

## ОТКРЫТИЕ САМОГО МОЩНОГО В РЕНТГЕНЕ КВАЗАРА SRGE J170245.3+130104 НА КРАСНОМ СМЕЩЕНИИ $z \approx 5.5$

© 2021 г. Г. А. Хорунжев<sup>1\*</sup>, А. В. Мещеряков<sup>1,2</sup>, П. С. Медведев<sup>1</sup>, В. Д. Борисов<sup>1,3</sup>,  
Р. А. Буренин<sup>1</sup>, Р. А. Кривонос<sup>1</sup>, Р. И. Уклеин<sup>4</sup>, Е. С. Шабловинская<sup>4</sup>,  
В. Л. Афанасьев<sup>4</sup>, С. Н. Додонов<sup>4</sup>, Р. А. Сюняев<sup>1,5</sup>, С. Ю. Сазонов<sup>1</sup>, М. Р. Гильфанов<sup>1,5</sup>

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

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ВМК, Москва, Россия

<sup>4</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

<sup>5</sup>Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 15.12.2020 г.

После доработки 22.12.2020 г.; принята к публикации 29.12.2020 г.

В ходе первого обзора всего неба орбитальной обсерватории СРГ, 13–15 марта 2020 г. с помощью телескопа еРОЗИТА был открыт рентгеновский источник SRGE J170245.3+130104. Его оптический компаньон был отождествлен по фотометрическим признакам как кандидат в далекие квазары на  $z \approx 5.5$ . Спектроскопические наблюдения объекта, проведенные в августе и сентябре 2020 г. на 6-м телескопе БТА с помощью прибора SCORPIO-II, подтвердили, что SRGE J170245.3+130104 является квазаром на красном смещении  $z_{\text{spec}} = 5.466 \pm 0.003$ . По данным телескопа еРОЗИТА, полученным в ходе первого обзора неба, рентгеновская светимость квазара составила  $3.6_{-1.5}^{+2.1} \times 10^{46}$  эрг/с в диапазоне энергий 2–10 кэВ, а его рентгеновский спектр можно приблизительно описать степенным законом с наклоном  $\Gamma = 1.8_{-0.8}^{+0.9}$ . Квазар был повторно зарегистрирован телескопом еРОЗИТА спустя полгода (13–14 сентября 2020 г.) в ходе второго обзора неба, причем его рентгеновская светимость, вероятно, уменьшилась примерно в 2 раза на уровне достоверности  $\approx 1.9\sigma$ . Квазар SRGE J170245.3+130104 оказался ярчайшим в рентгене среди всех известных квазаров на красных смещениях  $z > 5$ . При этом он является и одним из самых радиогромких далеких квазаров (параметр радиогромкости  $R \sim 10^3$ ), что может означать, что это блазар. В статье приводится каталог всех зарегистрированных в рентгене на текущий момент квазаров на  $z > 5$ .

*Ключевые слова:* активные ядра галактик, рентгеновские обзоры, фотометрические красные смещения, спектроскопия, БТА, еРОЗИТА.

DOI: 10.31857/S0320010821030037

### ВВЕДЕНИЕ

Запущенная 13 июля 2019 г. рентгеновская обсерватория СРГ (Сюняев и др., 2021; Предел и др., 2020) успешно работает на орбите вокруг точки Лагранжа L2 системы Земля–Солнце. Основная цель обсерватории — обзор всего неба в широком диапазоне энергий 0.2–30 кэВ продолжительностью 4 года. В ходе обзора неба предполагается открыть с помощью телескопа СРГ/еРОЗИТА (Предел и др., 2020) около трех миллионов активных ядер галактик (АЯГ), в том числе далеких квазаров (Колодзиг и др., 2012, 2013), около ста

тысяч скоплений и групп галактик, а также сотни тысяч рентгеновских источников различной природы в нашей Галактике. Ожидается, что обзор неба обсерватории СРГ будет примерно в 25 раз чувствительнее в мягком рентгеновском диапазоне (0.5–2 кэВ) предыдущего обзора, проведенного спутником ROSAT (Трюмпер, 1982) в начале 90-х гг. XX в., и поможет решить ряд важнейших задач современной астрофизики и космологии. Одна из главных целей обзора — поиск уникальных объектов, чьи спектральные характеристики являются выдающимися среди источников своего класса. В частности, обнаружение и детальное изучение экстремально ярких квазаров позволят пролить свет

\*Электронный адрес: horge@iki.rssi.ru

на историю роста наиболее массивных черных дыр во Вселенной.

В июне 2020 г. был завершен первый полугодовой обзор всего неба обсерватории СРГ. Среди рентгеновских источников, открытых с помощью телескопа ePOZITA (Предел и др., 2020), был проведен отбор кандидатов в далекие квазары с помощью системы оптического отождествления рентгеновских объектов SRGz (Мещеряков и др., 2021). Это программное обеспечение осуществляет автоматический поиск и классификацию наиболее вероятных оптических партнеров рентгеновских источников, а также оценивает их красные смещения на основе фотометрических признаков по данным оптических и инфракрасных обзоров неба с помощью методов машинного обучения. Система SRGz создана в рабочей группе российского консорциума СРГ/ePOZITA по поиску рентгеновских источников, их отождествлению и составлению каталога по данным телескопа ePOZITA в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

Уже в результате первых спектроскопических наблюдений кандидатов в далекие квазары, обнаруженных в ходе глубокого обзора поля Дыры Локмана (до начала сканирования неба) и в ходе первого обзора всего неба обсерватории СРГ, был подтвержден ряд далеких рентгеновских квазаров на  $z \sim 4$  и более близких квазаров на  $z \sim 1-3$ , идентифицированных среди рентгеновских источников телескопа ePOZITA системой SRGz. Оптические спектры этих источников были получены на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории (Хорунжев и др., 2020), Российско-Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150, Бикмаев и др., 2020) и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ (Додин и др., 2020).

Особый интерес представляют яркие в рентгене (со светимостью  $L_{2-10 \text{ keV}} > 5 \times 10^{45}$  эрг/с в диапазоне энергий 2–10 кэВ) далекие квазары ( $z > 3$ ), которые практически не встречаются в глубоких рентгеновских обзорах малой площади и не могли быть обнаружены в ходе предыдущего рентгеновского обзора всего неба обсерватории ROSAT из-за его недостаточной глубины. Уже в самом начале обзора неба обсерватории СРГ удалось обнаружить уникальный квазар CFHQS J142952+544717 = SRGE J142952.1+544716, который оказался самым ярким в рентгене среди известных квазаров на  $z > 6$  (Медведев и др., 2020).

Научной рабочей группой по изучению активных ядер галактик российского консорциума СРГ/ePOZITA создана отдельная наблюдательная программа DaLeQo (Distant and Luminous eROSITA Quasi-stellar objects, Хорунжев и др., 2021), посвященная спектроскопии кандидатов

в далекие ( $z > 3$ ) и яркие ( $L_X \gtrsim 5 \times 10^{45}$  эрг/с) рентгеновские квазары. В данной статье описывается открытие наиболее выдающегося (на данный момент) объекта программы DaLeQo — самого яркого в рентгеновском и радиодиапазонах квазара SRGE J170245.3+130104 на  $z > 5$ , отождествленному с помощью наблюдений на 6-м телескопе БТА.

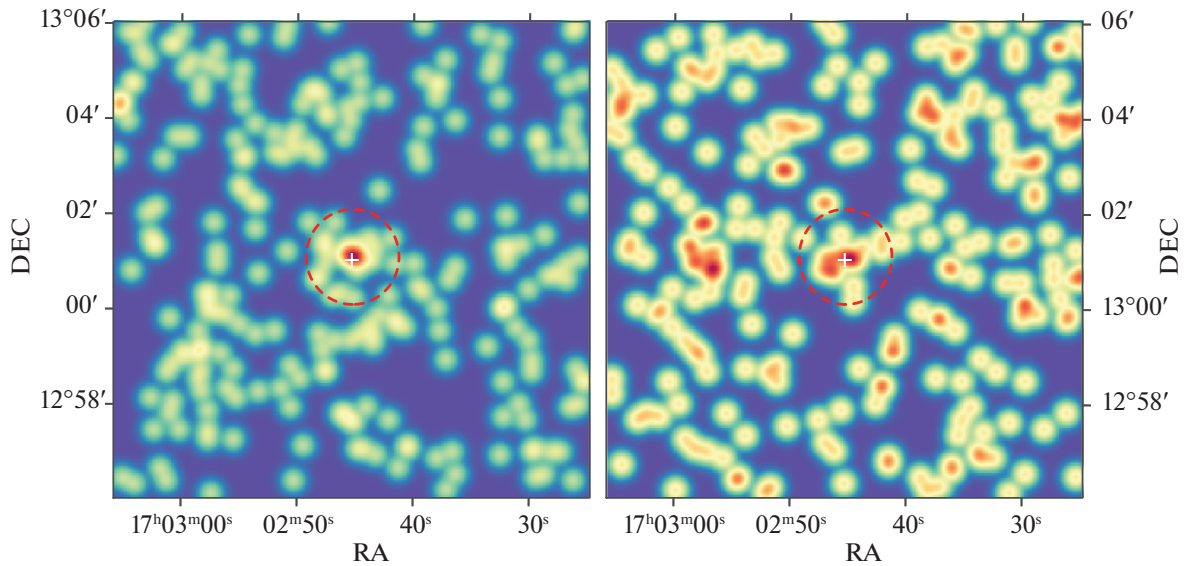
В статье для расчета светимостей используются следующие космологические параметры:  $H_0 = 69.6$  км/с/Мпк и  $\Omega_M = 0.286$  (Беннет и др., 2018).

## РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ

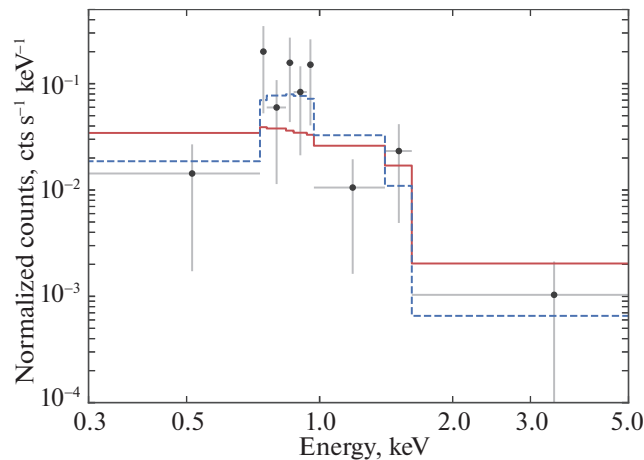
Источник SRGE J170245.3+130104 открыт в ходе первого обзора неба обсерватории СРГ по данным телескопа ePOZITA. В первом обзоре положение источника сканировалось 9 раз с 13 по 15 марта 2020 г. Суммарное время сканирования источника телескопом ePOZITA составило 256 с. Источник зарегистрирован в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ с координатами центроида R.A. = 255.688844, Dec. = 13.017685 и точностью локализации 7 угл. сек (95%). В этом диапазоне энергий внутри окружности радиусом 60 угл. сек, центрированной на положении источника, зарегистрировано 30 отсчетов при ожидаемом числе отсчетов фона 7.4. Аппроксимация распределения отсчетов в окрестности источника функцией отклика на точечный источник дает статистическую значимость его детектирования  $8.5\sigma$ .

Во втором полугодовом обзоре положение источника сканировалось обсерваторией СРГ с 13 по 14 сентября 2020 г. Общее время сканирования составило 268 с, за которое в радиусе 60 угл. сек от источника было зарегистрировано лишь 18 отсчетов в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ при ожидаемом числе отсчетов от фона 7.3 (значимость детектирования  $3.7\sigma$ , см. рис. 1). Положение источника оказалось совместимо в пределах неопределенности с координатами, измеренными в первом обзоре.

Первичная обработка данных телескопа ePOZITA проводилась с помощью программного обеспечения, разработанного в ИКИ РАН с использованием компонент системы eSASS (Институт взвешенной физики Общества им. Макса Планка, Германия). Рентгеновская карта фотонов в области локализации источника размером  $10 \times 10$  угл. мин показана на рис. 1. Спектр источника извлекался из круговой апертуры радиусом 35 угл. сек. Для оценки спектра фона использовалось кольцо вокруг источника с внутренним и внешним радиусами 85 и 435 угл. сек соответственно. Другие источники, зарегистрированные по сумме двух обзоров и попадающие внутрь



**Рис. 1.** Рентгеновские изображения СРГ/еРОЗИТА области  $10' \times 10'$  в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ, центрированные на оптические координаты источника SRGE J170245.3+130104 (белый крестик). Слева показано изображение, полученное в первом обзоре неба обсерватории СРГ, справа — во втором обзоре. Красным кружком показана область радиусом  $1'$ . Изображения сглажены гауссовым фильтром с шириной  $\sigma = 8''$ .



**Рис. 2.** Рентгеновский спектр квазара SRGE J170245.3+130104 по данным первого обзора неба телескопа еРОЗИТА обсерватории СРГ. Красной сплошной линией показана модель наилучшей аппроксимации для степенного спектра с поглощением в Галактике, синей пунктирной линией — модель с дополнительным поглощением в системе отсчета квазара (табл. 1).

области фона, маскировались с помощью круговой апертуры с радиусом 40 угл. сек. Аппроксимация полученных спектров выполнялась с помощью стандартных инструментов программного пакета XSPEC (версия 12.11, Арно, 1996) с использованием си-статистики (Кэш, 1979), модифицированной для данных с пуассоновским фоном (так называемая W-статистика, см. подробнее документацию XSPEC<sup>1</sup>). Энергетические каналы спектров группировались так, чтобы число заре-

гистрированных отсчетов в каждом канале было не меньше единицы. Эта процедура проводилась с помощью стандартного инструмента GROUPNA<sup>2</sup>.

Спектральный анализ данных проводился в диапазоне энергий 0.3–5 кэВ. Для моделирования рентгеновского спектра использовались данные первого обзора неба, так как зарегистрированное число отсчетов во втором обзоре не достаточно для осмысленного спектрального анализа. Совместный

<sup>1</sup> <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual>

<sup>2</sup> <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools>

**Таблица 1.** Параметры наилучшей аппроксимации рентгеновского спектра SRGE J170245.3+130104 по данным первого обзора телескопа eROZITA обсерватории CRG

Модель	Параметр	Значение	cstat/d.o.f	goodness	AIC
TBABS*CFLUX*POW	$N_H^*$	$5.1 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$	23.18/17	53.9%	27.18
	$F_{05-2}^{cflux}$	$1.03_{-0.4}^{+0.51} \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$			
	$\Gamma$	$1.79_{-0.81}^{+0.86}$			
TBABS*CFLUX*ZPHABS*POW	$N_H^*$	$5.1 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$	14.95/16	8.8%	20.95
	$F_{05-2}^{cflux}$	$1.12_{-0.44}^{+0.57} \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$			
	$N_H^z$	$83.8_{-60.1}^{+119.5} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$			
	$\Gamma$	$5.46_{-2.61}^{+4.56}$			
TBABS*CFLUX*(ZEDGE*POW + ZGAUSS)	$N_H^*$	$5.1 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$	19.98/15	51.8%	27.98
	$F_{05-2}^{cflux}$	$0.99_{-0.38}^{+0.50} \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$			
	$\tau_{\text{edge}}$	$< 8$			
	$\Gamma$	$1.45_{-0.82}^{+0.97}$			
	$EW_{\text{Fe K}\alpha}$	$< 670 \text{ эВ}$			
	$\sigma_{\text{Fe K}\alpha}^*$	$10 \text{ эВ}$			

**Примечание.** Ошибки приведены на 90% уровне значимости. В столбце “goodness” приведена вероятность получить из-за статистических флуктуаций значение cstat меньше, чем наилучшее значение, полученное для данной модели. Эта величина характеризует качество описания данных моделью, и для адекватной модели следует ожидать значения  $\sim 50\%$ . Информационный критерий Акаике (AIC) рассчитан по формуле  $2n - 2 \ln(L)$ , где  $n$  — число свободных параметров модели, а  $\ln(L)$  — логарифм функции правдоподобия; по определению в пакете Xspec величина  $-2 \ln(L)$  равна значению статистики cstat. Модель с меньшим значением AIC является более предпочтительной.

\* Параметр зафиксирован.

анализ данных двух обзоров не проводился ввиду возможной переменности спектра источника.

В качестве базовой мы использовали простейшую модель степенного спектра с поглощением. Величина колонковой плотности водорода  $N_H$  была зафиксирована на значении, равном поглощению в Галактике в направлении на источник по данным карт HI4PI (Коллаборация HI4PI, 2016):  $N_H = 5.10 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Параметры наилучшей модели приведены в табл. 1, а спектр показан на рис. 2 красной линией. Значение вероятности, приведенное в столбце “goodness” табл. 1, свидетельствует о том, что модель адекватно описывает данные.

Сравнительно небольшое число отсчетов, зарегистрированных от источника, не позволяет детально исследовать более сложные спектральные модели. Тем не менее мы применили к данным еще две модели, в которых исследовали возможность наличия внутреннего поглощения в квазаре и спектральных особенностей, связанных с присутствием отраженной компоненты в спектре.

Для первой задачи к степенному спектру базовой модели было добавлено собственное поглощение в системе покоя квазара ( $z = 5.466$ ) со свободным параметром поглощения. Такая модифи-

кация модели приводит к заметному уменьшению как величины  $C$ -stat = 14.95 при d.o.f. = 16, так и информационного критерия AIC (Акаике, 1974) по сравнению с базовой моделью (синий пунктир на рис. 2). Однако такая модель требует большие и, по-видимому, нереалистичные значения поглощения и фотонного спектрального индекса:  $N_H \approx 8 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ ,  $\Gamma \approx 5$ , хотя и определенные с большими статистическими ошибками. Поэтому наш анализ не позволяет сделать однозначный вывод о наличии внутреннего поглощения в источнике.

С целью учесть возможный вклад излучения, отраженного от нейтральной оптически плотной среды (например, аккреционного диска или молекулярного тора), мы рассмотрели модель, включающую флуоресцентную линию железа на энергии 6.4 кэВ и поглощение на K-крае железа на энергии 7.1 кэВ в системе покоя квазара. Полученная модель наилучшей аппроксимации несколько лучше описывает наблюдаемые данные, чем базовая модель ( $\delta C$ -stat =  $-3.2$ ), однако из сравнения соответствующих значений статистического критерия AIC в табл. 1 видно, что данные не обладают достаточной информацией для обоснования такого усложнения модели. Таким образом, более

**Таблица 2.** Свойства оптического компаньона и прогноз фотометрического красного смещения

OBJID SDSS	RA <sub>opt</sub>	DEC <sub>opt</sub>	sep	$i'_{psf}$	$C_{ph}$	$z_{ph}$	$zConf$
1237665106509826046	255.688797	+ 13.017288	1.4	22.04	QSO	5.486	0.84

**Примечание.** OBJID SDSS — уникальный номер в фотометрическом каталоге SDSS DR14, RA<sub>opt</sub> и DEC<sub>opt</sub> — координаты источника в фотометрическом каталоге SDSS, sep — угловое расстояние между положениями рентгеновского и оптического источников (угл. сек),  $i'_{psf}$  — видимая звездная величина в фильтре  $i'$  SDSS,  $C_{ph}$  — фотометрический класс SRGz (звезда, галактика, квазар),  $z_{ph}$  — фотометрическое красное смещение,  $zConf$  — стандартная оценка надежности измерения photo-z.

точные выводы касательно формы или наличия каких-либо особенностей в рентгеновском спектре SRGE J170245.3+130104 требуют данных с более высоким отношением сигнала к шуму.

Мы использовали базовую модель степенного закона с поглощением в Галактике для вычисления внутренней (т.е. поправленной за поглощение межзвездной среды Галактики) рентгеновской светимости SRGE J170245.3+130104. Она оказалась равна  $3.6^{+2.1}_{-1.5} \times 10^{46}$  эрг/с в диапазоне энергий 2–10 кэВ в собственной системе отсчета квазара.

Во втором обзоре неба СРГ от источника было зарегистрировано в два раза меньше отсчетов. Выраженное в единицах скорости счета в диапазоне 0.3–2.2 кэВ, измеренной по функции отклика на точечный источник, падение потока составило  $\approx 2.3$  раза и имеет статистическую достоверность  $\approx 1.9\sigma$ . Используя базовую модель с наклоном, полученным для спектра первого обзора, мы измерили поток от источника во втором обзоре, который составил  $5.0^{+4.5}_{-3.1} \times 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup>, а его светимость в диапазоне энергий 2–10 кэВ соответственно  $1.7^{+1.5}_{-1.1} \times 10^{46}$  эрг/с.

### ОТБОР КАНДИДАТОВ В ДАЛЕКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ КВАЗАРЫ

Для поиска наиболее далеких рентгеновских квазаров была проведена кросс-корреляция рентгеновских источников СРГ/еРОЗИТА из первого полугодового скана неба в радиусе  $R_{match} = 10$  угл. сек (что соответствует медианной 98% ошибке локализации рентгеновских источников еРОЗИТЫ) с фотометрическими каталогами трех оптических обзоров: DESI Legacy Imaging Survey DR8 (DESI LIS, Деи и др. 2018), PanSTARRS1 DR2 (Чамберс и др., 2016), SDSS DR14 (Аболфати и др., 2018), а также с данными принудительной фотометрии в инфракрасном диапазоне из обзора WISE (Лэнг, 2016) для источников из обзора DESI LIS.

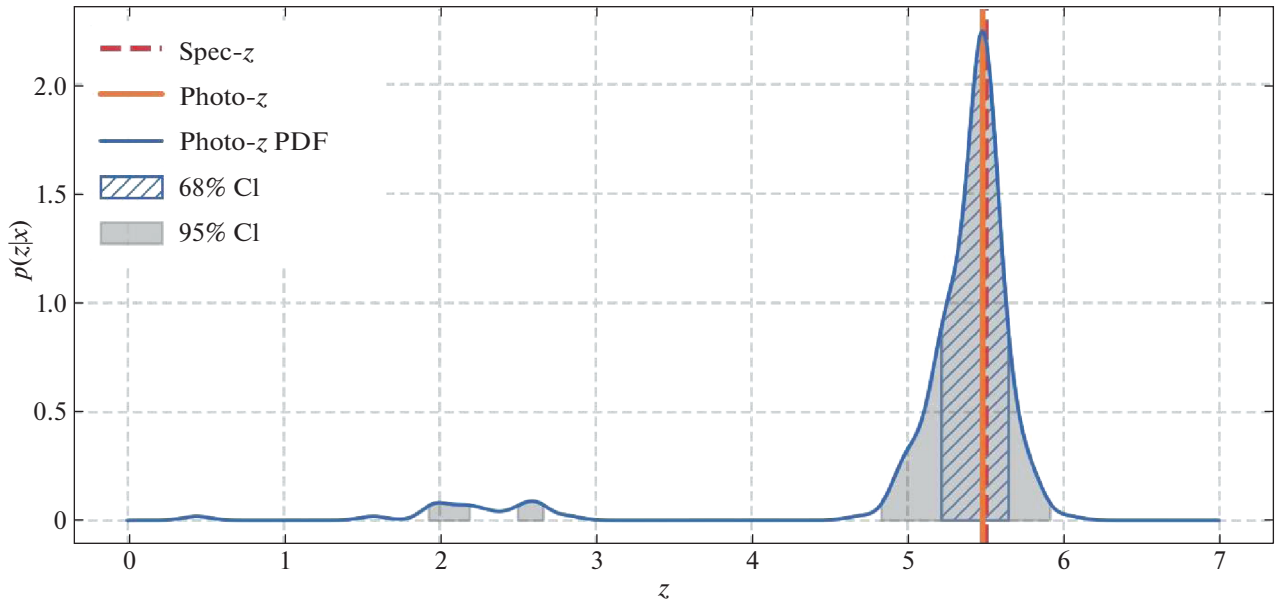
Оптические данные по источникам из разных обзоров были объединены в общий фотометрический каталог путем кросс-отождествления оптических координат источников (в радиусе 1") и

выбора фотометрических измерений с наибольшим отношением сигнала к шуму отдельно для каждого фильтра. Далее были исключены из рассмотрения рентгеновские источники еРОЗИТА с более чем одним оптическим объектом (в выбранном радиусе  $R_{match}$ ).

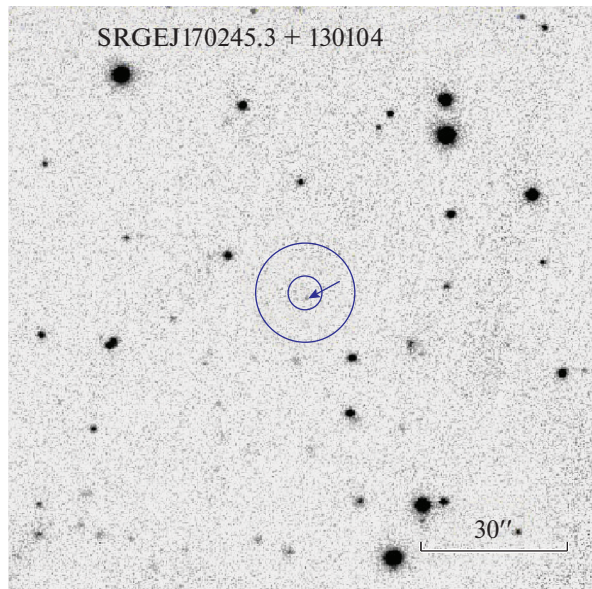
Полученный список оптических кандидатов был обработан системой SRGz, которая оперирует во всей области восточного галактического полушария рентгеновского обзора еРОЗИТА и в автоматическом режиме анализирует данные широкополосной фотометрии оптических объектов в полях рентгеновских источников. SRGz построена на использовании ансамблевых древовидных алгоритмов машинного обучения (градиентный бустинг и случайный лес деревьев решений, см. Мещеряков и др., 2018), которые обучаются на выборках квазаров, галактик и звезд из спектроскопического каталога SDSS, выборке далеких квазаров  $z > 5$  (Росс, Кросс, 2020), выборке звезд GAIA DR2, ассоциированных с источниками из рентгеновского каталога XMM-Newton (3XMM DR8). Подробнее принципы работы SRGz и реализованные в ней алгоритмы описаны в работе Мещерякова и др. (2021).

На основе прогнозов системы SRGz были отобраны оптические объекты с фотометрическим классом “квазар” и точечной оценкой фотометрического красного смещения  $z_{ph} > 5$  с высоким уровнем достоверности прогноза  $zConf$  (рассчитывалась для каждого объекта из полного вероятностного распределения прогноза  $p(z|x)$  как интеграл плотности вероятности в окрестности наилучшей точечной оценки красного смещения  $z_{ph} \pm 0.06(1 + z_{ph})$ ).

Рентгеновский источник SRGE J170245.3+130104 и ассоциированный с ним оптический компаньон (см. табл. 2) были отобраны системой SRGz как наиболее надежный кандидат в далекий рентгеновский квазар на  $z > 5$ . В 95%-ю область локализации рентгеновского источника SRGE J170245.3+130104 попадает единственный оптический источник (см. рис. 4) на расстоянии 1.4 угл. сек от положения рентгеновского источника. На рис. 4 приведено изображение



**Рис. 3.** Полный вероятностный прогноз фотометрического красного смещения  $p(z|x)$ , полученный системой SRGz для оптического компаньона рентгеновского источника SRGE J170245.3+130104. Показан точечный прогноз photo-z ( $z_{ph}$ , сплошная вертикальная линия), его доверительные интервалы с 68 и 95% уровнями значимости, спектральное красное смещение, измеренное на телескопе БТА (штриховая вертикальная линия).



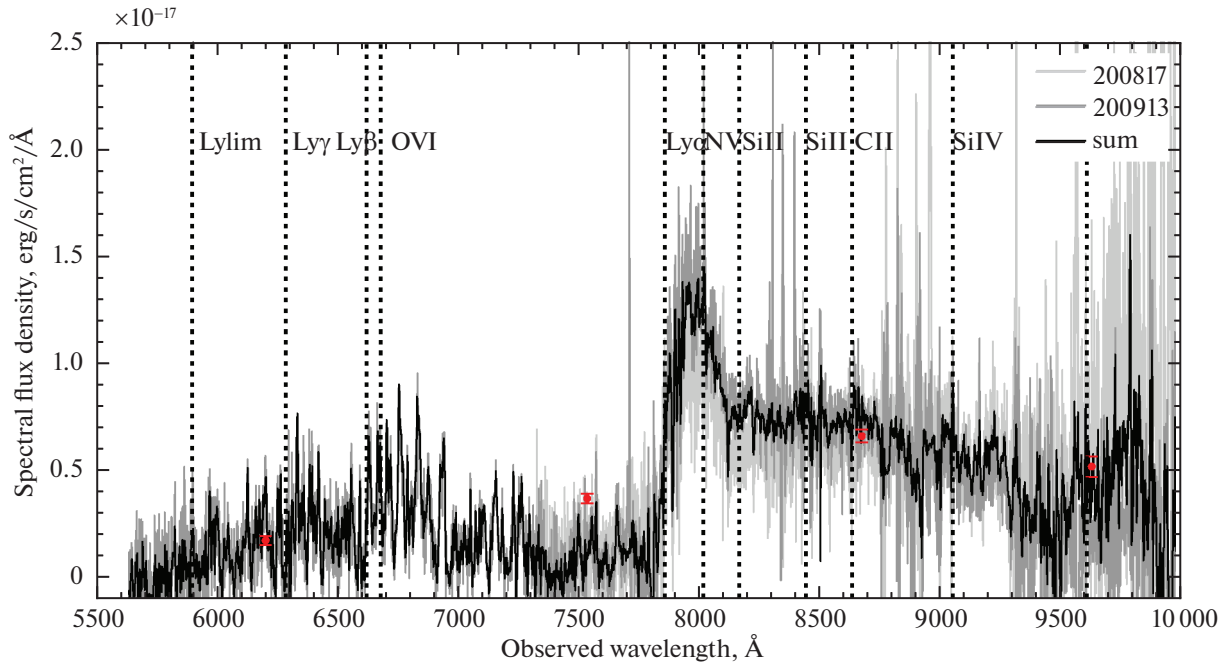
**Рис. 4.** Изображение в фильтре  $i_{PS}$  Pan-STARRS размером  $2' \times 2'$ . Стрелкой указан оптический компаньон SRGE J170245.3+130104. Радиус маленького круга соответствует области  $1\sigma$  локализации. Радиус большого круга 10 угл. сек — область, где проводился поиск оптического компаньона для рентгеновского источника.

оптического компаньона рентгеновского источника SRGE J170245.3+130104 из архива обзора Pan-STARRS в фильтре  $i_{PS}$ .

На рис. 3 показан полный вероятностный прогноз фотометрического красного смещения  $p(z|x)$  для оптического компаньона рентгеновского источника SRGE J170245.3+130104. Показаны также доверительные интервалы с 68 и 95% уровнями

значимости, величина наиболее вероятного точечного прогноза photo-z (сплошная вертикальная линия), спектральное красное смещение, измеренное на телескопе БТА (штриховая вертикальная линия). Функция плотности вероятности прогноза  $p(z|x)$  показывает острый пик на красном смещении  $z_{ph} = 5.486$ . Спектральное измерение красного





**Рис. 5.** Спектры квазара SRGE J170245.3+130104, полученные на телескопе БТА. Светло-серым показан спектр от 2020/08/17. Темно-серым показан спектр от 2020/09/13. Черным показан суммарный спектр квазара. Красными точками показана спектральная плотность потока источника в фильтрах Rap-STARSS *r, i, z, y*. Вертикальными пунктирными линиями показаны ожидаемые положения пиков характерных эмиссионных линий квазаров (Ванден Берк и др., 2001) на  $z_{\text{spec}} = 5.466$ .

смещения (см. ниже) отлично согласуются с фотометрической оценкой, полученной системой SRGz.

Отметим, что оптический компаньон SRGE J170245.3+130104 ранее не был определен в литературе как кандидат в квазары. Оптический источник имеет радиокомпаньона в обзоре NVSS на частоте 1.4 ГГц (Кондон и др., 1998).

### НАБЛЮДЕНИЯ НА БТА

Фотометрический кандидат в далекие рентгеновские квазары был включен в программу наблюдений 6-м телескопа БТА.

Наблюдения на БТА проводились с помощью спектрографа SCORPIO-2 (Афанасьев, Моисеев, 2011; Афанасьев, Амирханян, 2012) в августе и

**Таблица 3.** Список экспозиций БТА

Дата	Решетка	Экспозиция, с	S/N
2020/08/17	VPHG1200@860	2 × 1200	3
2020/09/13	VPHG1026@735	5 × 1200	4

**Примечание.** Дата — дата начала ночи наблюдений, Решетка — название диспергирующего элемента, S/N — средний сигнал-шум спектра.

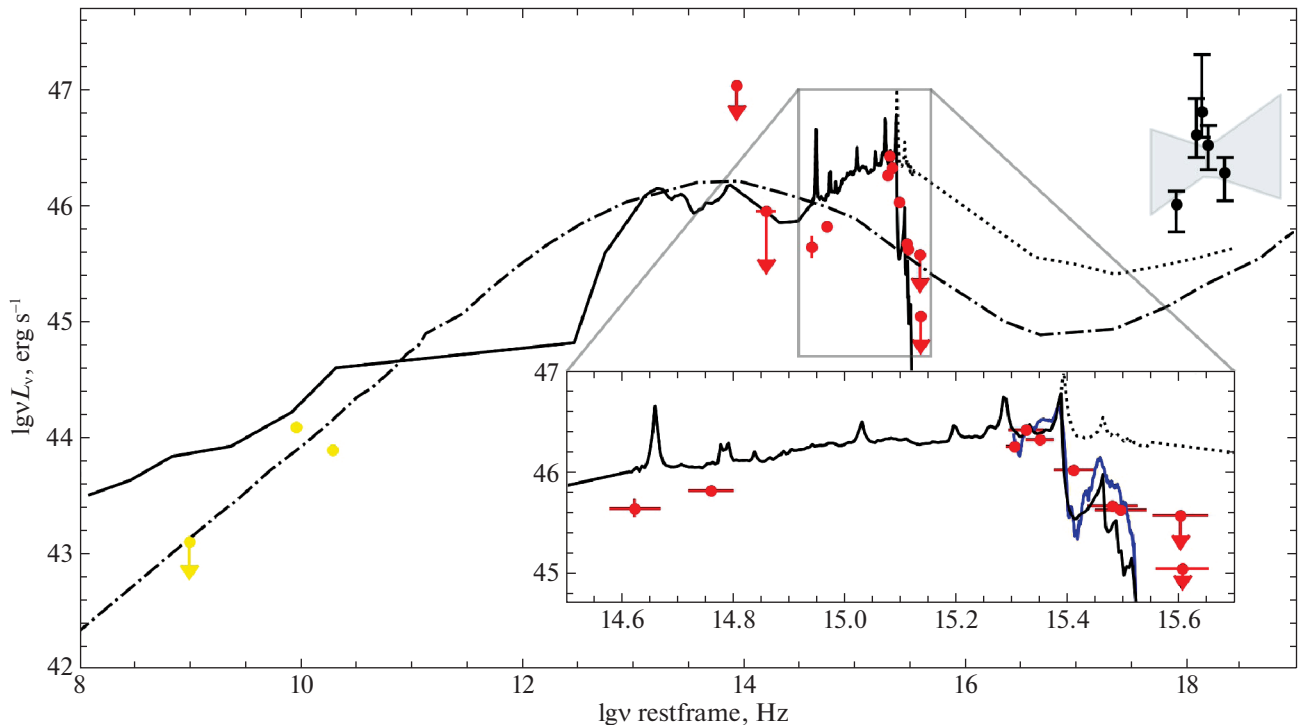
сентябре 2020 г. (см. табл. 3) в темное время (фаза Луны меньше 0.3) и при средних величинах дрожания атмосферы меньше 2 угл. сек. Использовалась щель шириной 2 угл. сек. Технические характеристики спектрографа SCORPIO-2 описаны в руководстве пользователя<sup>3</sup>.

Обработка спектров проводилась с помощью стандартного математического обеспечения IRAF<sup>4</sup>. Форма спектров была исправлена с использованием наблюдений спектрофотометрических стандартов из списка Массей и др. (1988).

В августе был получен первый спектр источника, в котором отчетливо видна широкая линия  $Ly\alpha$  с характерным скачком, связанным с поглощением на нейтральном водороде (рис. 5). В спектре нет других, характерных для квазаров эмиссионных линий, например CIV (1549 Å). Если мешают фоновые линии неба, то потребовалось бы в несколько раз больше времени, чтобы получить качественный спектр решеткой VPHG1200@860. В рабочий диапазон решетки VPHG1200@860 не попадает линия  $Ly\beta$ , по которой можно было бы точнее определить красное смещение. В сентябре были проведены повторные наблюдения решеткой VPHG1026@735, в

<sup>3</sup> <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/index.html>

<sup>4</sup> <http://iraf.noao.edu>



**Рис. 6.** Спектральное энергетическое распределение квазара SRGE J170245.3+130104. Желтыми точками показаны измерения в радиодиапазоне, красными точками — в ближнем ИК- и видимом диапазонах, черными точками — рентгеновские данные СРГ/еРОЗИТА. Серая область —  $1\sigma$  неопределенность степенной модели (с поглощением в Галактике) рентгеновского спектра (см. текст и табл. 1). Штрихпунктирной линией показан средний шаблон блазара Фоссати и др. (1998). Сплошной линией показан шаблон радиогромкого квазара Шанг и др. (2011), поправленный на длинах волн  $\lambda < 1216 \text{ \AA}$  за межгалактическое поглощение на нейтральном водороде (Мадау, 1995); продолжение оригинального шаблона Шанг и др. (2011) на длинах волн  $\lambda < 1216 \text{ \AA}$  без учета поглощения показано пунктирной линией. На вставке синей линией показан сглаженный спектр, полученный на телескопе БТА.

диапазон которой попадает линия  $Ly\beta$  и протяженный участок леса лайман-альфа. На полученном в сентябре спектре отчетливо виден лес лайман-альфа (рис. 5). К сожалению, линия  $Ly\beta$  очень широкая, а ее пик находится в поглощении.

По результатам наблюдений в августе и сентябре был получен суммарный спектр квазара SRGE J170245.3+130104, приведенный на рис. 5. Он схож со спектрами далеких радиогромких квазаров большой светимости (Романи и др., 2004; Банадос и др., 2018; Белладитта и др., 2020). Широкие эмиссионные линии за исключением  $Ly\alpha$  не доминируют над континуумом.

В спектре квазара отсутствуют узкие эмиссионные линии, с помощью которых можно было бы с высокой точностью определить красное смещение. Поэтому красное смещение источника  $z_{\text{spec}} = 5.466 \pm 0.003$  было определено подгонкой шаблона среднего спектра квазара Ванден Берк и др. (2001). Систематическая ошибка красного смещения составляет  $\Delta z_{\text{spec}} \sim 0.01$  и вызвана отличиями в спектре источника от шаблона. Полученное значение прекрасно согласуется с фотометрической

оценкой красного смещения  $z_{\text{ph}} = 5.486$  системы поиска квазаров SRGz.

В спектре присутствует значимая узкая линия поглощения на длине волны  $8119 \text{ \AA}$ . Если предположить, что это линия SiII(1263 $\text{\AA}$ ), то и другие минимумы спектра (с недостаточной значимостью детектирования) будут согласовываться с узкими линиями поглощения ( $Ly\alpha$ , NV, SiII, SiIV), помещенными на  $z_{\text{abs}} = 5.427$ . Отметим, что в спектре другого радиогромкого квазара PSO J352.4034–15.3373 на  $z_{\text{spec}} = 5.84$  тоже был обнаружен комплекс узких линий поглощения на  $z_{\text{abs}} = 5.8213$  (Банадос и др., 2018).

### СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Зная красное смещение квазара SRGE J170245.3+130104, можно исследовать его спектральное энергетическое распределение (СРЭ). Мы использовали следующие данные для построения СРЭ: радиодиапазон — TGSS (Интема и др., 2017), NVSS (Кондон и др., 1998), VLASS (Гордон и др., 2020), инфракрасный диапазон —



Таблица 4. Многоволновые свойства квазара SRGEJ170245.3+130104

Телескоп/Обзор	Фильтр	Поток либо зв. величина	Ссылка	$\nu$ в системе покоя (Гц)	$\nu L_\nu$ , эрг с <sup>-1</sup>
Радиодиапазон:					
TGSS	150 MHz	<25 мЯн	1	$9.70 \times 10^8$	$<1.3 \times 10^{43}$
NVSS	1.4 GHz	$26.0 \pm 0.9$ мЯн	2	$9.05 \times 10^9$	$(1.22 \pm 0.04) \times 10^{44}$
VCLASS	2.99 GHz	$7.8 \pm 0.3$ мЯн	3	$1.93 \times 10^{10}$	$(7.86 \pm 0.32) \times 10^{43}$
Инфракрасный диапазон:					
WISE/PS1	$W2_{\text{Vega,forced}}$	$17.05 \pm 0.13$	4	$4.198 \times 10^{14}$	$(5.50 \pm 0.67) \times 10^{45}$
	$W1_{\text{Vega,forced}}$	$17.82 \pm 0.07$		$5.755 \times 10^{14}$	$(6.71 \pm 0.43) \times 10^{45}$
WISE/DESI LIS	$W2_{\text{Vega,forced}}$	$17.30 \pm 0.23$	5	$4.198 \times 10^{14}$	$(4.39 \pm 0.94) \times 10^{45}$
	$W1_{\text{Vega,forced}}$	$17.84 \pm 0.09$		$5.755 \times 10^{14}$	$(6.60 \pm 0.56) \times 10^{45}$
Видимый диапазон:					
PS1	$y$	$20.80 \pm 0.10$	6	$2.014 \times 10^{15}$	$(1.82 \pm 0.17) \times 10^{46}$
	$z$	$20.74 \pm 0.05$		$2.235 \times 10^{15}$	$(2.13 \pm 0.10) \times 10^{46}$
	$i$	$21.64 \pm 0.07$		$2.573 \times 10^{15}$	$(1.07 \pm 0.07) \times 10^{46}$
	$r$	$22.86 \pm 0.13$		$3.126 \times 10^{15}$	$(4.24 \pm 0.50) \times 10^{45}$
	$g$	<23.25		$3.998 \times 10^{15}$	$<3.8 \times 10^{45}$
DESI LIS	$z'$ ,	$20.44 \pm 0.02$	5	$2.114 \times 10^{15}$	$(2.66 \pm 0.05) \times 10^{46}$
	$r'$ ,	$22.71 \pm 0.06$		$3.021 \times 10^{15}$	$(4.69 \pm 0.25) \times 10^{45}$
	$g'$ ,	<24.58		$4.031 \times 10^{15}$	$<1.1 \times 10^{45}$
Рентгеновский диапазон:					
SRG/eROSITA	0.5–2 keV ( $\Gamma = 1.8$ )	$1.0_{-0.4}^{+0.5} \times 10^{-13}$ эрг см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	4		
Производные величины:					
$\alpha_{\text{ox}}$ (2500 Å–2 keV)		$0.93_{-0.08}^{+0.09}$			
$\alpha_{W1,zPS}$		$0.20 \pm 0.02$			
$\nu L_\nu$ (5 GHz)		$(6.7 \pm 0.2) \times 10^{43}$ эрг с <sup>-1</sup>			
$\nu L_\nu$ (4400 Å)		$(7.68 \pm 0.03) \times 10^{45}$ эрг с <sup>-1</sup>			
$\nu L_\nu$ (2500 Å)		$(1.20 \pm 0.02) \times 10^{46}$ эрг с <sup>-1</sup>			
$\nu L_\nu$ (2 keV)		$1.9_{-0.8}^{+1.1} \times 10^{46}$ эрг с <sup>-1</sup>			
$L$ (bolometric)		$(1.5-2) \times 10^{47}$ эрг с <sup>-1</sup>			

Примечание. Светимости приведены в системе покоя квазара и поправлены за поглощение в Галактике.

Ссылки. (1) Интема и др. (2017), (2) Кондон и др. (1998), (3) Гордон и др. (2020) (4) данная работа, (5) Деи и др. (2018) DESI LIS DR8, (6) Чамберс и др. (2016) PS1 DR2 stacked.

WISE (Райт и др., 2010; Деи и др., 2018; Лэнг, 2016), видимый диапазон — DESI Legacy Imaging Survey (DESI LIS) DR8 (Деи и др., 2018), PS1 DR2 stacked (Чамберс и др., 2016).

Полученное СРЭ показано на рис. 6, а использованные для его построения данные приведены в табл. 4. Оптические и инфракрасные измерения, а также рассчитанные по ним светимости были поправлены за галактическое поглощение, используя значение избытка цвета в направлении на квазар  $E(B - V) = 0.077$  (Шлегель и др., 1998). Для обзора DESI LIS и для фильтров  $W1$ ,  $W2$  WISE использовались соответствующие поправочные коэффициенты “mw\_transmission” из каталога DESI LIS DR8 tractor. Для поправки фотометрии Pan-STARRS за поглощение в Галактике применялись стандартный закон поглощения  $R_V = 3.1$  и функция зависимости поглощения от длины волны Карделли и др. (1989).

### Радиосвойства

Источник надежно детектируется в обзоре NRAO VLA Sky Survey (NVSS) на частоте 1.4 ГГц. Помимо детектирования в обзоре NVSS, проведенном в 1990-х гг., квазар SRGE J170245.3+130104 был недавно зарегистрирован в обзоре Very Large Array Sky Survey Epoch 1 (VLASS)<sup>5</sup> на частоте 2.99 ГГц (Гордон и др., 2020) (см. табл. 4). Кроме того, можно использовать отсутствие значимого детектирования квазара SRGE J170245.3+130104 в обзоре TGSS (который покрыл  $3.6\pi$  стерадиана небесной сферы, включая местоположение исследуемого объекта), чтобы поставить верхний предел 25 мЯн на плотность потока источника на частоте  $\nu = 150$  МГц (см. раздел 4.2 статьи Интема и др. 2017).

Таким образом, на текущий момент в нашем распоряжении есть два измерения и один верхний предел на плотность потока в диапазоне от 150 МГц — 3 ГГц. Как видно на рис. 6, по этим данным спектр радиоизлучения должен иметь максимум между 1 и 10 ГГц в системе покоя квазара. Однако к этому выводу следует относиться с осторожностью из-за вполне вероятной переменности объекта, так как обсуждаемые радионаблюдения были проведены в разные эпохи (в частности, измерения NVSS и VLASS разделены промежутком больше 20 лет). Напомним, что рентгеновская яркость квазара SRGE J170245.3+130104 изменилась примерно в 2 раза на масштабе полугода (см. раздел “Рентгеновские данные”).

Высокая измеренная плотность потока в гигагерцовом диапазоне однозначно свидетельствует о том, что квазар SRGE J170245.3+130104 является радиогромким. Для количественного описания радиогромкости можно использовать стандартный параметр:

$$R \equiv \frac{f_{\nu, 5 \text{ GHz}}}{f_{\nu, 4400 \text{ \AA}}}, \quad (1)$$

где  $f_{\nu, 5 \text{ GHz}}$  и  $f_{\nu, 4400 \text{ \AA}}$  — плотности потока излучения на частоте в 5 ГГц и частоте, соответствующей длине волны 4400 Å в системе покоя квазара. Для оценки  $f_{\nu, 5 \text{ GHz}}$  можно предположить, что спектр в районе этой частоты описывается степенным законом с наклоном  $\alpha_r = 0$  ( $S_\nu \propto \nu^{-\alpha_r}$ ), и нормировать спектр по измерению NVSS на наблюдаемой частоте 1.4 ГГц. Величину  $f_{\nu, 4400 \text{ \AA}}$  можно рассчитать, исходя из наклона  $\alpha_{W1, zPS} = 0.2$  ультрафиолетового (в системе покоя квазара) участка спектра, определенного по измеренным значениям плотности потока в фильтрах  $W1$  и  $z(PS1)$  (см. табл. 4).

Таким образом, для квазара SRGE J170245.3+130104 получается значение  $R \approx 1200$ . Такое высокое значение радиогромкости характерно для блазаров (Белладитта и др., 2020), т.е. особой категории радиогромких квазаров, в которых релятивистский джет направлен в нашу сторону. Известно всего несколько объектов на  $z > 5$ , у которых  $R > 10^3$  (Белладитта и др., 2019). Однако, если по описанному выше методу провести расчет  $f_{\nu, 5 \text{ GHz}}$ , используя вместо данных NVSS данные VLASS, то спектральная плотность  $f_{\nu, 5 \text{ GHz}}$  окажется примерно в 3 раза ниже. Как следствие, уменьшится и оценка радиогромкости:  $R \approx 360$ , а значения  $R \sim 100$  характерны скорее для “обычных” радиогромких квазаров, чем для блазаров (см. Белладитта и др., 2020).

Интересно сравнить СРЭ квазара SRGE J170245.3+130104 с типичными спектрами радиогромких квазаров и блазаров. С этой целью на рис. 6 показаны шаблон среднего спектра радиогромких квазаров из работы Шанг и др. (2011) и шаблон среднего спектра блазаров в диапазоне радиосветимостей  $\log L_{5 \text{ GHz}} = 43-44$  (в который попадает квазар SRGE J170245.3+130104) из статьи (Фоссати и др., 1998). В первом случае шаблон был нормирован по измеренной звездной величине квазара SRGE J170245.3+130104 в фильтре  $z'$  DESI LIS.

Как видно на рис. 6, шаблон блазара плохо подходит для описания СРЭ квазара SRGE J170245.3+130104. Шаблон радиогромкого квазара демонстрирует существенно лучшее согласие с наблюдательными данными. При этом необходимо учитывать то, что приведенный шаблон

<sup>5</sup> <https://cirada.ca/vlasscatalogueq10>

не является универсальным СРЭ радиогромких квазаров, и формы спектров индивидуальных объектов могут существенно отличаться друг от друга (см. Шанг и др., 2011).

Квазар SGR J170245.3+130104 характеризуется самой большой измеренной плотностью потока на 1.4 ГГц (26 мЯн) среди известных радиогромких квазаров (включая блазары) на  $z \gtrsim 5.5$  (см. табл. А.1 в статье Белладитта и др., 2020). В частности, он почти в два раза ярче квазара PSO J352.4034–15.3373 (14.9 мЯн, Банадос и др., 2018), который до открытия первого блазара на  $z > 6$  (23.7 мЯн, Белладитта и др., 2020) считался самым мощным радиогромким квазаром на  $z > 5.5$ . При этом надо отметить, что на меньших красных смещениях  $4.5 < z < 5.5$  есть источники с еще большими значениями радиогромкости вплоть до  $R > 10^4$  (Белладитта и др., 2019; Копылов и др., 2006).

Завершая обсуждение радиосвойств квазара SGR J170245.3+130104, заметим, что для выяснения того, является ли он блазаром, необходимо провести детальные исследования его спектральных и пространственных характеристик в радиодиапазоне.

*Соотношение между рентгеновской и ультрафиолетовой светимостями*

В исследованиях квазаров часто используется эффективный наклон спектра ( $\alpha_{\text{ох}}$ ) между 2500 Å и 2 кэВ (Тананбаум и др., 1979):

$$\alpha_{\text{ох}} \equiv -\frac{\log(L_{2 \text{ кэВ}}/L_{2500 \text{ Å}})}{\log(\nu_{2 \text{ кэВ}}/\nu_{2500 \text{ Å}})} = \quad (2)$$

$$= -0.3838 \log\left(\frac{L_{2 \text{ кэВ}}}{L_{2500 \text{ Å}}}\right),$$

где  $L_{2500 \text{ Å}}$ ,  $L_{2 \text{ кэВ}}$  — спектральная плотность светимости в системе покоя квазара (измеряется в единицах эрг с<sup>-1</sup> Гц<sup>-1</sup>) на длине волны 2500 Å и энергии 2 кэВ соответственно. Параметр  $\alpha_{\text{ох}}$  содержит указание об относительном вкладе в энерговыделение различных механизмов, таких как: тепловое излучение аккреционного диска, переизлучение в широких линиях, нагрев короны диска, излучение релятивистских джетов.

Чтобы оценить параметр  $\alpha_{\text{ох}}$  для квазара SGR J170245.3+130104, его монохроматическая рентгеновская светимость на энергии 2 кэВ была определена по данным телескопа eROZITA, предполагая, что рентгеновский спектр описывается степенным законом с наклоном  $\Gamma = 1.8$  (см. раздел “Рентгеновские данные”). Для расчета 2500 Å

предполагалось, что оптический спектр описывается шаблоном среднего спектра радиогромких квазаров (Шанг и др., 2011), нормированным по измеренной видимой звездной величине в фильтре  $z'$  DESI LIS. Полученные значения рентгеновской и ультрафиолетовой светимостей приведены в табл. 4.

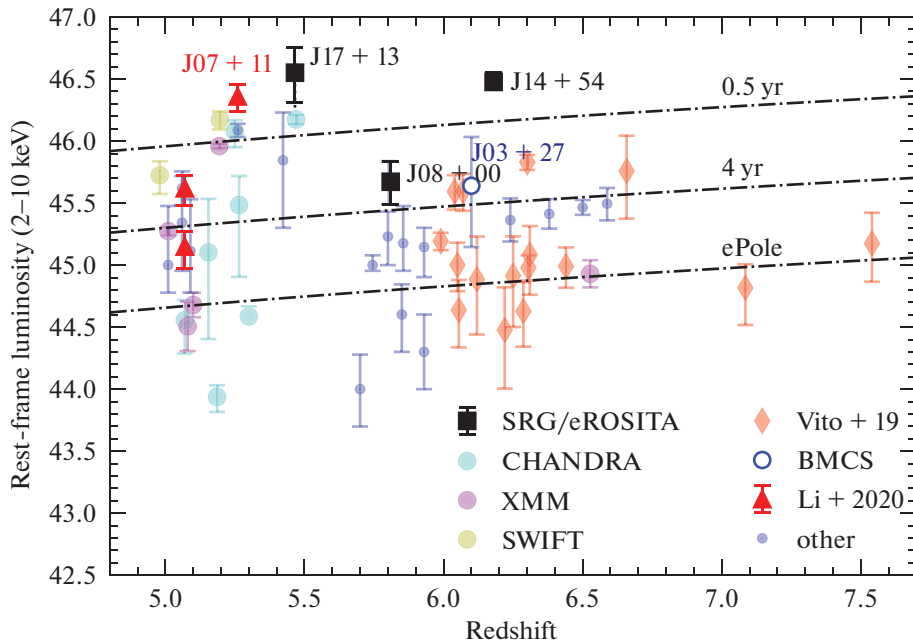
В результате был получен наклон  $\alpha_{\text{ох}} = 0.93^{+0.09}_{-0.08}$ . Такое значение говорит о том, что в СРЭ квазара SGR J170245.3+130104 есть мощный рентгеновский избыток по сравнению с подавляющим большинством исследованных квазаров. Об этом же свидетельствует и прямое сравнение СРЭ квазара SGR J170245.3+130104 с шаблонами средних спектров радиогромких квазаров и блазаров (см. рис. 6). Для сравнения радиотихие квазары в среднем характеризуются значением  $\alpha_{\text{ох}} \approx 1.37$  (Люссо и др., 2010). Радиогромкие квазары характеризуются несколько большей относительной рентгеновской яркостью, однако значения  $\alpha_{\text{ох}} \leq 1.2$  являются экстремальными и для этого класса объектов (см., например, Жу и др., 2020).

В этом смысле квазар SGR J170245.3+130104 похож на квазар CFHQS J142952+544717 = SGR J142952.1+544716 на  $z = 6.18$ , исследованный в работе Медведева и др. (2020), для которого было получено значение  $\alpha_{\text{ох}} = 1.11^{+0.25}_{-0.24}$ . Как обсуждается в работах Медведева и др. (2020, 2021), мощный рентгеновский избыток в СРЭ квазара CFHQS J142952+544717 может быть связан с обратным комптоновским рассеянием реликтового излучения Вселенной (плотность энергии которого растет с красным смещением как  $(1+z)^4$ ) в релятивистских джетах. Возможно, мы наблюдаем похожее явление и в немного более близком квазаре SGR J170245.3+130104.

*Болометрическая светимость*

На основе представленного на рис. 6 СРЭ можно оценить болометрическую светимость квазара SGR J170245.3+130104 аналогично тому, как это было сделано в работе Медведева и др. (2020) для другого далекого радиогромкого квазара CFHQS J142952+544717 = SGR J142952.1+544716.

Используя шаблон радиогромкого квазара из работы Шанг и др. (2011), можно оценить светимость на энергиях ниже 2 кэВ. Она составляет  $L_{<2 \text{ кэВ}} \approx 1.2 \times 10^{47}$  эрг/с. Светимость в диапазоне 2–100 кэВ можно оценить с помощью экстраполяции рентгеновского спектра с наклоном  $\Gamma = 1.8$ , измеренного (на энергиях 2–32 кэВ в системе покоя квазара) телескопом eROZITA. Таким образом, получаем  $L_{2-100 \text{ кэВ}} = (7 \pm 3) \times 10^{46}$  эрг/с.



**Рис. 7.** Распределение по рентгеновской светимости известных квазаров на  $z > 5$ , которые были зарегистрированы в рентгеновских лучах обсерваториями Chandra, XMM-Newton, Swift им. Нила Джерельса, включая три радиотихих квазара из статьи Ли и др. (2021). Черными квадратами показаны квазары SRGE J170245.3+130104 (данная работа), CFHQS J142952+544717 (Медведев и др., 2020) и SDSS J083643.85+005453.3 (Вольф и др., 2021), обнаруженные в рентгеновских лучах обсерваторией СРГ (первые два в ходе первого полугодичного обзора всего неба, третий – во время глубокого обзора поля eFEDS на этапе проверочных наблюдений обсерватории). Для квазаров SRGE J170245.3+130104 и SDSS J074749.18+115352.46 (J07+11), у которых обнаружена значительная рентгеновская переменность, показаны значения светимости в более ярком состоянии источников. Самый далекий блазар (Белладитта и др., 2020) обозначен на рисунке “J03+27”. Красными треугольниками с вершиной направленной вниз показаны источники из каталога (и др.; 2019) рентгеновских квазаров на  $z > 6$ . Три штрихпунктирных линии обозначают характерные пороги чувствительности СРГ/еРОЗИТА для: одного полугодичного обзора (0.5 yr), четырехлетнего обзора (4 yr) и областей около полюсов эклиптики (ePole) (Предель и др., 2020; Сюняев и др., 2021).

Предполагая, что вклад излучения на еще более высоких энергиях (выше 100 кэВ) незначителен, находим, что болометрическая светимость квазара SRGE J170245.3+130104 составляет  $L_{\text{bol}} = (1.5\text{--}2) \times 10^{47}$  эрг/с.

Предполагая, что болометрическая светимость не превышает эддингтоновскую критическую светимость, можно получить нижний предел на массу сверхмассивной черной дыры в квазаре SRGE J170245.3+130104:  $M_{\text{BH}} > 10^9 M_{\odot}$ .

Таким образом, болометрическая светимость и масса черной дыры квазара SRGE J170245.3+130104 оказываются сравнимы с соответствующими характеристиками других ярчайших радиогромких квазаров на  $z > 5$  (см., например, Медведев и др., 2020).

### SRGE J170245.3+130104 — ЯРЧАЙШИЙ В РЕНТГЕНЕ КВАЗАР НА $z > 5$

Открытый телескопом еРОЗИТА обсерватории СРГ квазар SRGE J170245.3+130104 имеет колоссальную рентгеновскую светимость и на данный

момент является ярчайшим в рентгене среди известных нам квазаров на  $z > 5$  на половине неба, за обработку данных СРГ/еРОЗИТА на которой отвечают российские ученые. Уникальна ли такая высокая рентгеновская светимость вообще для квазаров на  $z > 5$ ?

Чтобы ответить на этот вопрос, мы составили каталог всех зарегистрированных в рентгене на текущий момент квазаров на  $z > 5$ . Подробности того, как была собрана эта информация, описаны в приложении в конце статьи. Полученный каталог (всего 52 объекта) представлен в табл. 5, ссылки на рентгеновские данные и измерения красных смещений приведены в табл. 6 и 7 соответственно. На основе собранной информации можно сравнить рентгеновские светимости квазара SRGE J170245.3+130104 и ранее известных квазаров. Результаты этого сравнения представлены на рис. 7. Видно, что радиогромкий квазар SRGE J170245.3+130104 является ярчайшим в рентгене среди всех (включая блазары) известных квазаров на  $z > 5$ .

Отметим, что во втором обзоре неба телескопа ePOZITA обсерватории СРГ (спустя полгода после первого наблюдения) рентгеновская светимость квазара SRGE J170245.3+130104 уменьшилась примерно в 2 раза (см. раздел “Рентгеновские данные”). Интересно, что ярчайший в рентгене радиотихий квазар SDSS 074749.18+115352.46 демонстрирует переменность в рентгене сравнимой амплитуды на масштабе всего нескольких часов (Ли и др., 2021).

Из рис. 7 следует, что внимание рентгеновских обсерваторий до сих пор было приковано в основном к квазарам на  $z \gtrsim 6$ . Уникальные данные четырехлетнего обзора СРГ/ePOZITA позволяют найти все квазары в малоизученной области экстремально больших рентгеновских светимостей ( $L_X > 5 \times 10^{45}$  эрг/с). Совместное использование данных рентгеновских и оптических обзоров поможет повысить чистоту выборок кандидатов в далекие квазары и позволит заполнить пробелы в распределении квазаров по красному смещению (рис. 7).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытый с помощью рентгеновской обсерватории СРГ и 6-м телескопа БТА рентгеновский квазар SRGE J170245.3+130104 на  $z \approx 5.47$  оказался самым мощным в рентгеновских лучах среди известных объектов в ранней Вселенной ( $z > 5$ ), а также одним из самых мощных в радио.

Большая радиогромкость квазара ( $R \sim 10^3$ ) указывает на то, что он может быть блазаром. Для проверки этой гипотезы необходимо провести радиоинтерферометрические наблюдения объекта на нескольких длинах волн. Отметим, что в настоящее время известно всего лишь несколько блазаров на  $z > 5$  (Белладитта и др., 2020), и они все уступают по своей рентгеновской светимости квазару SRGE J170245.3+130104.

Существенно дополнить физическую картину могли бы также спектроскопические измерения в близком инфракрасном диапазоне ( $\lambda \sim 1.6$  мкм). Ожидается, что в этом диапазоне должна проявиться широкая эмиссионная линия MgII, по параметрам которой можно будет измерить массу черной дыры.

Квазар SRGE J170245.3+130104 демонстрирует значительную переменность в рентгеновских лучах по данным первых двух обзоров неба телескопа ePOZITA обсерватории СРГ. Мы будем продолжать следить за его переменностью в следующих сканах СРГ/ePOZITA.

Обнаружение в рентгене с помощью обсерватории СРГ радиогромких квазаров CFHQS J142952+

+544717 = SRGE J142952.1+544716 на  $z = 6.18$  (Медведев и др., 2020) и SRGE J170245.3+130104 на  $z = 5.47$  с рекордными рентгеновскими светимостями  $\sim 3 \times 10^{46}$  эрг/с открывает новую страницу в исследовании роста сверхмассивных черных дыр в ранней Вселенной. Мы надеемся, что выборка подобных интереснейших объектов будет значительно расширена в ходе продолжающегося обзора всего неба. Ключевую роль играет спектроскопическая проверка новых рентгеновских источников. Поиск уникальных квазаров среди источников из обзора обсерватории СРГ продолжается на 6-м телескопе БТА, 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК (Буренин и др., 2016) и на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 (Бикмаев и др., 2020).

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России).

Это исследование основано на наблюдениях телескопа ePOZITA 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/ePOZITA изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка (MPE) при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Используемые в настоящей работе данные телескопа ePOZITA обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом ePOZITA и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа СРГ/ePOZITA. Система SRGz создана в отделе Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН (в научной рабочей группе по поиску и отождествлению рентгеновских источников, составлению каталога по данным телескопа СРГ/ePOZITA).

В работе при расчете галактического<sup>6</sup> и межгалактического<sup>7</sup> поглощения, расстояний и других астрофизических величин использовались функции из библиотек astropy (Робитайль и др., 2013),

<sup>6</sup> <https://extinction.readthedocs.io/en/latest/>

<sup>7</sup> <https://pysynphot.readthedocs.io>

Таблица 5. Каталог рентгеновских квазаров на  $z > 5$ 

Источник	RA, град	DEC, град	$z$	REF( $z$ )	$z_{RC20}$	$FX \times 10^{-14}$ , эрг/с/см <sup>2</sup>	REF( $FX$ )	$\log(LX_{2-10})$ , эрг/с	REF( $LX$ )
SDSS J00026+2550	0.6642	25.8430	5.800	0589	5.820	$0.390^{+0.240}_{-0.160}$	10	$45.23^{+0.20}_{-0.23}$	10
SDSS J000552.33-000655.6	1.4681	-0.1155	5.855	DR16Q	5.850	$0.250^{+0.270}_{-0.190}$	10, 1	$45.18^{+0.30}_{-0.22}$	10
SDSS J002526.84-014532.5	6.3618	-1.7590	5.060	DR16Q	5.070	$1.410^{+0.370}_{-0.380}$	6	$45.62^{+0.10}_{-0.14}$	6
CFHQS J0050+3445	12.5278	34.7563	6.250	2051	6.253	$0.145^{+0.157}_{-0.089}$	5	$44.91^{+0.32}_{-0.41}$	5
SDSS J010013.02+280225.8	15.0542	28.0405	6.301	ULTRA	6.326	$0.771^{+0.110}_{-0.102}$	5, 10, 2	$45.83^{+0.06}_{-0.06}$	5
HRQC J011544.78+001514.9	18.9366	0.2541	5.100	1245	5.100	$0.154 \pm 0.039$	2	$44.68 \pm 0.10$	2
SDSS J013127.34-032100.1	22.8639	-3.3500	5.196	DR16Q	5.180	$13.180^{+2.168}_{-2.168}$	3	$46.17^{+0.07}_{-0.08}$	3
ATLAS J025.6821-33.4627	25.6821	-33.4627	6.310	VAHIZ	6.338	$0.198^{+0.143}_{-0.103}$	5, 10, 3	$45.08^{+0.23}_{-0.32}$	5
SDSS J022112.62-034252.2	35.3026	-3.7145	5.011	DR16Q	5.020	$0.628 \pm 0.052$	2	$45.27 \pm 0.03$	2
VDES J0224-4711	36.1106	-47.1915	6.500	VDES	6.500	$0.508 \pm 0.065$	13, 2	$45.47 \pm 0.06$	13
PSO J036.5078+03.0498	36.5078	3.0498	6.527	PSO	6.541	$0.161 \pm 0.046$	2	$44.93 \pm 0.11$	2
SDSS J023137.64-072854.4	37.9069	-7.4818	5.423	DR16Q	5.370		14, 2, 1	$45.85^{+0.39}_{-0.54}$	14
PSO J030947.49+271757.31	47.4479	27.2993	6.100	BMCS		$3.400^{+5.200}_{-1.900}$	15	$45.64^{+0.39}_{-0.50}$	15
SDSS J074154.72+252029.6	115.4780	25.3416	5.194	1244	5.194	$2.818 \pm 0.126$	2, 1	$45.96 \pm 0.02$	2
SDSS J074749.18+115352.4	116.9549	11.8979	5.260	WISEHI	5.260	$3.490^{+0.440}_{-0.450}$	6	$46.09 \pm 0.05$	6
SDSS J075618.13+410408.6	119.0756	41.0691	5.060	DR16Q	5.060		14, 1	$45.34^{+0.41}_{-0.39}$	14
SDSS J08367+0054	129.1831	0.9147	5.803	1457	5.810	$9.900^{+3.700}_{-3.200}$	9, 10, 14, 1	$45.67^{+0.17}_{-0.18}$	9
SDSS J084035.09+562419.9	130.1463	56.4056	5.850	0590	5.844	$0.090^{+0.070}_{-0.050}$	10, 1	$44.60^{+0.24}_{-0.30}$	10
SDSS J084229.43+121850.5	130.6226	12.3140	6.055	OVLAP	6.076	$0.075^{+0.056}_{-0.038}$	5	$44.64^{+0.24}_{-0.30}$	5
Q J0906+6930	136.6283	69.5086	5.470	1557	5.470	$4.127^{+0.355}_{-0.355}$	1, 3	$46.17^{+0.04}_{-0.04}$	1
COSM J095908.1+022707	149.7838	2.4521	5.070	1221	5.070	$0.117^{+0.053}_{-0.054}$	1	$44.56^{+0.16}_{-0.27}$	1
COSM J100051.6+023457	150.2150	2.5827	5.300	1221	5.300	$0.114 \pm 0.024$	4	$44.59^{+0.08}_{-inf}$	4
SDSS J102623.62+254259.4	156.5985	25.7165	5.250	DR16Q	5.250	$3.599^{+0.854}_{-0.903}$	1, 3	$46.08^{+0.09}_{-0.13}$	1
SDSS J10304+0524	157.6131	5.4153	6.305	1144	6.308	$0.176^{+0.044}_{-0.038}$	5, 10, 14, 1, 2	$44.98^{+0.10}_{-0.10}$	5
PSO J159.2257-02.5438	159.2258	-2.5439	6.380	PS1	6.381	$0.411 \pm 0.058$	13, 2	$45.41 \pm 0.12$	13
SDSS J10445-0125	161.1381	-1.4172	5.745	0695	5.785	$0.310^{+0.050}_{-0.040}$	10, 2	$45.00^{+0.08}_{-0.05}$	10
SDSS J10487+4637	162.1877	46.6218	6.287	DR14Q	6.228	$0.077^{+0.056}_{-0.037}$	5, 10	$44.63^{+0.24}_{-0.29}$	5
SDSS J105036.46+580424.6	162.6520	58.0735	5.155	DR16Q	5.155	$0.398^{+0.677}_{-0.318}$	1	$45.10^{+0.43}_{-0.70}$	1
SDSS J105322.98+580412.1	163.3458	58.0700	5.265	DR16Q	5.265	$0.917^{+0.655}_{-0.676}$	1	$45.49^{+0.23}_{-0.58}$	1
ULAS J112001.48+064124.3	170.0062	6.6901	7.085	1318	7.084	$0.068^{+0.048}_{-0.028}$	5, 10, 14, 1, 2	$44.82^{+0.19}_{-0.30}$	5
SDSS J114657.79+403708.6	176.7408	40.6191	4.980	DR16Q	5.009	$5.167^{+1.526}_{-1.526}$	3	$45.73^{+0.11}_{-0.15}$	3
RD J1148+5253	177.0675	52.8942	5.700	1139	5.700	$0.020^{+0.020}_{-0.010}$	10	$44.00^{+0.28}_{-0.30}$	10
SDSS J114816.64+525150.3	177.0694	52.8640	6.440	DR16Q	6.419	$0.196^{+0.083}_{-0.064}$	5, 10, 14	$44.99^{+0.15}_{-0.17}$	5
SDSS J120441.73-002149.6	181.1739	-0.3638	5.090	DR16Q	5.090		14, 1	$45.11^{+0.42}_{-0.34}$	14



Таблица 5. Окончание

Источник	RA, град	DEC, град	$z$	REF( $z$ )	$z_{RC20}$	$FX \times 10^{-14}$ , эрг/с/см <sup>2</sup>	REF( $FX$ )	$\log(LX_{2-10})$ , эрг/с	REF( $LX$ )
B01.174	189.1998	62.1615	5.186	0127	5.186	$0.027^{+0.006}_{-0.007}$	1	$43.94^{+0.09}_{-0.12}$	1
3XMM J125329.4+305539	193.3721	30.9277	5.080	KHOR1	5.080	$0.104 \pm 0.061$	2	$44.51 \pm 0.20$	2
SDSSp J130608.26+035626.3	196.5344	3.9406	5.990	0144	6.034	$0.322^{+0.544}_{-0.049}$	5, 10, 14, 1	$45.19^{+0.07}_{-0.07}$	5
SDSS J13358+3533	203.9617	35.5544	5.930	0590	5.901	$0.040^{+0.040}_{-0.020}$	10	$44.30^{+0.30}_{-0.30}$	10
ULAS J134208.10+092838.6	205.5337	9.4774	7.540	HIZ7.5	7.540	$0.173^{+0.133}_{-0.088}$	5	$45.17^{+0.25}_{-0.31}$	5
SDSS J14111+1217	212.7972	12.2936	5.930	0589	5.904	$0.350^{+0.230}_{-0.200}$	10, 14, 1	$45.15^{+0.15}_{-0.24}$	10
CFHQS J1429+5447	217.4674	54.7882	6.210	2051	6.183	$10.800^{+0.900}_{-1.000}$	8	$46.48^{+0.08}_{-0.06}$	8
CFHQS J15096-1749	227.4242	-17.8242	6.120	2049	6.122	$0.142^{+0.172}_{-0.091}$	5	$44.89^{+0.34}_{-0.45}$	5
SDSS J16029+4228	240.7256	42.4731	6.070	0589	6.090	$0.689^{+0.262}_{-0.210}$	5, 10, 14, 1	$45.60^{+0.14}_{-0.16}$	5
SDSS J16235+3112	245.8831	31.2003	6.220	0589	6.260	$0.089^{+0.107}_{-0.059}$	5, 10, 1	$44.48^{+0.34}_{-0.47}$	5
SDSS J16305+4012	247.6414	40.2028	6.050	0588	6.065	$0.204^{+0.105}_{-0.787}$	5, 10, 14, 1, 2	$45.00^{+0.18}_{-0.21}$	5
CFHQS J16413+3755	250.3405	37.9223	6.040	2049	6.047	$0.636^{+0.226}_{-0.181}$	5	$45.59^{+0.13}_{-0.15}$	5
SRGE J170245.3+130104	255.6888	13.0173	5.466	KHOR21		$10.3^{+5.1}_{-4.0}$	7	$46.56^{+0.19}_{-0.23}$	7
PSO J308.0416-21.2339	308.0416	-21.2340	6.240	PS1	6.234		12, 2	$45.36^{+0.17}_{-0.17}$	12
PSO J323.1382+12.2986	323.1383	12.2987	6.588	PS1MAZ	6.588	$0.522^{+0.177}_{-0.139}$	11	$45.50^{+0.13}_{-0.13}$	11
SDSS J220226.77+150952.3	330.6115	15.1646	5.070	WISEHI	5.070	$0.500^{+0.160}_{-0.170}$	6	$45.15^{+0.12}_{-0.18}$	6
SDSS J221644.01+001348.1	334.1834	0.2300	5.010	DR16Q	5.010		14, 1, 2	$45.00^{+0.48}_{-0.22}$	14
PSO J338.2298+29.5089	338.2298	29.5089	6.658	PSO	6.666	$0.141^{+0.130}_{-0.083}$	5	$45.76^{+0.29}_{-0.38}$	5

**Примечание.** Источник — название квазара, RA, DEC — прямое восхождение и склонение (J2000) оптического компаньона,  $z$  — спектроскопическое красное смещение, REF( $z$ ) — библиографическая ссылка на измерение  $z$  (см. табл. 7 ниже),  $z_{RC20}$  — спектроскопическое красное смещение из каталога Росс и Кросс (2020),  $FX$  — рентгеновский поток. REF( $FX$ ) — библиографическая ссылка на величину  $FX$  (диапазон измеряемого  $FX$  обусловлен соответствующим рентгеновским обзором, см. раздел “SRGEJ170245.3+130104 — Ярчайший в рентгене квазар на  $z > 5$ ” и табл. 6),  $\log(LX_{2-10})$  — рентгеновская светимость в диапазоне 2–10 кэВ в системе покоя квазара. Расчет светимости проводился только для объектов с REF( $LX$ ) = 1, 2, 3. При расчете светимости использовались спектроскопические значения  $z$ ,  $k$ -поправка рассчитана для степенного рентгеновского спектра с фотонным индексом  $\Gamma = 1.8$  без учета какого-либо поглощения. Для остальных источников (REF( $LX$ ) > 3) значения  $FX$  и  $\log(LX_{2-10})$  приведены из оригинальных статей (см. соответствующие ссылки).

pysynphot lim15 и specutils<sup>8</sup>. Сведения о кривых пропускания и других характеристиках фотометрических фильтров взяты с сайта Spanish Virtual Observatory Filter Profile Service<sup>9</sup> Родриго и др. (2012, 2020). В работе использовались каталоги базы данных Vizier Охзенбейн и др. (2000).

Это исследование было выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 19-12-00396).

<sup>8</sup> <https://specutils.readthedocs.io/>

<sup>9</sup> <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/>

ПРИЛОЖЕНИЕ

КАТАЛОГ РЕНТГЕНОВСКИХ КВАЗАРОВ  
НА  $z > 5$

Общеизвестные и широкоиспользуемые сводные каталоги далеких ( $z \gtrsim 5.5$ ) рентгеновских квазаров были составлены несколько лет назад (см., например, Нанни и др., 2017; Вито и др., 2019). Поиск новых квазаров активно продолжается во всех диапазонах электромагнитного спектра, поэтому опубликованные каталоги быстро устаревают. В свете успешной работы обсерватории

**Таблица 6.** Расшифровка библиографии рентгеновских потоков и светимостей из табл. 5

REF( <i>FX</i> ), REF( <i>LX</i> )	Ссылка	Рентгеновский диапазон, кэВ
1	Эванс и др. (2020)	0.5–2
2	Вебб и др. (2020)	0.5–2
3	Эванс и др. (2020b)	0.3–10
4	Цивано и др. (2016)	0.5–2
5	Вито и др. (2019)	0.5–2
6	Ли и др. (2021)	0.5–2
7	Эта статья	0.5–2
8	Медведев и др. (2021)	0.2–10
9	Вольф и др. (2021)	0.5–2
10	Нанни и др. (2017)	0.5–2
11	Вонг и др. (2021)	0.5–2
12	Коннор и др. (2019)	0.5–2
13	Понс и др. (2020)	0.5–2
14	Салвестрини и др. (2019)	—
15	Белладитта и др. (2020)	0.3–10

СРГ мы составили обновленный и полный каталог всех спектроскопически подтвержденных квазаров на  $z > 5$ , задетектированных в рентгеновском диапазоне (табл. 5).

За основу каталога была взята совместная выборка спектрально подтвержденных квазаров на  $z > 5$ , составленная из двух каталогов: “The Million Quasars catalog, v7.0a” (Флеш, 2021) и полного каталога спектроскопически подтвержденных квазаров на  $z > 5$  “VHzQ” (Росс, Кросс, 2020). Эта выборка из 542 “оптических” квазаров на  $z \gtrsim 5$  была скоррелирована с рентгеновскими компаньонами, взятыми из списка статей, приведенных в табл. 6. Информация о рентгеновских потоках и светимостях компаньонов приведена в табл. 5. Там же приведены координаты оптических компаньонов и красные смещения из работы Флеш (2021), а также красные смещения из каталога Росс, Кросс (2020). Для большинства объектов приведен наблюдаемый рентгеновский поток в 0.5–2 кэВ. Рентгеновские потоки и светимости из статьи Vito. В статье Салвестрини и др. (2019) нет информации о рентгеновских потоках, поэтому в табл. 5 для источников из этой работы потоки не приводятся. Ссылка на литературный источник, откуда взят рентгеновский

**Таблица 7.** Расшифровка библиографии спектроскопических красных смещений из табл. 5

REF( <i>z</i> )	Ссылка
127	Барджер и др. (2002)
144	Бекер и др. (2001)
588	Фан и др. (2003)
589	Фан и др. (2004)
590	Фан и др. (2006)
695	Гудрич и др. (2001)
1139	Махабал и др. (2005)
1144	Майолино и др. (2004)
1221	Мастерс и др. (2012)
1244	МакГрир и др. (2009)
1245	МакГрир и др. (2013)
1318	Мортлок и др. (2011)
1457	Петтини и др. (2003)
1557	Романи и др. (2004)
2049	Виллотт и др. (2007)
2051	Виллотт и др. (2010)
BMCS	Белладитта и др. (2020)
DR14Q	Пэрис и др. (2018)
DR16Q	Люке и др. (2020)
HIZ7.5	Банадос и др. (2018b)
KHOR1	Хорунжев и др. (2017)
KHOR21	Эта работа
OVRLAP	Жанг и др. (2015)
PS1	Банадос и др. (2016)
PS1MAZ	Мазучелли и др. (2017)
PSO	Венеманс и др. (2015)
ULTRA	Ву и др. (2015)
VAHIZ	Карналл и др. (2015)
VDES	Риид и др. (2017)
WISEHI	Вонг и др. (2016)

поток для данного объекта, в столбце REF( $FX$ ) приведена первой; далее в этом столбце приводятся ссылки на статьи, где упоминаются рентгеновские наблюдения соответствующего источника. Светимости приведены в диапазоне 2–10 кэВ в системе отсчета квазара.

Для оставшихся оптических квазаров, для которых в литературе не был найден рентгеновский компаньон, был проведен поиск в кружке радиусом 6 угл. сек ближайшего рентгеновского компаньона в следующих каталогах: Chandra source catalog Release 2.0 (Эванс и др., 2010, 2020), XMM-Newton 4XMM-DR10 Catalog (Вебб и др., 2020), 2SXPS Swift X-ray telescope Point source catalog (Эванс и др., 2020b). Затем были рассчитаны рентгеновские светимости этих квазаров в диапазоне энергий 2–10 кэВ (в системе покоя объекта)  $L_{2-10\text{ keV}}$ . При этом предполагался степенной спектр с  $\Gamma = 1.8$  и использовались измерения обсерваторий Chandra и XMM-Newton в диапазоне 0.5–2 кэВ и данные обсерватории Swift в диапазоне 0.3–10 кэВ.

В итоге был получен каталог из 52 рентгеновских квазаров на  $z > 5$ , включая обсуждаемый в данной статье квазар SRGE J170245.3+130104. В табл. 7 приведены ссылки на спектроскопические красные смещения этих объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аболфати и др. (B. Abolfathi, D. Aguado, G. Aguilar, P. Allende, A. Almeida, T. Ananna, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235**, 42 (2018).
- Акаике Н., *IEEE Transact. Automat. Control* **19**, 716 (1974).
- Арно (K. Arnaud), *Astronomic.Data Analys. Software and Systems V*, eds. Jacoby G. and Barnes J., *ASP Conf.* **101**, 17 (1996).
- Афанасьев, Моисеев (V. Afanasiev and A. Moiseev), *Baltic Astron.* **20**, 363 (2011).
- Афанасьев В., Амирханян В., *Астрофиз. Бюлл.* **67**, 455 (2012). [V. Afanasiev and V. Amirkhanyan, *Astrophys. Bull.* **67**, 438 (2012).]
- Афанасьев В., Додонов С., Амирханян В., Моисеев А. (), *Астрофиз. Бюлл.* **71**, 514 (2016).
- Банадос и др. (E. Bañados, B. Venemans, R. Decarli, E. Farina, C. Mazzucchelli, F. Walter, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **227**, 11 (2016).
- Банадос и др. (E. Bañados, C. Carilli, F. Walter, E. Momjian, R. Decarli, E. Farina, et al.), *Astrophys. J.* **861**, 14 (2018).
- Банадос и др. (E. Bañados, B. Venemans, C. Mazzucchelli, E. Farina, F. Walter, F. Wang, et al.), *Nature* **553**, 473 (2018).
- Барджер и др. (A. Barger, L. Cowie, W. Brandt, P. Capak, G. Garmire, and A. Hornschemier), *Astron. J.* **124**, 1839 (2002).
- Бекер и др. (R. Becker, X. Fan, R. White, M. Strauss, V. Narayanan, and R. Lupton), *Astron. J.* **122**, 2850 (2001).
- Белладитта и др. (S. Belladitta, A. Moretti, A. Caccianiga, G. Ghisellini, C. Cicone, T. Sbarrato, et al.), *Astron. Astrophys.* **629**, 68 (2019).
- Белладитта и др. (S. Belladitta, A. Moretti, A. Caccianiga, C. Spingola, P. Severgnini, R. Della Ceca, et al.), *Astron. Astrophys.* **635**, 7 (2020).
- Беннет и др. (C. Bennett, D. Larson, J. Weiland, and G. Hinshaw), *Astrophys. J.* **794**, 135 (2014).
- Бикмаев и др. (Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А., Сахибуллин Н.А., Гумеров Р.И., Склянов А.С., Глушков М.В., Борисов В.Д. и др.), *Письма в Астрон. журн.* **46**, 688 (2020). [I.F. Bikmaev et al., *Astron. Lett.* **46**, 645 (2020)].
- Буренин и др. (Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С., и др.), *Письма в Астрон. журн.* **42**, 333 (2016). [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **42**, 295 (2016)].
- Ванден Берк и др. (D. Vanden Berk, G. Richards, A. Bauer, M. Strauss, D. Schneider, and T. Heckman), *Astron. J.* **122**, 549 (2001). *Astron. Astrophys.* 493, 339 (2009)
- Вебб и др. (N. Webb, M. Coriat, I. Traulsen, J. Ballet, C. Motch, F. Carrera, et al.), *Astron. Astrophys.* 6411362020.
- Венеманс и др. (B. Venemans, E. Bañados, R. Decarli, E. Farina, F. Walter, K. Chambers, et al.), *Astrophys. J.* **801**, 11 (2015).
- Виллотт и др. (C. Willott, P. Delorme, A. Omont, J. Bergeron, X. Delfosse, T. Forveille, et al.), *Astron. J.* 13424352007.
- Виллотт и др. (C. Willott, P. Delorme, C. Reyle, L. Albert, J. Bergeron, D. Crampton, et al.), *Astron. J.* 1399062010.
- Вито и др. (F. Vito, W. Brandt, F. Bauer, F. Calura, R. Gilli, B. Luo, et al.), *Astron. Astrophys.* 6301182019.
- Вольф и др. (J. Wolf, K. Nandra, M. Salvato, T. Liu, J. Buchner, M. Brusa, et al.), *In Press arXiv:2101.05585*. <https://arxiv.org/abs/2101.05585>
- Вонг и др. (F. Wang, X. Wu, X. Fan, J. Yang, W. Yi, F. Bian, et al.), *Astrophys. J.* **819**, 24 (2016).
- Вонг и др. (F. Wang, X. Fan, J. Yang, C. Mazzucchelli, X. Wu, J. Li, E. Banados, et al.), *in press arXiv:2011.12458*. <https://arxiv.org/abs/2011.12458>
- Бу и др. (X. Wu, F. Wang, X. Fan, W. Yi, W. Zuo, F. Bian, et al.), *Nature* **518**, 512 (2015).
- Гордон и др. (Y. Gordon, M. Boyce, C. O’Dea, L. Rudnik, H. Andernach, A. Vantghem, et al.), *Res. Not. AAS* **4**, 175 (2020).
- Гудман и Вир (J. Goodman and J. Weare), *Comm. Appl. Math. Comput. Sci.* **65-80**, 5 (2010).
- Гудрич и др. (R. Goodrich, R. Campbell, F. Chaffee, G. Hill, D. Sprayberry, W. Brandt, et al.), *Astrophys. J.* **561**, 23 (2001).

30. Деи и др. (A. Dey, D. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), <https://arxiv.org/pdf/1804.08657.pdf>.
31. Додин и др. (Додин А.В., Потанин С.А., Шатский Н.И., Белинский А.А., Атапин К.Е., Буллак М.А., Егоров О.В., Татарников А.М. и др.), Письма в Астрон. журн. **46**, 459 (2020) [A.V. Dodin et al., *Astron. Lett.* **46**, 429 (2020)].
32. Дэвис и др. (S. Davis, J. Woo, and O. Blaes), *Astrophys. J.* **668**, 2 (2007).
33. Жанг и др. (L. Jiang, I. McGreer, X. Fan, F. Bian, Z. Cai, B. Clement, et al.), *Astron. J.* **149**, 188 (2015).
34. Жу и др. (S. Zhu, W. Brandt, B. Luo, J. Wu, Y. Xue, and G. Yang), *MNRAS* **496**, 245 (2020).
35. Интема и др. (H. Intema, P. Jagannathan, K. Mooley, and D. Frail), *Astron. Astrophys.* **598**, 78 (2017).
36. Карделли и др. (J. Cardelli, G. Clayton, and J. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
37. Карналл и др. (A. Carnall, T. Shanks, B. Chehade, M. Fumagalli, M. Rauch, M. Irwin, et al.), *MNRAS* **451**, 16 (2015).
38. Коллаборация HI4PI и др. (Коллаборация HI4PI, Б. Бехти, Л. Флэр, Р. Келлер, Дж. Керп, Д. Ленц, et al.), *Astron. Astrophys. A* **116**, 594 (2016).
39. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, and M. Brusa), *Astron. Astrophys.* **558**, A89 (2013).
40. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, G. Huetsi, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **558**, A90 (2013).
41. Кондон и др. (J. Condon, W. Cotton, E. Greisen, Q. Yin, R. Perley, G. Taylor, and J. Broderick), *Astron. J.* **115**, 1693 (1998).
42. Коннор и др. (T. Connor, E. Banados, D. Stern, R. Decarli, J. Schindler, X. Fan, and E. Farina), *Astrophys. J.* **887**, 171 (2019).
43. Копылов и др. (A. Kopylov, W. Goss, Yu. Priiskii, N. Soboleva, O. Verkhodanov, A. Temirova, and O. Zhelenkova), *Astron. Letters* **32**, 433 (2006).
44. Кэш (W. Cash), *Astrophys. J.* **228**, 939 (1979).
45. Ли и др. (J. Li, F. Wang, J. Yang, Y. Zhang, Y. Fu, F. Bian, et al.), *Astrophys. J.* **906**, 135 (2021). <https://arxiv.org/abs/2011.02358>
46. Лим и др. (P. Lim, R. Diaz, and V. Laidler), *PySinhphot User's Guide* (Baltimore, MD: STScI). <https://pysinhphot.readthedocs.io/>
47. Лэнг (D. Lang), *Astron. J.* **147**, 108 (2014).
48. Лэнг и др. (D. Lang, D. Hogg, and D. Schlegel), *Astron. J.* **151**, 36 (2016).
49. Люке и др. (B. Lyke, A. Higley, J. McLane, D. Schurhammer, A. Myers, A. Ross, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **250**, 8 (2020).
50. Люссо и др. (E. Lusso, A. Comastri, C. Vignali, G. Zamorani, M. Brusa, R. Gilli, K. Iwasawa, M. Salvato, et al.), *Astron. Astrophys.* **512**, 34 (2010).
51. Мадау (P. Madau), *Astrophys. J.* **441**, 18 (1995).
52. Мазучелли и др. (C. Mazzucchelli, E. Bañados, B. Venemans, R. Decarli, E. Farina, F. Walter, et al.), *Astrophys. J.* **849**, 91 (2017).
53. Майолино и др. (R. Maiolino, E. Oliva, F. Ghinassi, M. Pedani, F. Mannucci, R. Mujica, and Y. Juarez), *Astron. Astrophys.* **420**, 889 (2004).
54. МакГрир и др. (I. McGreer, D. Helfand, and R. White), *Astron. J.* **138**, 1925 (2009).
55. МакГрир и др. (I. McGreer, L. Jiang, X. Fan, G. Richards, M. Strauss, and N. Ross), *Astrophys. J.* **768**, 105 (2013).
56. Массей и др. (P. Massey, K. Strobel, J. Barnes, and E. Anderson), *Astrophys. J.* **328**, 315 (1988).
57. Мастерс и др. (D. Masters, P. Capak, M. Salvato, F. Civano, B. Mobasher, B. Siana, et al.), *Astrophys. J.* **755**, 169 (2012).
58. Махабал и др. (A. Mahabal, D. Stern, M. Bogosavljevic, S. Djorgovski, and D. Thompson), *Astrophys. J.* **634**, 9 (2005).
59. Медведев и др. (P. Medvedev, S. Sazonov, M. Gilfanov, R. Burenin, G. Khorunzhev, A. Meshcheryakov, R. Sunyaev, I. Bikmaev, and E. Irtuganov), *MNRAS* **497**, 1842 (2020).
60. Медведев и др. (P. Medvedev, M. Gilfanov, S. Sazonov, N. Schartel, and R. Sunyaev), *MNRAS*, (2021) В печати <https://arxiv.org/abs/2011.13724>.
61. Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Bohringer, T. Boller, H. Brunner, et al.), *eROSITA Science Book*, (2014). <http://arxiv.org/pdf/1209.3114v2.pdf>
62. Мерлони и др. (A. Merloni, K. Nandra, and P. Predehl), *Nat. Astron.* **4**, 634 (2020).
63. Мортлок и др. (D. Mortlock, S. Warren, B. Venemans, M. Patel, P. Hewett, R. McMahon, et al.), *Nature* **474**, 616 (2011).
64. Мещеряков А., Глазкова В., Герасимов С., Буренин Р., Письма в Астрон. журн. **41**, 339 (2015). [A.V. Meshcheryakov et al., *Astron. Lett.* **41**, 307 (2015)].
65. Мещеряков (Мещеряков А., Глазкова В., Герасимов С., Машечкин И.), Письма в Астрон. журн. **44**, 801 (2018). [A.V. Meshcheryakov et al., *Astron. Lett.* **44**, 735 (2018)].
66. Мещеряков (А. Мещеряков), in preparation (2021).
67. Муфакхаров и др. (T. Mufakharov, A. Mikhailov, Yu. Sotnikova, M. Mingaliev, V. Stolyarov, and A. Erkenov), *MNRAS*, arXiv:2011.12072. <https://arxiv.org/pdf/2011.12072.pdf>
68. Нанни и др. (R. Nanni, C. Vignali, R. Gilli, A. Moretti, and W. Brandt), *Astron. Astrophys.* **603**, 128 (2017).
69. Охзенбейн, Бауэр, Марко (F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 23 (2000).
70. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, et al.), *Proceedings of the SPIE* **8147**, 5 (2011).
71. Петтини и др. (M. Pettini, P. Madau, M. Bolte, J. Prochaska, S. Ellison, and X. Fan), *Astrophys. J.* **594**, 695 (2003).

72. Понс и др. (E. Pons, R. McMahon, M. Banerji, and S. Reed), *MNRAS* **491**, 3884 (2020).
73. Потанин С., Белинский А., Додин А., Желтухов С., Ландер В., Постнов К. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 894 (2020). [S. Potanin, A. Belinski, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Lander, K. Postnov, et al.] Письма в Астрон. журн. **46**, 1 (2020) e-Print, arXiv:2011.03061 (2020) <https://arxiv.org/abs/2011.03061>
74. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babushkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), принята в печать в *Astron. Astrophys.* arXiv:2010.03477.
75. Пэрис и др. (I. Paris, P. Petitjean, E. Aubourg, A. Myers, A. Streblyanska, B. Lyke, et al.), *Astron. Astrophys.* **613**, 51 (2018).
76. Райт и др. (E. Wright, P. Eisenhardt, A. Mainzer, M. Ressler, R. Cutri, T. Jarrett, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
77. Риид и др. (S. Reed, R. McMahon, P. Martini, M. Banerji, M. Auger, P. Hewett, S. Koposov, et al.), *MNRAS* **468**, 4702 (2017).
78. Риид и др. (S. Reed, M. Banerji, G. Becker, P. Hewett, P. Martini, R. McMahon, E. Pons, et al.), *MNRAS* **487**, 1874 (2019).
79. Розен и др. (S. Rosen, N. Webb, M. Watson, et al.), *Astron. Astrophys.* **590**, A1 (2016).
80. Робитайль и др. (T. Robitaille, E. Tollerud, P. Greenfield, M. Droettboom, E. Bray, T. Aldcroft, et al.), *Astron. Astrophys.* **558**, A33 (2013).
81. Родриго и др. (C. Rodrigo, E. Solano, and A. Bayo), IVOA Working Draft 15 october 2012. 10.5479/ADS/bib/2012ivoa\_rept.1015R
82. Родриго и др. (C. Rodrigo, E. Solano, and A. Bayo), XIV.0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society, 2020 id.182. <https://www.sea-astronomia.es/reunion-cientifica-2020>
83. Романи и др. (R. Romani, D. Sowards-Emmerd, L. Greenhill, and P. Michelson), *Astrophys. J.* **610**, 9 (2004).
84. Росс, Кросс (N. Ross and N. Cross), **494**, 789 (2020).
85. Салвестрини и др. (F. Salvestrini, G. Risaliti, S. Bisogni, E. Lusso, and C. Vignali), *Astron. Astrophys.* **631**, 120 (2019).
86. Сюняев и др. (R. Sunyaev et al.), готовится к печати.
87. Тананбаум и др. (H. Tananbaum, Y. Avni, G. Branduardi, M. Elvis, G. Fabbiano, E. Feigelson, R. Giacconi, et al.), *Astrophys. J.* **234**, 9 (1979).
88. Трюмпер (J. Trümper), *Advances in Space Research* **2**, 241 (1982).
89. Фан и др. (X. Fan, M. Strauss, D. Schneider, R. Becker, R. White, Z. Haiman, et al.), *Astron. J.* **125**, 1649 (2003).
90. Фан и др. (X. Fan, J. Hennawi, G. Richards, M. Strauss, D. Schneider, J. Donley, et al.), *Astron. J.* **128**, 515 (2004).
91. Фан и др. (X. Fan, M. Strauss, G. Richards, J. Hennawi, R. Becker, R. White, et al.), *Astron. J.* **131**, 1203 (2006).
92. Флеш (E.W. Flesch), *Publications of the Astronomical Society of Australia* **32**, 010 (2015); (version 5.2, 5 August 2017)
93. Флеш (E.W. Flesch), Milliquas v7.0 (2021) update, Flesch E.W. 2019, arXiv:1912.05614.
94. Фоссати и др. (G. Fossati, A. Celotti, G. Ghisellini, and L. Maraschi), *MNRAS* **289**, 136 (1997).
95. Фоссати и др. (G. Fossati, L. Maraschi, A. Celotti, A. Comastri, and G. Ghisellini), *MNRAS* **299**, 433 (1998).
96. Цивано и др. (F. Civano, S. Marchesi, A. Comastri, M. Urry, M. Elvis, N. Cappelluti, et al.), *Astrophys. J.* **819**, 62 (2016).
97. Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, С.Ю. Сазонов, А.Л. Амвросов, М.В. Еселевич), Письма в Астрон. журн. **43**, 159 (2017).
98. Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, А.В. Мещеряков, Р.А. Буренин, А.Р. Ляпин, П.С. Медведев, С.Ю. Сазонов, М.В. Еселевич, Р.А. Сюняев и др.), Письма в Астрон. журн. **46**, 155 (2020).
99. Хорунжев и др., Готовится к печати, 2021.
100. Чамберс и др. (K. Chambers, E. Magnier, N. Vetalfe, H. Flewelling, M. Huber, C. Waters, et al.), <https://arxiv.org/abs/1612.05560>
101. Шанг и др. (Z. Shang, M. Brotherton, B. Wills, D. Wills, S. Cales, D. Dale, R. Green, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **196**, 2 (2011).
102. Шлегель и др. (D. Schlegel, D. Finkbeiner, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
103. Эванс и др. (I. Evans, F. Primi, K. Glotfelty, C. Anderson, N. Bonaventura, and Judy C. Chen), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **189**, 1 (2010).
104. Эванс и др. (I. Evans, F. Primi, J. Miller, J. Evans, C. Allen, C. Anderson, et al.), *American Astronomical Society meeting* **235**, id. 154.05 52, 1 (2020).
105. Эванс и др. (P. Evans, K. Page, P. Osborne, P. Beardmore, R. Willingale, D. Burrows, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **247**, 54 (2020).