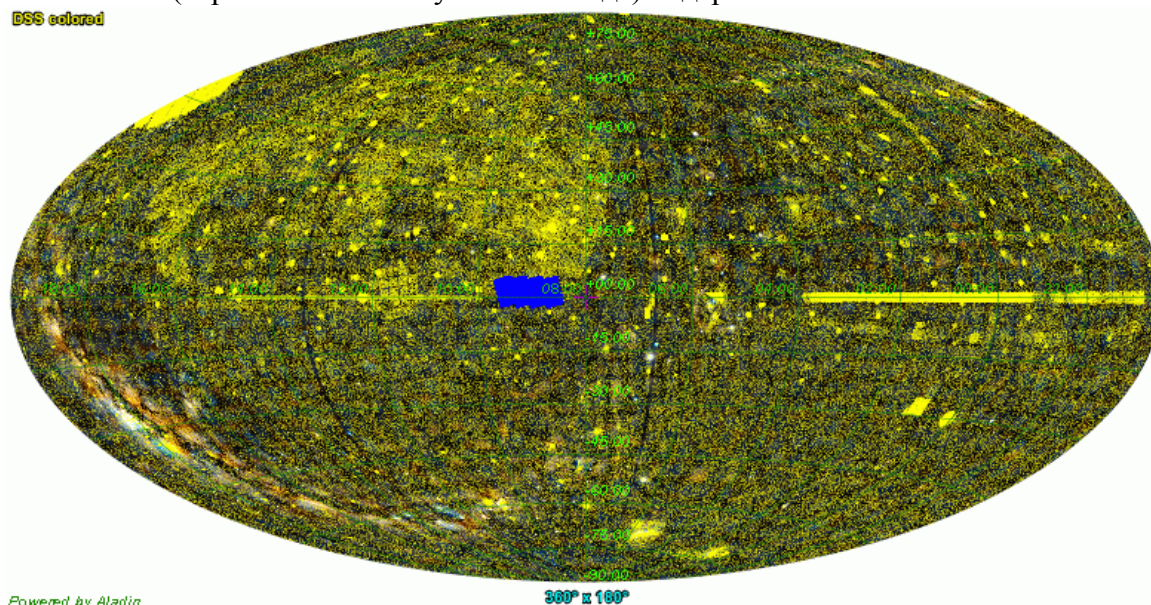


Рис. 7. Область eFEDS на фоне звёзд из каталога CSAST обозначена голубым цветом.

Более детальное распределение идентифицируемых объектов представлено на рис. 8. На нём бирюзовым цветом указаны объекты из каталога eFEDS, а желтыми маркерами обозначены звёзды из CSAST. Рисунок хорошо иллюстрирует четыре отдельные прямоугольные области сканирования eROSITA.

Для идентификации объектов из каталога eFEDS использовались откорректированные значения прямого восхождения и склонения объектов, а также комбинированная ошибка в определении координат. Рисунок 9 иллюстрирует гистограмму распределения числа ошибок в определении координат от их радиуса в угловых секундах для всех объектов eFEDS.

Учитывая, что средний радиус ошибок в определении координат eFEDS составляет 4.8 угловые секунды, поиск кандидатов на идентификацию производился в утроенном радиусе. На рисунках 10 и 11 показаны, соответственно, распределения: числа ошибок в определении координат для объектов – возможных кандидатов на отождествление с красными карликами и гистограмма числа объектов в зависимости от их расстояния до положения рентгеновского источника.

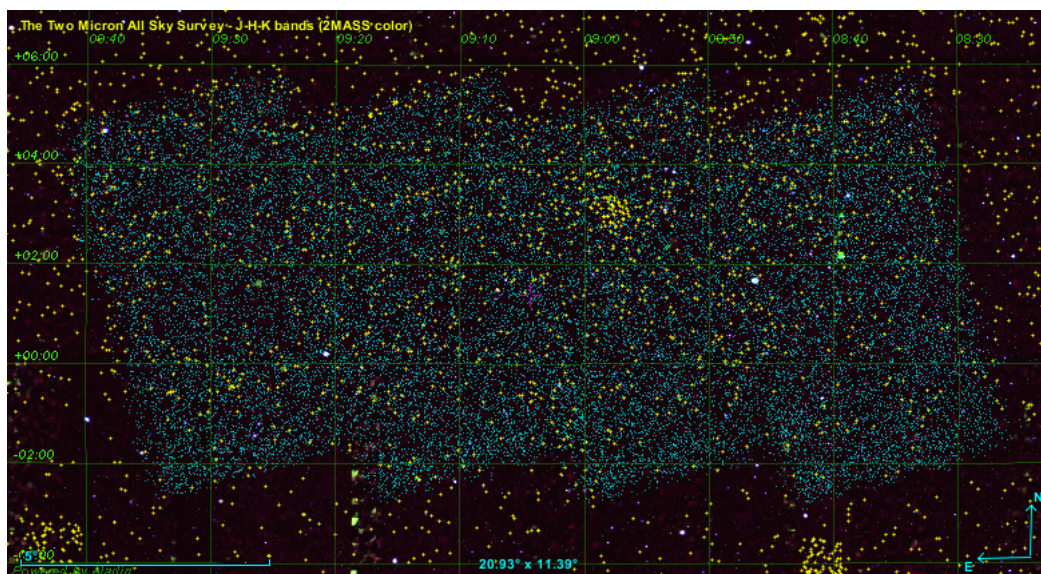


Рис. 8. Области eFEDS и звёзды из каталога КЗАСТ (пояснения в тексте).

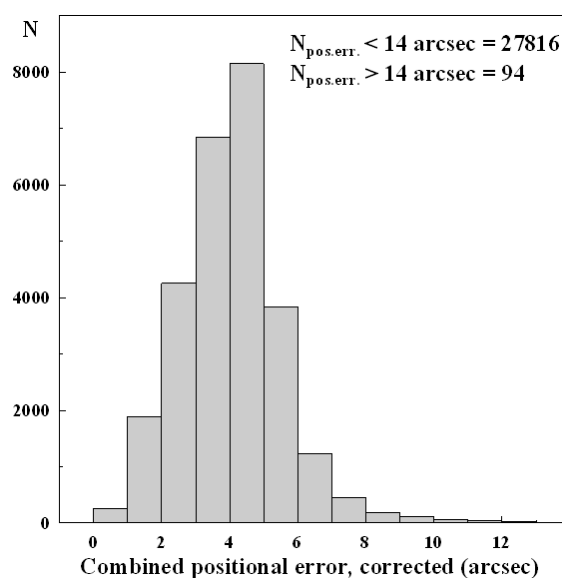


Рис. 9. Распределение числа ошибок в определении координат от их радиуса.

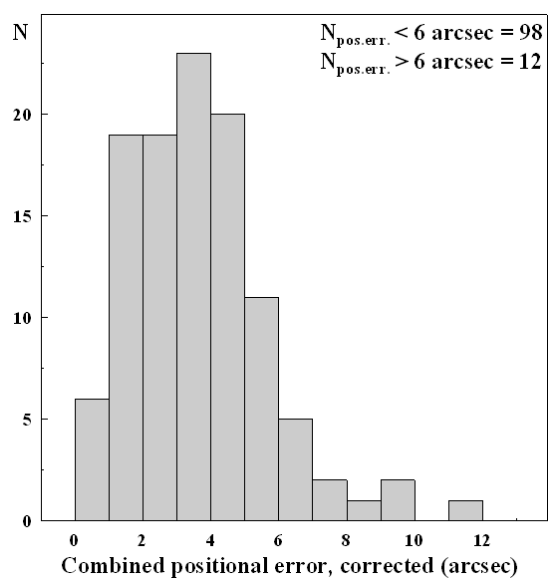


Рис. 10.

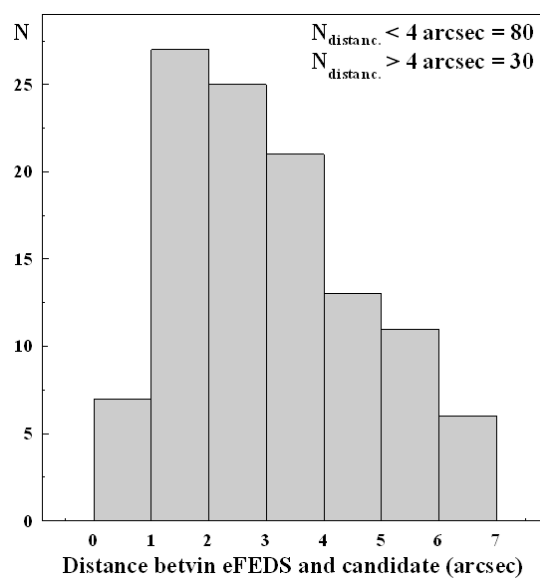


Рис. 11.

Рисунок 12 демонстрирует положение идентифицированных объектов на фоне распределения на небе рентгеновских источников из каталога eFEDS.

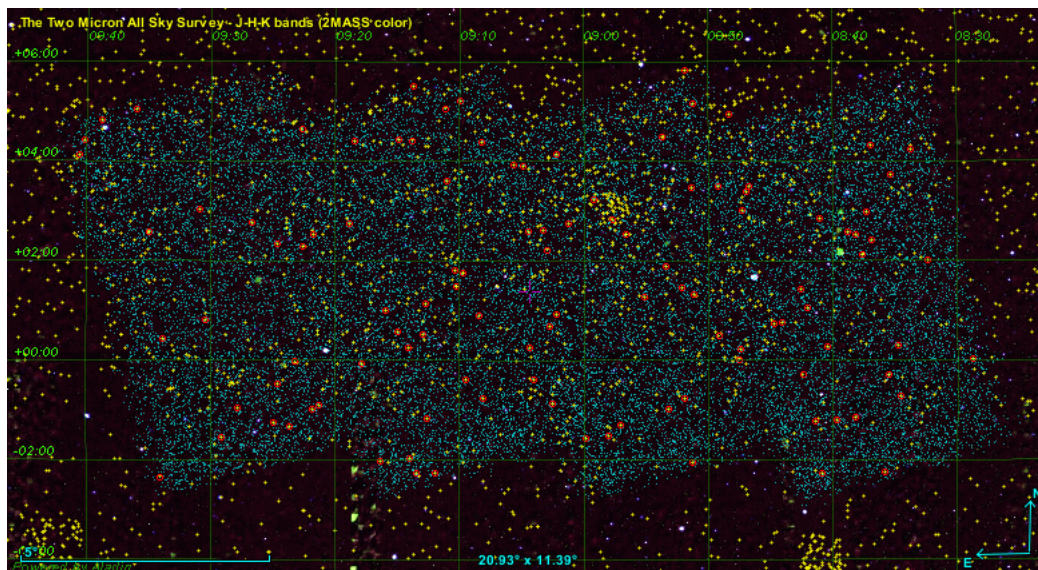


Рис. 12. Отождествлённые звёзды из каталога К3АСТ в областях eFEDS.

4.2. Анализ идентифицированных объектов

На странице «Список звёзд» (см. ссылку в конце раздела) из 110 звёзд указаны две области, в которые попадают известные галактики: галактика Сейферта 1-го типа - SDSS J084818.23+045643.1 со звёздной величиной в полосе $G_{\text{GAIA}} = 20^{\text{m}}.306$ (рис. 12) и галактика SDSS J090807.97-004613.9 с редуцированной по данным GAIA звёздной величиной в полосе $V = 19^{\text{m}}.039$. Эта галактика находится на расстоянии 5 угловых секунд ниже и правее звезды (рис. 13).

Галактика SDSS J084818.23+045643.1 является рентгеновским источником 1RXS J084818.2+045709, и, очевидно, ей необходимо дать предпочтение при идентификации с объектом из каталога eFEDS. У галактики SDSS J090807.97-004613.9 ранее рентгеновское излучение не зафиксировано, но, учитывая её близость к положению объекта из eFEDS, возможно именно она является кандидатом на отождествление. Зелёные окружности на рисунках – область ошибок в определении координат по eFEDS, красная окружность – утроенный диаметр.

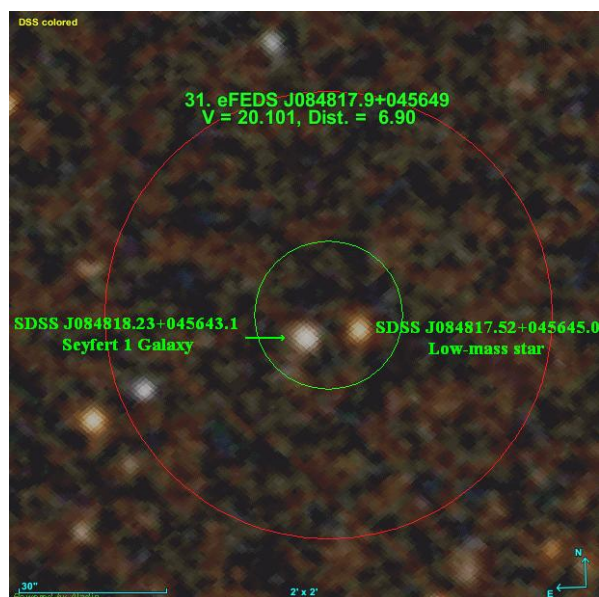


Рис. 12.

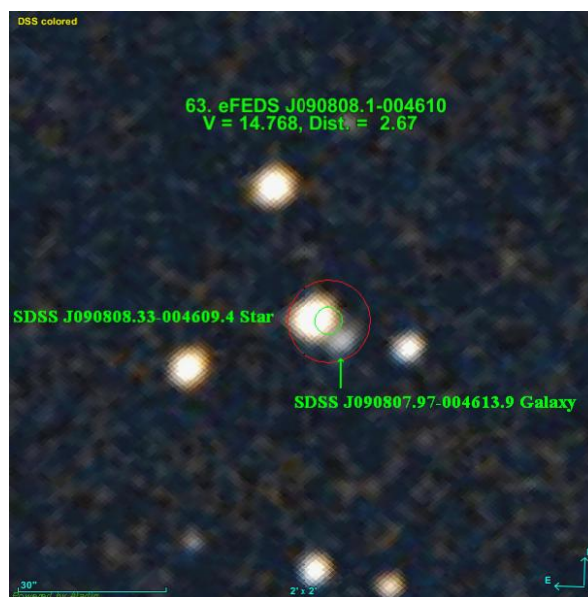


Рис. 13.

Отметим, также, что в девять областей локализации eFEDS попадает более одного объекта, а 12 звёзд ранее были классифицированы, как рентгеновские источники. Более подробно информация об объектах приведена в конце таблицы с идентификацией источников.

Список отождествлённых объектов и поисковые карты размещены по адресу:
http://craocrimea.ru/~aas/CATALOGUES/CSAST/CSAST_eROSITA/CSAST_eROSITA_2.html.

5. Примеры доступной информации

Рисунки 14 и 15 иллюстрируют доступную в on-line режиме информацию о проведенных исследованиях. На рис. 14 представлен фрагмент «Списка звёзд», которые были отождествлены с рентгеновскими источниками в области «первого света» наблюдений eROSITA, а рис. 15 – фрагмент страницы, содержащей идентификационные карты.

CSAST	Каталог звёзд с активностью солнечного типа											
	Рентгеновские источники в области «первого света» обсерватории eROSITA и возможные отождествления со звёздами нижней части Главной последовательности диаграммы Герцшпрунга - Рассела											
Home	Описание колонок таблицы: 1 – номер объекта в списке; 2 – прямое восхождение объекта eROSITA в градусах на эпоху 2000.0 года; 3 – склонение объекта eROSITA в градусах на эпоху 2000.0 года; 4 – прямое восхождение звезды – вероятного кандидата в градусах на эпоху 2000.0 года; 5 – склонение звезды – вероятного кандидата в градусах на эпоху 2000.0 года; 6 – угловое расстояние от звезды до положения центра области рентгеновского источника eROSITA; 7 – звездная величина в полосе G; 8 – звездная величина в полосе G_{BP}; 9 – звездная величина в полосе G_{RP}; 10 – показатель цвета G_{RP} - G_{BP}; 11 – эффективная температура звезды; 12 – радиус звезды в радиусах Солнца; 13 – светимость звезды в светимостях Солнца.											
1. About												
2. Input Catalogue												
3. CSAST structure												
4. CSAST+SIMBAD												
5. CSAST+VSX												
6. CSAST+SDSS												
7. CSAST+Kepler												
8. CSAST+TESS												
9. CSAST+KELT												
10. CSAST+GTS10												
11. CSAST+X-ray												
12. CSAST+UV												
13. CSAST+Radio												
14. Current Version												
15. Old Version												
16. News												
17. References												
18. Contact												
Nº	RAJ_eROS	DEJ_eROS	RAJ_20000	DEJ_2000	Dist.	G	G _{BP}	G _{RP}	G _{BP} -G _{RP}	T _{eff}	R _{sol}	L _{sol}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	94.26914978	-55.28723145	94.26224518	-55.28709793	14.15	16.3403	17.0111	15.5654	1.4457	4538.07	0.67	0.172
2	94.57939148	-53.55418396	94.58343506	-53.55323792	9.30	16.9229	17.4819	16.219	1.2629	5128.03	0.59	0.218
3	94.63776398	-53.60720825	94.63623047	-53.60751724	3.45	11.765	12.1338	11.2541	0.8797	5497	0.93	0.714

Рис. 14.

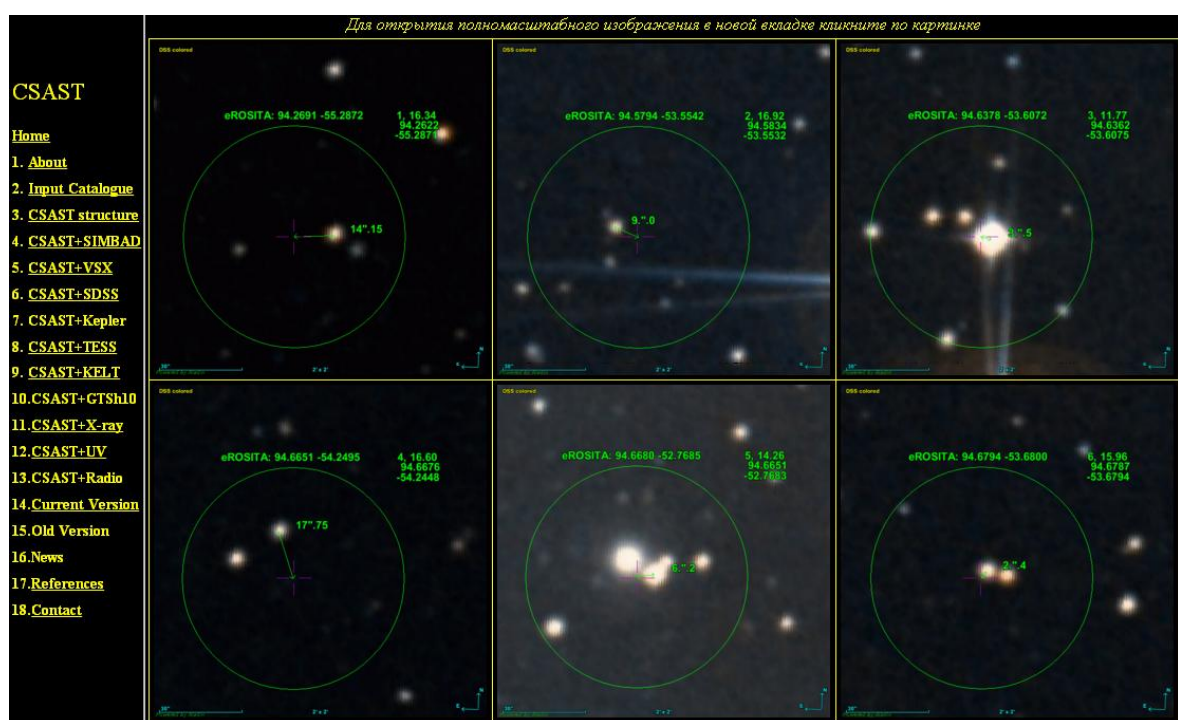


Рис. 15.

6. Заключение

В результате независимой обработки изображения «первого света», полученного при наблюдении на телескопе eROSITA, было выделено 2485 объектов рентгеновского диапазона. Из них 67 звёзд удовлетворяют критериям по температуре, радиусу и светимости, т.е. расположены в нижней части Главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Только у трёх объектов ранее было обнаружено рентгеновское излучение.

Среди объектов глубокого обзора экваториальной области неба eFEDS, выполненного телескопом eROSITA, произведена идентификация звёзд, попадающих в 110 полей, ограниченных радиусом ошибок в определении рентгеновских координат. 12 звёзд ранее были классифицированы, как рентгеновские источники, что подтверждает правильность независимого отождествления. В областях идентификации двух звёзд были обнаружены галактики, одна из которых является известным рентгеновским объектом. Несколько отождествлений содержат близко расположенные объекты.

На страницах, посвящённых идентификации красных карликов с рентгеновскими источниками «первого света» и областями eFEDS, даны: списки идентифицированных объектов с комментариями к ним и поисковые карты. Все области были проанализированы визуально. Сетевой доступ к представленной в работе информации осуществляется по ссылке: http://craocrimea.ru/~aas/CATALOGUES/CSAST/CSAST_X-ray.html.

Список объектов, ассоциированных с рентгеновскими источниками, зарегистрированными обсерваторией eROSITA, используется для анализа проявлений эруптивной активности звёзд по данным долговременных оптических наблюдений, выполняемых космическими и наземными средствами. А объекты, удовлетворяющие требованиям для включения в новый «Каталог звёзд с активностью солнечного типа», будут присоединены к КЗАСТ.

При выполнении работы активно использовались поддерживаемые Центром астрономических данных в Страсбурге приложения SIMBAD, VizieR и Aladin, а также система астрофизических данных SAO/NASA ADS. Ссылки на указанные ресурсы размещены на сайте (см. выше). Автор признателен всем, кто обеспечивает их работу и выражает благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за частичную поддержку проведённых исследований за счёт грантов № 19-02-00191 и № 19-29-11027.

Искренне благодарю М.М. Кацову и Р.Е. Гершберга за обсуждение данной работы и полезные замечания, которые улучшили её содержание.

7. Литература

1. Sunyaev R., Arefiev V., Babyshkin V. et al. The SRG X-ray orbital observatory, its telescopes and first scientific results // 2021, arXiv e-prints, arXiv:2104.13267.
2. Гершберг Р.Е., Клиорин Н.И., Пустильник Л.А., Шляпников А.А. "Физика звёзд средних и малых масс с активностью солнечного типа" / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2020. – 768 с. – ISBN 978-5-9221-1881-1. Приложение. Доступ к каталогу: <http://craocrimea.ru/~aas/CATALOGUES/CSAST/CSAST.html>
3. Predehl P., Andritschke R., Arefiev V. et al. The eROSITA X-ray telescope on SRG // Astron. Astrophys., 2021, 647A...1P.
4. Brunner H., Liu T., Lamer G. et al. 2021, arXiv e-prints, arXiv:2106.14517.
5. Reiprich T., Ramos-Ceja M., Pacaud F. et al. X-ray scout sees first light // <https://www.mpg.de/14056201/first-light-erosita>
6. Gaia collaboration. Gaia data release 2 (Gaia DR2) // 2018A&A...616A...1G
7. Wenger M., Ochsenbein F., Egret D. et al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 2000, 143, 9.
8. Bertin E., Arnouts S. SExtractor: Source Extractor // Astrophysics Source Code Library, record ascl:1010.064. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/2010ascl.soft10064B/abstract>
9. Доступ к каталогу eFEDS: <https://erosita.mpe.mpg.de/edr/eROSITAObservations/Catalogues/>