

## ОБЗОР СРГ/еРОЗИТА В ОБЛАСТИ ДЫРЫ ЛОКМАНА: КЛАССИФИКАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ

© 2022 г. М. И. Бельведерский<sup>1,2\*</sup>, С. Д. Быков<sup>3,4</sup>, М. Р. Гильфанов<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

<sup>4</sup>Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Проведена классификация рентгеновских источников, зарегистрированных телескопом СРГ/еРОЗИТА в глубоком обзоре области Дыры Локмана. Целью классификации было разделение источников на галактические и внегалактические объекты. Для этого использованы результаты выполненного нами ранее отождествления рентгеновских источников с оптическими каталогами. Для классификации использовано отношение потоков  $F_x/F_0$  и информация об оптической протяженности источника. В итоге из 6885 рентгеновских источников в каталоге еРОЗИТА 357 были классифицированы как галактические, 5929 — внегалактические, 539 — “бездомные”, т.е. не имеющие оптических партнеров в рассматриваемых оптических каталогах, а 60 остались неклассифицированными из-за недостаточной надежности данных оптической фотометрии. Сделаны оценки точности и полноты отбора для внегалактических (99.9 и 98.9% соответственно) и галактических (91.6 и 99.7%) источников. По результатам классификации построены кривые подсчетов галактических и внегалактических источников в поле Дыры Локмана.

*Ключевые слова:* обзоры неба в рентгеновском диапазоне, Дыра Локмана, активные ядра галактик, квазары, звезды активные в рентгеновском диапазоне, подсчеты источников.

DOI: 10.31857/S0320010822110031

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Орбитальная рентгеновская обсерватория “Спектр-РГ” (СРГ) была запущена 13 июля 2019 г. и в настоящий момент находится на гало-орбите вокруг точки либрации L2 системы Земля–Солнце (Сюняев и др., 2021). На борту обсерватории работают два рентгеновских телескопа с оптикой косоугольного падения — телескоп еРОЗИТА (Предел и др., 2021), чувствительный в диапазоне 0.2–9.0 кэВ и телескоп ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021), чувствительный в диапазоне 4–30 кэВ. По итогам четырехлетнего обзора всего неба телескоп еРОЗИТА задетектирует на всем небе около 4 млн рентгеновских источников различной природы, тем самым предоставив огромный объем данных для решения широкого спектра задач астрофизики и космологии (Прокопенко и Гильфанов, 2009; Мерлони и др.,

2012; Колодзиг и др., 2013a,b). Телескоп ART-XC исследует объекты жесткого рентгеновского излучения (Мереминский и др., 2018, 2019).

Для исследования популяций объектов различных типов, детектируемых в рентгеновских обзорах, прежде всего необходимо разделить объекты нашей Галактики (звезды, компактные объекты) и внегалактические объекты (галактики, АЯГ, квазары). Задача усложняется тем, что данные о расстояниях до рентгеновских объектов, как правило, недоступны (Сальвато и др., 2019). Поэтому приходится использовать дополнительную многоволновую информацию (например, оптические спектры или фотометрию), чтобы определить, является ли источник галактическим или внегалактическим. Методы включают в себя диагностику по спектральному распределению энергии (SED) (Сальвато и др., 2009; Марчеси и др., 2016), классификацию по положению на диаграммах цвет–звездная величина или цвет–цвет (Маккаро и др., 1988; Бруса и др., 2007, 2010; Ксю и др., 2011; Чивано и др., 2012; Сальвато и др., 2018, 2022), а

\*Электронный адрес: [belveder@cosmos.ru](mailto:belveder@cosmos.ru)

также идентификацию источников с собственным движением по данным Gaia или других астрометрических миссий (Коллаборация Гая, 2016, 2022). Например, в работе Сальвато и др. (2022) для решения этой задачи используется многоуровневая схема, в которой основными факторами классификации на галактические и внегалактические объекты являются протяженность объекта на оптическом изображении, его собственное движение, а также соотношение между оптическими ( $grz$ ), инфракрасными ( $W_1$ ) и рентгеновскими потоками (0.5–2 кэВ). Отметим, что для калибровки схем классификации необходимо, чтобы часть объектов имела известный класс с помощью спектроскопии или других надежных методов.

Целью настоящей статьи является классификация точечных рентгеновских источников, задетектированных телескопом ePOZITA в ходе глубокого обзора поля Дыры Локмана. Для классификации, помимо рентгеновских данных, мы используем данные астрометрического спутника Gaia и данные фотометрического обзора DESI LIS. Наш метод отличается простотой интерпретации и в дальнейшем может быть использован для построения более сложных алгоритмов классификации, в том числе для данных рентгеновского обзора всего неба.

В разделе 2 мы описываем используемые данные, в разделе 3 представлена выборка источников с надежной информацией о расстоянии, а также наш алгоритм классификации источников, расстояния до которых неизвестны. В разделе 4 мы описываем и обсуждаем полученные результаты, в разделе 5 делаем заключение.

В статье используются звездные величины системы AB.

## 2. ДАННЫЕ

### 2.1. Рентгеновские данные

Глубокий обзор области Дыры Локмана с помощью телескопа SRG/ePOZITA был проведен в октябре 2019 г. в ходе верификационных наблюдений обсерватории SRG. Характеристики обзора и процедура построения каталога рентгеновских источников и сам каталог приведены в работе Гильфанова и др. (2022). Каталог рентгеновских источников включает 6885 источников с правдоподобием ( $DET\_LIKE\_0$ ) > 10, что примерно соответствует значимости  $4\sigma$ .

### 2.2. Поиск оптических компаньонов рентгеновских источников

Важнейшим шагом, предшествующим классификации рентгеновских источников, является их отождествление с оптическими объектами. Эта задача не является тривиальной, так как круг ошибок рентгеновских источников может включать более одного оптического объекта, точное число зависит от глубины оптического каталога и положения на небе. В качестве опорного оптического каталога мы выбрали каталог DESI Legacy Imaging Surveys DR9 (Дей и др., 2019, далее DESI LIS). Отождествление рентгеновских источников ePOZITA с оптическими объектами из каталога DESI LIS было проведено в работе Быков и др. (2022). Для этой цели была использована нейросетевая модель характеристики фотометрических признаков популяций оптических компаньонов рентгеновских источников и оптических объектов поля в комбинации с кодом NWAY (Сальвато и др., 2018). Алгоритмы Nway основаны на байесовском формализме и позволяют использовать для поиска компаньонов любую дополнительную (помимо позиционной и фотометрической) приорную информацию. В работе Быков и др. (2022) для этого были использованы предсказания классификатора на основе нейронной сети, обученной на специально подготовленной выборке. В результате для каждого источника SRG/ePOZITA был найден наиболее вероятный оптический компаньон из каталога DESI LIS.

Для каждого рентгеновского источника в каталоге Дыры Локмана приведен параметр  $p_{\text{ану}}$ , который характеризует наличие у него оптического компаньона (Быков и др., 2022). Чем ближе этот параметр к единице, тем надежнее утверждение о том, что рентгеновский источник имеет компаньон в рассматриваемом оптическом каталоге, в то время как объекты с низким  $p_{\text{ану}}$  являются *бездомными* (hostless), т.е. в рассматриваемом оптическом каталоге компаньона не имеют. Следуя рекомендации, данной в работе Быков и др. (2022), мы выбрали верхнюю границу для классификации источника как бездомного  $p_{\text{ану},0} = 0.12$ . При таком выборе порога  $p_{\text{ану},0}$  539 источников (7.8%) классифицируются как бездомные. Их исследованию будут посвящены последующие публикации. Далее мы будем исследовать источники, классифицированные как имеющие компаньон в каталоге DESI LIS. Их полное число составляет 6346. Точность классификации и выбор порога по  $p_{\text{ану}}$  подробно обсуждаются в работе Быков и др. (2022).

### 2.3. Фотометрические, астрометрические и спектральные данные

Фотометрическая информация о компаньонах была взята из каталога DESI LIS. В этот каталог

входят обзоры, выполненные на трех телескопах: BASS (в фильтрах  $g$ ,  $r$ ), MzLS ( $z$ ) и DECaLS ( $g$ ,  $r$ ,  $z$ ). Для области Дыры Локмана были использованы данные BASS и MzLS, поскольку обзор DECaLS в этой области не проводился. Все потоки были поправлены на межзвездное поглощение.

Информация о собственном движении объектов была взята из каталога Gaia DR3 (далее Gaia, Коллаборация Гая 2016, 2022).

Для  $\sim 1/3$  рентгеновских источников имеется спектральная информация. Для них мы использовали спектральную классификацию и красные смещения из каталогов Sloan Digital Sky Survey DR16 (Аумада и др., 2020, далее SDSS) и The Million Quasars Catalogue<sup>1</sup> (Million Quasars Catalogue v7.5, Флэш и др., 2021, далее Milliquas). Каталог SDSS DR16 является четвертым релизом четвертой фазы Слоановского цифрового обзора неба (SDSS-IV). Каталог Milliquas является составным и содержит информацию о квазарах и активных ядрах галактик из различных источников, опубликованных вплоть до 30 апреля 2022 г. Дополнительно мы использовали базу данных Simbad (Венгер и др., 2000), в которой также содержится информация, собранная из различных источников. Отметим, что база данных Simbad не является каталогом, и поэтому информация, полученная из нее, будет иметь для нас пониженный приоритет по сравнению с другими источниками.

### 3. КЛАССИФИКАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ

#### 3.1. Отождествление с каталогом Gaia и спектрометрическими каталогами

При классификации рентгеновских источников и для их отождествления в других каталогах мы использовали координаты их наиболее вероятных оптических компаньонов из каталога DESI LIS.

Для классификации галактических объектов использована информация о параллаксах и собственных движениях источников из каталога Gaia DR3. Оптические компаньоны отождествлены с источниками Gaia, поиск проводился в пределах радиуса  $0.5''$ . Партнер в каталоге Gaia был найден для 2475 объектов DESI LIS. Для 8 источников в кружке поиска оказалось 2 источника Gaia, в этих случаях в качестве партнера выбирался ближайший. Галактическими были классифицированы источники, для которых отношение сигнала к шуму превысило 5 хотя бы для одного из следующих параметров:

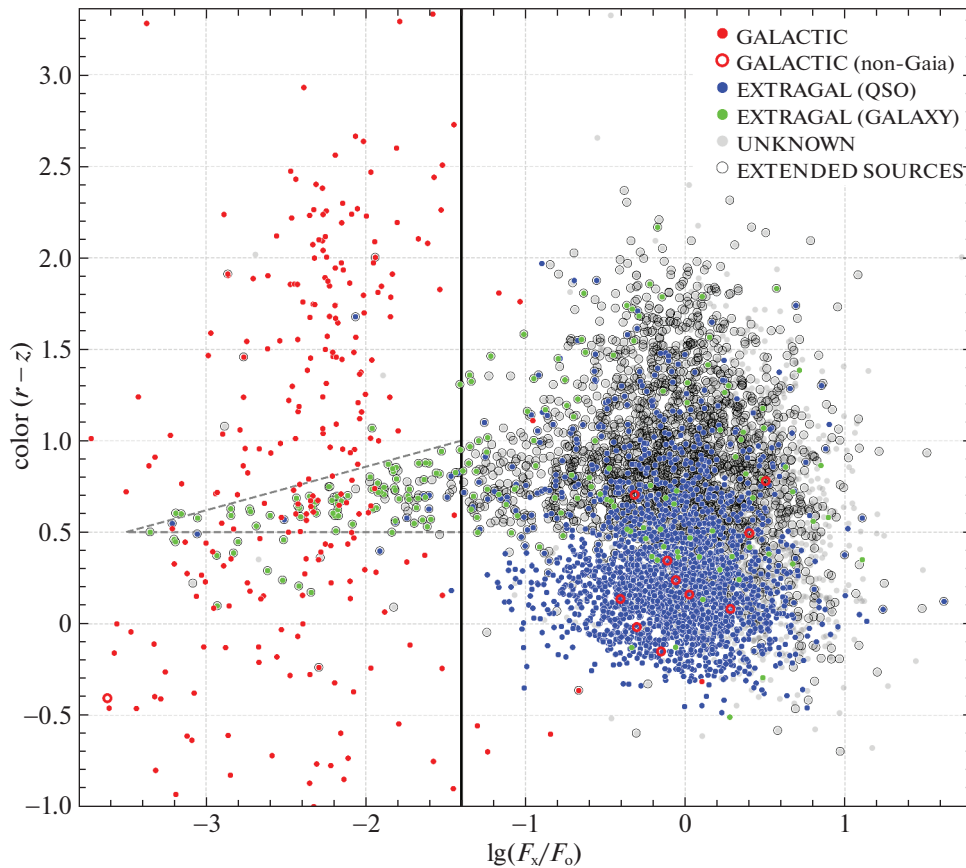
- $pmra$ , собственное движение в направлении прямого восхождения;
- $pmdec$ , собственное движение в направлении склонения;
- $pm$ , полное собственное движение,  $pm = \sqrt{pmra^2 + pmdec^2}$ ;
- $parallax$ , абсолютный звездный параллакс.

Всего было найдено 338 галактических источников. По рекомендации команды DESI коррекция на собственное движение источников Гая не проводилась из-за малой разницы (полгода) опорных эпох каталогов DESI и Gaia DR3 (Дастин Ланг, команда DESI, частное сообщение).

На следующем шаге мы идентифицировали источники, для которых есть данные оптической спектроскопии. Для этой цели мы использовали спектральные данные SDSS, Milliquas и базы данных Simbad. Поиск совпадений проводился с радиусом поиска  $1''$ . В случае SDSS и Milliquas в кружке поиска оказалось не более одного источника. Для Simbad в 72 случаях в кружке поиска оказалось два источника, в 21 случае — три. При этом только четыре объекта с неоднозначными сопоставлениями в Simbad не были отождествлены с каталогами Gaia, SDSS или Milliquas. Для этих объектов, как и в случае с Gaia, был выбран ближайший источник. Итоговая классификация объектов проводилась со следующим приоритетом: Gaia, SDSS, Milliquas, Simbad. Это означает, что в случае, если рассматриваемый объект не был классифицирован как галактический, согласно данным Gaia, то класс выставлялся в соответствии с данными SDSS<sup>2</sup> (и так далее). Каталог SDSS был отдан приоритет выше, чем Milliquas. Последний, хоть и содержит только надежные спектральные измерения, в свою очередь составлен из каталогов, созданных различными авторами (т.е. методологически неоднороден). При этом результат итоговой классификации меняется незначительно при назначении каталогу Milliquas более высокого приоритета, чем SDSS. Всего таким образом были определены классы для 2884 объектов из 6346.

<sup>1</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/all/milliquas.html>

<sup>2</sup>Среди 144 галактик, найденных с помощью каталога SDSS, 7 имели подкласс AGN. Такие объекты мы обозначили как квазары.



**Рис. 1.** Диаграмма  $\lg(F_x/F_0)$  — оптический цвет для точечных рентгеновских источников СРГ/еРОЗИТА в области Дыры Локмана. По вертикальной оси отложена разность между звездными величинами DESI LIS в фильтрах  $r$  и  $z$ . По горизонтальной оси отложен логарифм отношения рентгеновского потока в диапазоне 0.5–2 кэВ и оптического потока DESI LIS в фильтре  $z$ . Объекты, классифицированные по данным спутника Гайя или результатам оптической спектроскопии, изображены разными цветами, согласно легенде. Серым цветом обозначены объекты неизвестной природы, черными кружками — оптически протяженные объекты. Большинство галактических объектов расположено в левой части диаграммы (слева от границы, обозначенной сплошной вертикальной линией). Внегалактические объекты расположены преимущественно в правой части диаграммы, однако некоторые из них проникают в левую часть и концентрируются в треугольной области, ограниченной штриховой линией.

### 3.2. Диаграмма $F_x/F_0$ —цвет

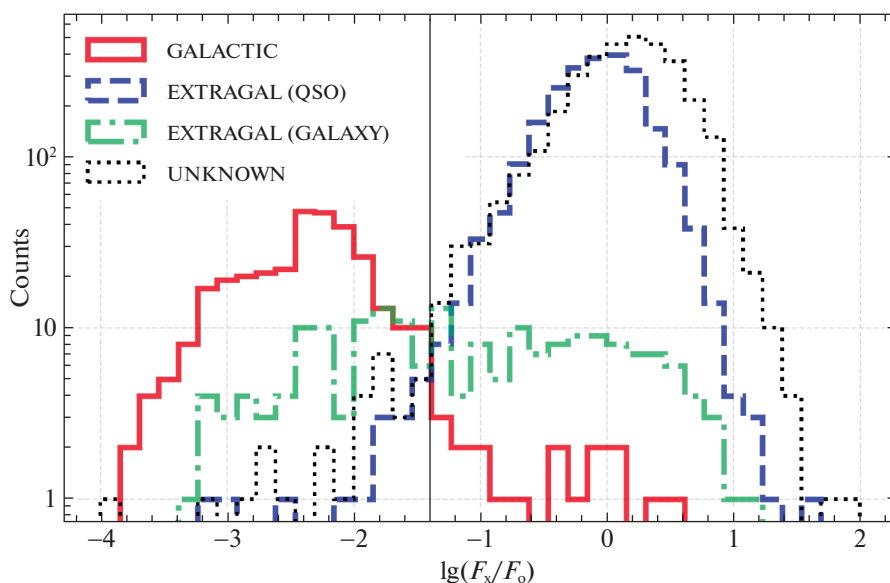
Для классификации остальных объектов мы исследовали характеристики объектов с известным классом. Из всех рассмотренных нами комбинаций параметров наиболее информативным и интересным с точки зрения астрофизики оказался логарифм отношения рентгеновского (диапазон 0.5–2 кэВ) и оптического (в фильтре  $z$ ) потоков в сочетании с оптическим цветом ( $r - z$ ) и информацией из DESI LIS об оптической протяженности объекта.

На рис. 1 рентгеновские источники нанесены на плоскости  $\lg(F_x/F_0)$ —оптический цвет ( $r - z$ ). Объекты, природа которых подтверждена по измерениям Gaia или по результатам оптической спектроскопии, обозначены разными цветами. Источники, которые не удалось классифицировать на

основе спектральных данных и информации о собственном движении, отмечены серыми кружками. Черными окружностями отмечены источники, которые являются протяженными согласно каталогу DESI LIS (type  $\neq$  PSF).

Из анализа рис. 1 можно сделать следующие выводы:

1. Видно, что галактические объекты (красные кружки) находятся преимущественно в левой части этой диаграммы, в области низких значений  $\lg(F_x/F_0)$ , а внегалактические (зеленые и синие кружки) — справа. Это выражение хорошо известного факта, что звезды в среднем имеют более низкие отношения  $\lg(F_x/F_0)$ , чем АЯГ и квазары (Маккакаро и др., 1988; Марчеси и др., 2016; Сальвато и др., 2018; Хасингер и др., 2021). Отметим, что 57 галактических источников оказались



**Рис. 2.** Распределения галактических (красная сплошная линия) и внегалактических (зеленая штрихпунктирная и синяя штриховая для галактик и квазаров соответственно) источников по  $\lg(F_x/F_o)$ . Распределение источников без класса показано пунктирной линией. Классификация источников проведена на основе данных каталога Gaia, спектральных каталогов и базы данных Simbad, как описано в тексте. Видно, что отношение рентгеновского и оптического потоков достаточно хорошо разделяет галактические источники и квазары. В то же время для разделения галактических источников и галактик требуется дополнительная информация.

за нижней границей рис. 1. Все эти источники ярче величины 15 в фильтре  $g$  и могут быть пересвечены на изображениях DESI LIS, так что их цвет, определенный по данным DESI LIS, может быть искажен. Данные Gaia однозначно указывают на их галактическую природу, а возможные искажения их оптического цвета не оказывают влияние на результаты классификации источников.

На рис. 2 приведены распределения по  $\lg(F_x/F_o)$  для галактических (красная сплошная линия) и внегалактических (зеленая штрихпунктирная и синяя штриховая для галактик и квазаров соответственно) источников. На основе рис. 1 и 2 мы ввели условную границу  $\lg(F_x/F_o) = -1.4$ , разделяющую звезды и квазары. Эта граница показана на рис. 1 сплошной вертикальной линией.

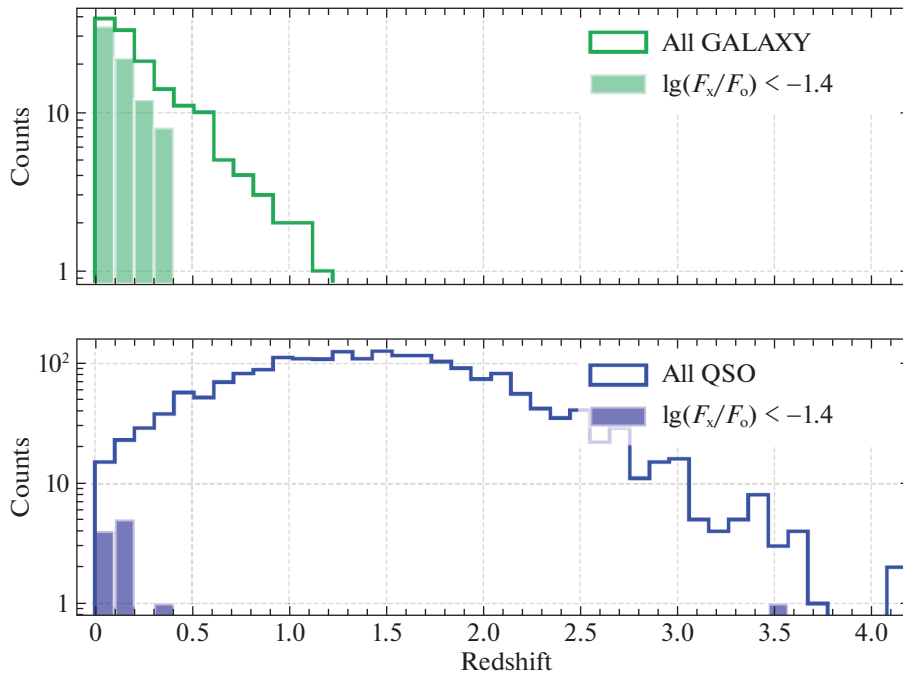
2. Небольшая доля внегалактических объектов (в основном галактики<sup>3</sup>) проникают в левую часть графика в районе цвета  $r - z \sim 0.5$ .

<sup>3</sup>Отметим, что рентгеновские источники eРОЗИТА, классифицированные как “галактика”, как правило, имеют активное ядро низкой или умеренной светимости, так что в оптическом диапазоне заметную роль играет излучение звездного населения. При этом их излучение в рентгеновском диапазоне определяется аккрецией на сверхмассивную черную дыру.

На рис. 1 эта область отмечена штриховой линией в форме треугольника, однако видно, что часть внегалактических объектов может находиться и ниже обозначенной области. Также видно, что упомянутая область равномерно заполнена звездами: их плотность в ней не уменьшается по сравнению с другими частями левой половины диаграммы.

Важно отметить, что большинство (81%) неклассифицированных объектов в левой части диаграммы являются оптически протяженными, что свидетельствует об их внегалактической природе. Это можно объяснить тем, что внегалактические объекты, проникающие в левую часть диаграммы, — это, как правило, относительно близкие галактики, которые сравнительно легко разрешаются современными оптическими телескопами. Это иллюстрирует рис. 3, на котором изображено распределение по красному смещению внегалактических объектов из разных частей диаграммы  $\lg(F_x/F_o)$ –цвет.

3. Небольшое число (24) галактических объектов расположены в правой части диаграммы  $\lg(F_x/F_o)$ –цвет. Эти галактические объекты имеют высокие значения  $\lg(F_x/F_o)$ , не характерные для звезд, и, по-видимому, являются катаклизмическими переменными



**Рис. 3.** Распределение по красному смещению внегалактических объектов из разных частей диаграммы рис. 1. Распределение для галактик представлено на верхней панели, для квазаров — на нижней. На обеих панелях линиями обозначены распределения всех источников указанного типа из исследуемой выборки, закрашенными столбиками — распределения соответствующих типов объектов из левой части диаграммы рис. 1 ( $\lg(F_x/F_o) < -1.4$ ). Видно, что в левую часть диаграммы рис. 1 попадают объекты с малыми красными смещениями.

и/или активными двойными и т.п. Некоторые из них, расположенные вблизи границы, могут быть звездами М-класса. Интересно отметить, что половина (12) объектов с высоким  $\lg(F_x/F_o)$  были идентифицированы по спектроскопическим данным, а не по измерениям спутника Gaia. Подробному исследованию и классификации этих объектов будет посвящена одна из следующих статей цикла публикаций по Дыре Локмана.

### 3.3. Алгоритм классификации

На основе анализа диаграммы на рис. 1 мы сформулировали алгоритм классификации рентгеновских источников каталога Дыры Локмана. Отметим, во-первых, что данный алгоритм не претендует на универсальность и подстроен под конкретные параметры глубокого обзора области Дыры Локмана с помощью телескопа eРОЗИТА. Во-вторых, нашей целью на данном этапе является бинарная классификация рентгеновских источников в Дыре Локмана на галактические и внегалактические источники. Обобщение алгоритма классификации, основанного на изложенных здесь идеях, будет сделано в последующих работах.

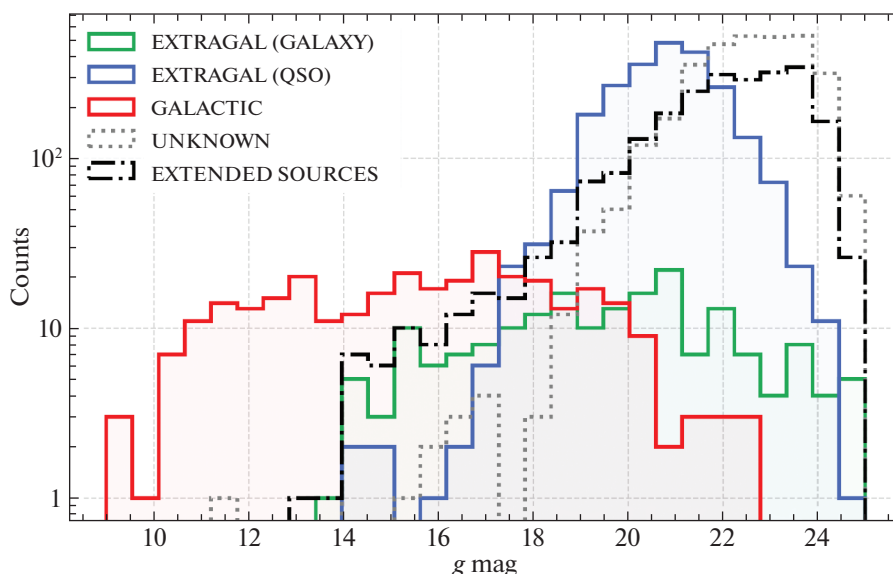
Схема классификации состоит из следующих четырех шагов:

1. Галактические источники были классифицированы по данным Gaia (338) или по данным спектральных каталогов (13).
2. Внегалактические источники были классифицированы по данным спектральных каталогов и Simbad (2339 квазаров, 194 галактики).

Источники, которым не удалось назначить класс на основе данных Gaia или спектральных каталогов, обрабатывались так:

3. Все оптически-протяженные источники (в каталоге DESI LIS type  $\neq$  PSF) были классифицированы как внегалактические (1804 источника).
4. Точечные источники классифицировались в соответствии с  $\lg(F_x/F_o)$ . При  $\lg(F_x/F_o) > -1.4$  источники классифицировались как внегалактические (1592 источника), а при  $\lg(F_x/F_o) < -1.4$  как галактические (6 источников).

Пункт 4 этой схемы основывается на том факте, что внегалактические источники составляют более 99.9% от всех источников с известным классом



**Рис. 4.** Распределения галактических и внегалактических источников, описанных в подразделе 3.3, по звездной величине  $g$ . Галактические объекты (красная сплошная линия) в среднем ярче внегалактических (синяя и зеленая линии для квазаров и галактик соответственно). Черной штрихпунктирной линией показано распределение оптически протяженных источников. Неклассифицированные объекты (серая пунктирная линия) в среднем менее яркие, чем те, которым удалось назначить класс на основе данных каталога Gaia, спектральных каталогов и Simbad.

справа от вертикальной линии на рис. 1 (т.е. с  $\lg(F_x/F_0) > -1.4$ ), а 99.7% из всех точечных источников слева от этой линии являются галактическими. Отметим, что такая классификация приводит к “потере” галактических объектов с высоким  $\lg(F_x/F_0)$ , однако в рамках бинарной классификации, которая является нашей целью, эта потеря незначительна, как это следует из приведенных выше чисел. Более подробно это обсуждается в следующем разделе. Количество протяженных и точечных источников для каждого класса приведено в табл. 1.

На рис. 4 приведены распределения источников, упомянутых в разных пунктах алгоритма классификации, по звездной величине в фильтре  $g$ .

**Таблица 1.** Количество оптически протяженных и точечных источников по классам

| Тип источника              | Точечные | Протяженные |
|----------------------------|----------|-------------|
| Галактический              | 333      | 5           |
| Галактический (не по Gaia) | 12       | 1           |
| Галактика                  | 28       | 166         |
| Квазар                     | 1886     | 453         |
| Неклассифицированный       | 1626     | 1836        |

**Примечание.** Практически все галактические объекты — точечные. Оптически протяженные галактические объекты обсуждаются в подразделе 4.2.

Неклассифицированные объекты (серая пунктирная линия) в среднем менее яркие в оптике, чем те, которым удалось назначить класс на основе данных каталога Gaia и спектральных каталогов (подробнее см. подраздел 3.4).

Из 6885 источников каталога мы рассмотрели 6346 источника с компаньоном ( $p_{\text{ану}} > 0.12$ ). Для 2884 из них класс удалось назначить на основе сторонних каталогов или базы данных Simbad (см. подраздел 3.1). Из оставшихся 3462 объектов 60 имеют оптический поток в фильтре  $z$  в каталоге DESI LIS с отношением сигнал/шум  $< 3$ . Эти объекты не были классифицированы, так как отношение  $F_x/F_0$  для них мы считали неизвестным. 3402 источника были классифицированы по прави-

**Таблица 2.** Количество внегалактических и галактических источников среди объектов, класс которым был назначен на основе сторонних каталогов или базы данных Simbad (см. подраздел 3.1), а также классифицированных по правилам, описанным в подразделе 3.3

| Способ классификации | Внегалактические | Галактические |
|----------------------|------------------|---------------|
| По каталогам (2884)  | 2533             | 351           |
| По правилам (3402)   | 3396             | 6             |
| Итого (6286)         | 5929             | 357           |



лам, описанным выше. В табл. 2 приведено итоговое количество внегалактических и галактических источников.

### 3.4. Метрики качества классификации

Для оценки качества классификации мы использовали выборку из 2864 объектов, которым удалось назначить класс на основе каталога Gaia, спектральных каталогов и базы данных Simbad, и у которых оптический поток в фильтре  $z$  определен надежно (далее — валидационная выборка).

Стоит отметить, однако, что составленная таким образом валидационная выборка не является вполне репрезентативной, поскольку подвержена эффектам селекции. В первую очередь, это связано с тем, что для спектроскопических программ SDSS выбирались объекты, удовлетворяющие определенным критериям в соответствии со специфическими целями этих наблюдательных программ. Кроме того, для спектроскопических наблюдений обычно выбираются надежные (и, в среднем, более яркие) цели. По этой причине валидационная выборка содержит в среднем более яркие источники (см. рис. 4). Для достижения необходимой точности определения метрик качества требуются валидационные выборки большого размера, в то же время существует лишь ограниченное число источников массовой спектроскопической информации для большого числа объектов. Поэтому составление репрезентативной валидационной выборки является общей трудностью, с которой сталкиваются создатели методов классификации объектов, эта задача выходит за рамки данной статьи.

Сформированная нами валидационная выборка позволяет провести оценку качества бинарной классификации на галактические и внегалактические объекты. Для этого к источникам из этой выборки мы применили пункты 3 и 4 алгоритма классификации так, как будто классы этих источников нам неизвестны. Результаты сравнения предсказанных и реальных классов обсуждаются ниже.

Введем метрики полноты и точности бинарной классификации. При классификации могут быть допущены ошибки двух типов: мы можем ошибочно назвать внегалактический источник галактическим или наоборот. Обозначим внегалактические объекты как положительный (positive) класс. Тогда галактический объект, неправильно классифицированный как внегалактический, даст ложноположительный (false positive, FP) результат. Галактический объект, классифицированный как внегалактический — ложноотрицательный (false negative, FN) результат. Полнота для классификации внегалактических источников вычисляется по формуле  $TP/(TP + FN)$ , а точность как

$TP/(TP + FP)$ , где TP (true positive) — число правильно классифицированных внегалактических источников. Аналогично вычисляются метрики для галактических источников в качестве положительного класса.

На валидационной выборке нам удалось правильно классифицировать 2529 внегалактических объектов и 306 галактических. При этом 28 галактических объектов были ошибочно классифицированы как внегалактические и 1 внегалактический объект — как галактический. Полнота и точность таким образом составляют

- $99.96 \pm 0.04$  и  $98.90 \pm 0.2\%$  соответственно при отборе внегалактических источников,
- $91.62 \pm 0.5$  и  $99.67 \pm 0.1\%$  соответственно при отборе галактических источников.

Статистические неопределенности, приведенные выше, были посчитаны в предположении биномиального распределения.

Мы также повторили выше приведенные вычисления, разделив выборку на две половины и используя одну из них для выбора параметров алгоритма классификации, а другую — для определения метрик полноты и точности, и получили результаты, аналогичные описанным выше.

В соответствии с обсуждением в предыдущем подразделе (см. обсуждение после п. 4 классификационной схемы), 28 из 29 неправильно классифицированных объектов приходится на случаи, когда галактический объект ошибочно классифицируется как внегалактический. Среди них оказываются практически все (12 из 13) объекты из валидационной выборки, принадлежность которых к галактическим была определена не на основе данных Gaia (см. подраздел 4.2 и табл. 4). При этом все они имеют нехарактерно высокие значения  $F_X/F_0$ .

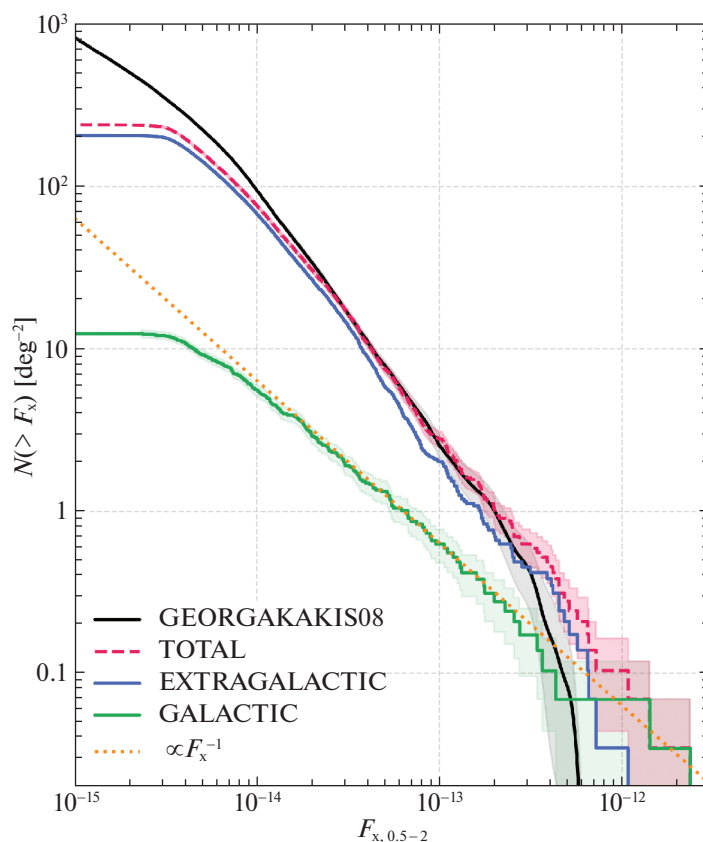
## 4. ОБСУЖДЕНИЕ

### 4.1. Кривые подсчетов $\log N - \log S$ галактических и внегалактических источников

На рис. 5 представлены кривые подсчетов<sup>4</sup> источников, классифицированных как галактические и внегалактические, а также полная кривая подсчетов всех источников. Для сравнения на рисунке приведена кривая подсчетов, полученная по данным спутника Chandra в работе Георгакакис и др. (2008). Для источников eРОЗИТА отсчеты

<sup>4</sup>Напомним, что кривая подсчетов источников (так называемая кривая  $\log N - \log S$ ) показывает зависимость от потока количества источников с потоком выше заданного, как правило, нормированное на единичный телесный угол.





**Рис. 5.** Кривая подсчетов источников  $\log N - \log S$  в области Дыры Локмана. Кривая нормирована на квадратный градус. Красной штриховой линией показана кривая для всех точечных рентгеновских источников из каталога Гильфанова и др. (2022). Синей и зеленой сплошной линией показаны кривые подсчетов для источников, классифицированных как внегалактические и галактические соответственно. Пунктирной линией показана зависимость  $\propto F_x^{-1}$ , отнормированная на количество галактических источников в области потоков  $\gtrsim 2 \times 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup>. Полупрозрачные области вокруг кривых показывают статистические неопределенности, посчитанные в предположении пуассоновского распределения. Черной линией показана кривая подсчетов источников из работы Георгакакис и др. (2008).

были преобразованы в поток в диапазоне 0.5–2.0 кэВ, откорректированный на межзвездное поглощение, предполагая медианное значение  $NH = 7 \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup> и наклон степенного спектра  $\Gamma = 1.9$ .

Коррекция неполноты кривых подсчетов, представленных на рис. 5, в данной работе не проводилась. Из кривой эффективной площади обзора Дыры Локмана, приведенной в работе (Гильфанов и др., готовится к печати, 2022), следует, что эффекты неполноты начинают играть роль на потоке  $\sim (2-3) \times 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup>. На рис. 5 это выражается в уплощении кривых подсчетов на более низких потоках.

Видно, что большую часть источников, зарегистрированных еРОЗИТА, составляют внегалактические (АЯГ и квазары), а на долю галактических источников (звезды) на потоках  $\sim 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> приходится  $\sim 10\%$ . Эта величина в целом характерна для полей на высоких Галактических широтах,

но может меняться в зависимости от местоположения на небе. Также хорошо видна разница в наклонах кривой подсчета для этих двух популяций. Кривая подсчетов внегалактических источников следует закону  $\propto F_x^{-3/2}$ , как и следовало ожидать в этом интервале потоков, в то время как кривая подсчетов галактических источников более пологая и следует зависимости  $\propto F_x^{-1}$ . Отметим, что такой наклон удивительно хорошо совпадает с величиной, ожидаемой для популяции источников в диске. Однако такая аналогия, по всей видимости, здесь не применима.

В работе Георгакакис и др. (2008), не проводилось разделения источников на внегалактические и галактические. Соответственно, их кривая подсчетов хорошо согласуется в полной кривой подсчетов еРОЗИТА. Так, плотность числа источников на потоках выше  $F_x > 2 \times 10^{-14}$  составляет  $33.2 \pm 1.1$  и  $33.6 \pm 1.4$  ист/град<sup>2</sup> по данным еРОЗИТА и Chandra соответственно.

**Таблица 3.** Галактические источники Gaia (обозначены красными кружками на рис. 1), имеющие  $\lg(F_x/F_0) > -1.4$ 

|    | Источник              | Класс SDSS | Класс MILQ | Класс SIMBAD                   | Цвет  | $\lg(F_x/F_0)$ |
|----|-----------------------|------------|------------|--------------------------------|-------|----------------|
| 1  | SRGe J103906.0+553044 | —          | —          | Star                           | -3.62 | -1.37          |
| 2  | SRGe J105633.1+583529 | —          | —          | Star                           | -1.82 | -1.30          |
| 3  | SRGe J104522.1+555738 | —          | QSO        | Radio Source                   | -0.56 | -1.27          |
| 4  | SRGe J103618.3+581246 | —          | —          | —                              | -0.70 | -1.21          |
| 5  | SRGe J104007.7+595700 | —          | —          | Long-Period Variable Candidate | -2.56 | -1.15          |
| 6  | SRGe J103453.6+553633 | —          | —          | —                              | 1.81  | -1.14          |
| 7  | SRGe J105310.4+575437 | —          | —          | —                              | 1.76  | -1.01          |
| 8  | SRGe J103224.9+572814 | QSO        | QSO        | Quasar                         | 1.11  | -0.93          |
| 9  | SRGe J105848.1+592918 | —          | —          | HII Region                     | -0.60 | -0.82          |
| 10 | SRGe J102411.6+561606 | —          | —          | —                              | -0.36 | -0.64          |
| 11 | SRGe J110137.5+572926 | —          | —          | Star                           | -2.87 | 0.03           |
| 12 | SRGe J104325.5+563300 | —          | —          | Cataclysmic Binary             | -0.32 | 0.13           |

**Примечание.** Значения цветов меньше  $-1$  могут быть искажены и обсуждаются в подразделе 3.2.

**Таблица 4.** Объекты, которые были классифицированы как галактические на основе информации из спектральных каталогов или базы данных Simbad (не на основе данных Gaia)

|    | Источник              | Класс SDSS | Подкласс SDSS | Класс MILQ | Класс SIMBAD | Цвет  | $\lg(F_x/F_0)$ |
|----|-----------------------|------------|---------------|------------|--------------|-------|----------------|
| 1  | SRGe J103049.0+563614 | —          | —             | —          | Star         | -0.02 | -0.27          |
| 2  | SRGe J103606.5+573624 | STAR       | K5            | STAR       | —            | 0.34  | -0.08          |
| 3  | SRGe J104809.2+581036 | —          | —             | —          | Star         | -0.41 | -3.59          |
| 4  | SRGe J105106.4+552342 | STAR       | O9.5Iae       | STAR       | —            | 0.08  | 0.31           |
| 5  | SRGe J105237.2+600836 | —          | —             | —          | Star         | 0.24  | -0.03          |
| 6  | SRGe J103256.5+574818 | —          | —             | —          | Star         | 0.78  | 0.53           |
| 7  | SRGe J103511.4+600547 | —          | —             | STAR       | —            | 0.16  | 0.05           |
| 8  | SRGe J105118.5+551934 | STAR       | O9.5Iae       | STAR       | Blue Object  | -0.15 | -0.12          |
| 9  | SRGe J104636.2+555934 | —          | —             | —          | Star         | -1.43 | -0.01          |
| 10 | SRGe J103426.1+575524 | —          | —             | —          | Star         | —     | 0.46           |
| 11 | SRGe J105432.9+590945 | —          | —             | —          | Star         | 0.7   | -0.29          |
| 12 | SRGe J103744.3+571156 | STAR       | O8e           | QSO        | BL Lac       | 0.49  | 0.43           |
| 13 | SRGe J104429.8+595354 | —          | —             | —          | Star         | 0.14  | -0.38          |

**Примечание.** Отмечены красными окружностями на рис. 1. Значения цветов меньше  $-1$  могут быть искажены и обсуждаются в подразделе 3.2.

## 4.2. Пекулярные источники

Здесь приведены списки объектов, которые по тем или иным причинам являются необычными и были выявлены в процессе классификации рентгеновских источников в области Дыры Локмана.

В табл. 3 приведены галактические источники Gaia, отобранные в подразделе 3.1, и лежащие на рис. 1 в области внегалактических объектов ( $\lg(F_x/F_o) > -1.4$ ). Эти галактические источники имеют нехарактерно большое отношение рентгеновского потока к оптическому и могут являться кандидатами в катаклизмические переменные. Отдельно стоит отметить источник SRGe J103224.9+572814: согласно каталогу Gaia, он имеет значимое собственное движение ( $12.5 \pm 0.5$  угл. млсек./год) и при этом является квазаром ( $z = 2.43 \pm 0.00014$ ), согласно спектроскопическим каталогам. Подробнее о подобных объектах см., например, Сачей и др. (2022), Хамитов и др., в печати (2022).

В табл. 4 приведены объекты, которые были классифицированы как галактические на основании спектральных каталогов или базы данных Simbad (без использования данных Gaia). Большинство из них, так же как и объекты из табл. 3, имеют отношение  $\lg(F_x/F_o)$ , характерное для внегалактических объектов.

Оптическая протяженность некоторых из галактических источников Gaia (отмечены красными окружностями с черной границей на рис. 1, список приведен в табл. 5) может быть связана с относительно большими значениями собственного движения и, как следствие, смещением положения источника между оптическими снимками, сделанными в разное время. Собственные движения, в свою очередь, могут быть вызваны смещением фотоцентра галактики, происходящего по причине, например, движения джетов или микролинзирования. Также не могут быть полностью исключены и погрешности астрометрических решений Gaia. Поиску и исследованию таких объектов в рентгеновском каталоге еРОЗИТА посвящена недавняя работа Хамитов и др., в печати (2022).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели классификацию рентгеновских источников в каталоге источников СРГ/еРОЗИТА, полученном по результатам обзора в области Дыры Локмана (Гильфанов и др., готовится к печати, 2022). Для этой цели мы использовали результаты отождествления рентгеновских источников с объектами оптического каталога DESI LIS, проведенного в работе Быков и др. (2022). Из 6885 рентгеновских источников 2884 источникам удалось

назначить класс после отождествления с каталогами Gaia DR3, SDSS DR16, MILLIQUAS и базы данных Simbad. Для остальных источников классификация была проведена на основе информации о протяженности объекта в оптическом диапазоне и отношении  $F_x/F_o$  рентгеновского и оптического (в фильтре  $z$ ) потоков (см. раздел 3). В результате 357 источников были классифицированы как галактические и 5929 как внегалактические. Сделаны оценки точности и полноты отбора для внегалактических (99.9 и 98.9% соответственно) и галактических (91.6 и 99.7%) источников. Для 60 источников, для которых фотометрия DESI LIS имела недостаточное отношение сигнал—шум, отождествление не производилось. Используя результаты отождествления из работы Быков и др. (2022), 539 источников были классифицированы как “бездомные”, т.е. не имеющие оптических партнеров в обзоре DESI LIS. Результаты этой работы будут использованы в последующих статьях для построения функции светимости АЯГ и квазаров в поле Дыры Локмана.

Это исследование использовало результаты наблюдений телескопа еРОЗИТА на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/еРОЗИТА изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (MPE) при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субпоярдами. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Используемые в настоящей работе данные телескопа еРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом еРОЗИТА и программного обеспечения для обработки и анализа данных, разработанного российским консорциумом телескопа еРОЗИТА.

Авторы благодарны за обсуждение работы членам научной рабочей группы российского консорциума телескопа еРОЗИТА каталогу источников и по активным галактикам, квазарам и СПР, в частности, И.Ф. Бикмаеву, Р.А. Буренину, А.В. Мещерякову и Г.А. Хорунжеву. С.Д. Быков благодарит за поддержку международную исследовательскую школу по астрофизике общества Макса Планка (IMPRS) в Мюнхенском университете имени Людвига и Максимилиана. М.И. Бельведерский

**Таблица 5.** Галактические источники Gaia, являющиеся протяженными объектами согласно каталогу DESI LIS

|   | Источник              | GAIA PM (mas/yr) | GAIA PM SNR | $\lg(F_x/F_0)$ |
|---|-----------------------|------------------|-------------|----------------|
| 1 | SRGe J105146.0+554552 | 144.64           | 204.3       | 1.91           |
| 2 | SRGe J104425.9+565729 | 24.21            | 69.3        | 1.46           |
| 3 | SRGe J105603.0+595317 | 5.58             | 14.4        | -0.24          |
| 4 | SRGe J105130.7+573439 | 63.28            | 310.6       | 2.00           |
| 5 | SRGe J102411.6+561606 | 9.38             | 602.8       | -0.36          |

**Примечание.** Отмечены красными окружностями с черной границей на рис. 1.

и М.Р. Гильфанов благодарят поддержку гранта РНФ 21-12-00343. М.И. Бельведерский благодарит Дастина Ланга из коллаборации DESI за консультации.

Программное обеспечение: NumPy (Харрис и др., 2020), Matplotlib (Хантер и др., 2007), SciPy (Виртанен и др., 2020), Pandas (Команда pandas, 2020), AstroPy (Прайс-Вилан и др., 2018). В работе была использована база данных SIMBAD, поддерживаемая Центром астрономических данных в Страсбурге (CDS<sup>5</sup>, Strasbourg, France).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сачей и др. (J. Souchay, N. Secrest, S. Lambert, N. Zacharias, F. Taris, C. Barache, et al.), *Astron. Astrophys.* **660**, A16 (2022).
- Аумада и др. (R. Ahumada, C. A. Prieto, A. Almeida, F. Anders, S. F. Anderson, B. H. Andrews, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **249**, 3 (2020).
- Бруса и др. (M. Brusa, G. Zamorani, A. Comastri, G. Hasinger, N. Cappelluti, F. Civano, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 353 (2007).
- Бруса и др. (M. Brusa, F. Civano, A. Comastri, T. Miyaji, M. Salvato, G. Zamorani, et al.), *Astrophys. J.* **716**, 348 (2010).
- Быков и др. (Вуков), (2022).
- Венгер и др. (M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, P. Dubois, F. Bonnarel, S. Borde, et al.), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 9 (2000).
- Виртанен и др. (P. Virtanen, R. Gommers, T.E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, et al.), *Nature Methods* **17**, 261 (2020).
- Георгакакис и др. (A. Georgakakis, K. Nandra, E.S. Laird, J. Aird, and M. Trichas), *MNRAS* **388**, 1205 (2008).
- Гильфанов и др. (M. Gilfanov et al.), *Письма в Астрон. журн.*, готовится к печати (2023).
- Дей и др. (A. Dey, D. J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
- Коллаборация Гая (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, A1 (2016).
- Коллаборация Гая (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, F. Arenou, et al.), *arXiv e-prints*, p. arXiv:2208.00211 (2022).
- Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, G. Hütsi, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **558**, A90 (2013a).
- Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, and M. Brusa), *Astron. Astrophys.* **558**, A89 (2013b).
- T. pandas development team, *pandas-dev/pandas: Pandas* (2020).
- Ксю и др. (Y.Q. Xue, B. Luo, W.N. Brandt, F.E. Bauer, B.D. Lehmer, P.S. Broos, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **195**, 10 (2011).
- Маккакаро и др. (T. Maccacaro, I.M. Gioia, A. Wolter, G. Zamorani, and J.T. Stocke), *Astrophys. J.* **326**, 680 (1988).
- Марчеси и др. (S. Marchesi, F. Civano, M. Elvis, M. Salvato, M. Brusa, A. Comastri, et al.), *Astrophys. J.* **817**, 34 (2016).
- Мереминский и др. (I.A. Mereminskiy, E.V. Filipova, R.A. Burenin, S.Y. Sazonov, M.N. Pavlinsky, A.Y. Tkachenko, et al.), *Astronomy Letters* **44**, 67 (2018).
- Мереминский и др. (I.A. Mereminskiy, R.A. Burenin, R.A. Krivonos, I.Y. Lapshov, M.N. Pavlinsky, S.Y. Sazonov, et al.), *Astronomy Letters* **45**, 62 (2019).
- Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Böhringer, T. Boller, H. Brunner, et al.), *arXiv e-prints*, p. arXiv:1209.3114 (2012).
- Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
- Прайс-Вилан и др. (Astropy Collaboration, A.M. Price-Whelan, B.M. Sipócz, H.M. Günther,

<sup>5</sup><https://simbad.u-strasbg.fr/simbad>

- P.L. Lim, S.M. Crawford, et al.), *Astron. J.* **156**, 123 (2018).
24. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
25. Прокопенко и Гильфанов (I.G. Prokopenko and M.R. Gilfanov), *Astronomy Letters* **35**, 294 (2009).
26. Сальвато и др. (M. Salvato, G. Hasinger, O. Ilbert, G. Zamorani, M. Brusa, N.Z. Scoville, et al.), *Astrophys. J.* **690**, 1250 (2009).
27. Сальвато и др. (M. Salvato, J. Buchner, T. Budavári, T. Dwelly, A. Merloni, M. Brusa, et al.), *MNRAS* **473**, 4937 (2018).
28. Сальвато и др. (M. Salvato, O. Ilbert, and B. Hoyle), *Nature Astronomy* **3**, 212 (2019).
29. Сальвато и др. (M. Salvato, J. Wolf, T. Dwelly, A. Georgakakis, M. Brusa, A. Merloni, et al.), *Astron. Astrophys.* **661**, A3 (2022).
30. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2104.13267 (2021).
31. Флэш и др. (E. W. Flesch), arXiv e-prints, p. arXiv:2105.12985 (2021).
32. Хамитов и др. (I. Hamitov), *Письма в Астрон. журн.* **48**, 828 (2022).
33. Хантер и др. (J. D. Hunter), *Computing in Science & Engineering* **9**, 90 (2007).
34. Харрис и др. (C.R. Harris, K.J. Millman, S.J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, et al.), *Nature* **585**, 357 (2020).
35. Хасингер и др. (G. Hasinger, M. Freyberg, E.M. Hu, C.Z. Waters, P. Capak, A. Moneti, et al.), *Astron. Astrophys.* **645**, A95 (2021).
36. Чивано и др. (F. Civano, M. Elvis, M. Brusa, A. Comastri, M. Salvato, G. Zamorani, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **201**, 30 (2012).