

ПОИСК ДАЛЕКИХ И ЯРКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ КВАЗАРОВ В ХОДЕ ОБЗОРА НЕБА СРГ/еРОЗИТА (ПРОГРАММА DaLeQo). ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕЛЕСКОПЕ БТА

© 2022 г. Г. А. Хорунжев^{1*}, С. Н. Додонов^{2,3}, А. В. Мещеряков¹, А. В. Моисеев^{1,2}, А. А. Гроховская^{2,3}, С. С. Котов^{2,3}, Е. А. Малыгин², Р. И. Уклеин², Е. С. Шабловинская², П. С. Медведев¹, В. Д. Борисов^{1,4}, Р. А. Буренин¹, Р. А. Кривонос¹, Г. С. Усков¹, И. А. Зазнобин¹, Р. А. Сюняев^{1,5}, С. Ю. Сазонов¹, М. Р. Гильфанов^{1,5}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

³Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ВМК, Москва, Россия

⁵Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 03.12.2021 г.

После доработки 28.12.2021 г.; принята к публикации 28.12.2021 г.

Обсуждаются результаты спектроскопии 17 кандидатов в далекие квазары, отобранных системой классификации SRGz по данным первого и второго обзоров неба телескопа еРОЗИТА рентгеновской обсерватории СРГ. Большинство кандидатов в квазары было отобрано в рамках наблюдательной программы DaLeQo, цель которой — поиск ярчайших в рентгене квазаров со светимостями $L_{2-10 \text{ keV}} \gtrsim 5 \times 10^{45}$ эрг/с на красных смещениях $z \gtrsim 3$. Спектроскопические наблюдения проводились на 6-м телескопе БТА спектрографом SCORPIO-2. Удалось подтвердить восемь новых рентгеновских квазаров на $z_{\text{спек}} \gtrsim 3$, включая квазар SRGe J020142.8-015347 на $z_{\text{спек}} = 5.02$. Благодаря большому диаметру зеркала БТА и высокой квантовой эффективности спектрографа SCORPIO-2 в диапазоне от 6000–9000 Å, удалось измерить параметры спектральной линии C IV (1549 Å) и получить оценки масс сверхмассивных черных дыр и темпов аккреции для семи квазаров.

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

DOI: 10.31857/S0320010822020036

ВВЕДЕНИЕ

Запущенная 13 июля 2019 г. рентгеновская обсерватория СРГ (Сюняев и др., 2021) успешно работает на орбите вокруг точки Лагранжа L2 системы Земля–Солнце. Главная задача обсерватории — обзор всего неба в широком диапазоне энергий 0.2–30 кэВ продолжительностью 4 года. В ходе обзора предполагается открыть с помощью телескопа СРГ/еРОЗИТА (Предель и др., 2021) около трех миллионов активных ядер галактик (АЯГ), в том числе далеких квазаров (Колодзиг и др., 2013a,b), около ста тысяч скоплений и групп галактик, а также сотни тысяч рентгеновских источников различной природы в нашей Галактике. Ожидается, что обзор неба обсерватории

СРГ/еРОЗИТА будет примерно в 25 раз чувствительнее в мягком рентгеновском диапазоне (0.3–2 кэВ) предыдущего обзора, проведенного спутником ROSAT (Трюмпер, 1982) в начале 90-х гг. XX в., что поможет решить ряд важнейших задач современной астрофизики и космологии. Рентгеновский обзор всего неба рекордной глубины также открывает возможность вести поиск уникальных объектов, чьи спектральные характеристики являются выдающимися среди источников своего класса. В частности, обнаружение и детальное изучение экстремально ярких квазаров позволят пролить свет на историю роста наиболее массивных черных дыр во Вселенной.

Ожидается, что обзор неба СРГ будет состоять из восьми последовательных полных обзоров продолжительностью шесть месяцев каждый. Данная

*Электронный адрес: horge@iki.rssi.ru

статья посвящена результатам поиска далеких и светимых рентгеновских квазаров по данным первых двух обзоров неба, проведенных в период с конца 2019 г. по конец 2020 г. С этой целью среди рентгеновских источников, открытых с помощью телескопа ePOZITA, был проведен отбор кандидатов в далекие квазары с помощью системы оптического отождествления рентгеновских объектов SRGz (Мещеряков и др., 2022). Система SRGz, используя методы машинного обучения, 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. Система SRGz создана в научной рабочей группе российского консорциума SRG/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 SRG, 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, 2021) и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ (Додин и др., 2020, 2021).

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 ($z > 3$) квазары, 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 SRG удалось обнаружить уникальный квазар CFHQSJ142952+544717 = SRGEJ142952.1+544716, который оказался самым ярким в рентгене среди известных квазаров на $z > 6$ (Медведев и др., 2020, 2021). Чуть позже системой SRGz был найден, а на 6-м Большом Телескопе Азимутальном (БТА) Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН) спектроскопически подтвержден ярчайший в рентгеновском и радиодиапазонах квазар SRGEJ170245.3+130104 на $z = 5.5$ (Хорунжев

и др., 2021) — самый далекий квазар, открытый телескопом SRG/ePOZITA в слепом поиске.

Научной рабочей группой по изучению активных ядер галактик, квазаров и событий приливного разрушения российского консорциума SRG/ePOZITA сформирована наблюдательная программа ДАЛЕКО (DaLeQo, Distant and Luminous ePOZITA Quasi-stellar objects), целью которой является получение полной спектроскопической выборки кандидатов в далекие ($z \gtrsim 3$) и яркие ($L_X \gtrsim 5 \times 10^{45}$ эрг/с) рентгеновские квазары. Распределение числа ярких рентгеновских квазаров по светимости и красному смещению пока плохо изучено, поскольку отсутствовали рентгеновские обзоры с подходящими для этой задачи площадью покрытия ($\gtrsim 500$ кв. град) и чувствительностью ($\sim 10^{-14}$ эрг/с/см²). До запуска SRG/ePOZITA неоднократно делались попытки оценить плотность далеких квазаров на основе имеющихся каталогов обзоров большой площади, например, ROSAT (Уида и др., 2014) и ХММ-Newton (Георгакакис и др., 2015; Хорунжев и др., 2018). Только несколько источников на $z > 3$ из перечисленных обзоров имеют светимости выше $L_X \gtrsim 5 \times 10^{45}$ эрг/с.

Обзор всего неба SRG/ePOZITA обнаружит все яркие рентгеновские квазары. Ожидаемое число — несколько десятков квазаров на $z > 3$ со светимостями выше $L_X \gtrsim 5 \times 10^{45}$ эрг/с. Значительная часть рентгеновских источников будет иметь известный оптический компаньон со спектроскопически подтвержденным красным смещением. В статье Хорунжев и др. (2019) показано, что минимум четверть далеких квазаров, открытых в рентгене, не будет иметь спектроскопически измеренного красного смещения. Программа DaLeQo разработана для поиска именно таких, пока не подтвержденных, рентгеновских квазаров.

В данной статье описываются результаты наблюдений, проведенных спектрографом SCORPIO-2 на 6-м телескопе БТА, кандидатов в квазары, большинство из которых были отобраны по программе DaLeQo среди источников первого и второго рентгеновских обзоров неба SRG/ePOZITA.

В статье для расчета светимостей используются следующие космологические параметры: $H_0 = 69.6$ км/с/Мпк и $\Omega_M = 0.286$ (Беннет и др., 2014).

РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ

Рентгеновские данные, представленные в данной статье, были получены телескопом SRG/ePOZITA по итогам первых двух обзоров неба, проведенных в период с декабря 2019 г.

Таблица 1. Рентгеновские свойства источников

Название	Обзор	RA	DEC	$F_x, 10^{-14},$ эрг/с/см ²	C , отсчеты	R_{98} , угл. сек
SRGe J000107.9+242013	1 + 2	0.28310	+24.33682	3.97 ± 1.38	10 ± 3	11.2
SRGe J000139.6+341025	1	0.41482	+34.17360	5.86 ± 1.96	10 ± 3	11.2
SRGe J004501.1+002855	1	11.25459	+0.48192	3.83 ± 1.77	5 ± 2	12.0
SRGe J011237.0+245130	1 + 2	18.15412	+24.85843	2.26 ± 0.96	8 ± 3	17.0
SRGe J020142.8–015347	1 + 2	30.42849	–1.89644	1.44 ± 0.70	5 ± 2	15.0
SRGe J060448.6+560030	1 + 2	91.20247	+56.00838	2.98 ± 1.29	6 ± 2	10.6
SRGe J105537.7+460955	1	163.90714	+46.16536	10.85 ± 3.34	12 ± 3	10.2
SRGe J113846.3+704541	1 + 2	174.69303	+70.76129	4.25 ± 1.24	14 ± 4	7.9
SRGe J144709.3+275003	1	221.78877	+27.83405	2.63 ± 1.21	6 ± 2	13.1
SRGe J164037.8+105123	1 + 2	250.15756	+10.85640	3.83 ± 1.31	13 ± 4	9.7
SRGe J170531.2+424330	1 + 2	256.37986	+42.72490	4.34 ± 0.98	27 ± 6	7.6
SRGe J171307.6+124728	1	258.28186	+12.79124	4.17 ± 1.75	7 ± 3	13.6
SRGe J172409.5+660748	1 + 2	261.03963	+66.12986	0.98 ± 0.19	39 ± 7	6.2
SRGe J173058.8+721243	1 + 2	262.74504	+72.21196	1.27 ± 0.36	20 ± 5	11.0
SRGe J174157.3+652355	1 + 2	265.48869	+65.39849	0.71 ± 0.11	68 ± 10	5.7
SRGe J193822.0+630651	1	294.59181	+63.11429	4.59 ± 1.12	24 ± 5	11.7
SRGe J223835.7+124014	1	339.64895	+12.67046	5.85 ± 2.79	5 ± 2	13.1

Примечание. Столбец “Обзор”: 1 — источник зарегистрирован по данным первого обзора неба, 1 + 2 — источник зарегистрирован по сумме данных первого и второго обзоров, RA и DEC — прямое восхождение и склонение рентгеновского источника (J2000), F_x — поток в диапазоне 0.3–2.2 кэВ, C и δC — отсчеты от источника (за вычетом уровня фона) в диапазоне 0.3–2.2 кэВ; R_{98} — радиус 98% круга ошибок рентгеновского источника.

по декабрь 2020 г. Калибровка данных телескопа ePOZITA, создание карт неба, детектирование и характеристика источников производились при помощи программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом SRG/ePOZITA, и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом SRG/ePOZITA. При обработке данных использовались результаты наземных предполетных калибровок, а также летных калибровочных наблюдений, выполненных в октябре–ноябре 2019 г.

Рентгеновские каталоги были прокоррелированы с фотометрическими и спектроскопическими каталогами с радиусом поиска R_{98} . Этот радиус определялся согласно формуле $R_{98} = 2.8 \times \sigma_{2D}$, где σ_{2D} — стандартное отклонение двумерной гауссианы, описывающей пространственные ошибки локализации рентгеновских источников. Величина σ_{2D} определялась индивидуально для каждого источника в процессе определения его положения, при помощи аппроксимации распределения фотонов от источника функцией отклика

на точечный источник. Полученные таким образом значения σ_{2D} корректировались по результатам анализа распределения смещений рентгеновских источников ePOZITы от (существенно более точно определенных) положений оптических квазаров из каталога SDSS DR14Q (Пэрис и др., 2018). Для гауссова распределения пространственных ошибок определенная таким образом величина R_{98} соответствует радиусу 98% круга ошибок.

Результаты отождествления рентгеновских источников подавались на вход системы SRGz для классификации и определения фотометрических красных смещений, как было описано ранее в статьях Мещеряков и др. (2018); Хорунжев и др. (2020); Додин и др. (2020); Бикмаев и др. (2020). По результатам классификации системы SRGz всех оптических компаньонов в кружке R_{98} для последующей спектроскопии отбирались оптические источники с фотометрическим красным смещением $z_{\text{фот}} > 3$ и рентгеновской светимостью $L_{2-30 \text{ keV}} > 5 \times 10^{45}$ эрг/с, рассчитанной на основе $z_{\text{фот}}$. Для наблюдений на телескопе БТА были ото-

Таблица 2. Фотометрические оценки красных смещений SRGz и спектроскопические измерения красных смещений

Источник SRGe	Оптический кандидат					SRGz		Спектроскопия		
	$R, ''$	$\alpha_{opt}, \text{град}$	$\delta_{opt}, \text{град}$	$i, \text{зв. в}$	$E(B - V)$	$z_{\text{фот}}$	z_{Conf}	$z_{\text{спек}}$	тип	$\lg(\text{PrndQ})$
J000107.9+242013	1.2	0.28280	+24.33662	20.60	0.081	3.02	0.62	3.312 ± 0.002	QSO	-4.37
J000139.6+341025	10.2	0.41178	+34.17490	20.50		3.52	0.33		STAR	
J004501.1+002855	5.7	11.25615	+0.48165	22.47	0.020	3.77	0.81	3.797 ± 0.012	QSO	-3.64
J011237.0+245130	10.2	18.15546	+24.85587	21.61		3.58	0.50	0.569 ± 0.001	Sy2	
J020142.8-015347 ^a	3.3	30.42868	-1.89735	19.70	0.024	5.00	1.00	5.02 ± 0.01	QSO	-6.43
J060448.6+560030	5.4	91.20033	+56.00930	20.36	0.142	4.60	0.68	4.594 ± 0.011	QSO	-5.87
J105537.7+460955	2.8	163.90602	+46.16533	21.11		4.47	0.89	0.454 ± 0.002	GAL	
J113846.3+704541	1.0	174.69386	+70.76126	19.81	0.018	3.63	0.51	3.613 ± 0.005	QSO	-5.36
J144709.3+275003 ^b	4.9	221.79034	+27.83398	21.56		0.83	0.09		ELG	
	7.7	221.79116	+27.83429	21.77				0.421 ± 0.001	Sy2	
J164037.8+105123	7.4	250.15906	+10.85498	22.11		3.58	0.32	0.121 ± 0.002	GAL	
J170531.2+424330	2.5	256.38033	+42.72431	18.54	0.025	3.01	0.89	3.056 ± 0.003	QSO	-5.86
J171307.6+124728 ^c	15.1	258.28565	+12.79324	22.08		5.57	0.59		STAR	
J172409.5+660748 ^d	2.1	261.03856	+66.13024	21.67		1.96	0.19		STAR	
J173058.8+721243 ^c	13.4	262.73620	+72.21452	22.11		5.53	0.47	0.551 ± 0.001	GAL	
J174157.3+652355	2.8	265.48730	+65.39797	20.82	0.037	3.02	0.88	2.935 ± 0.012	QSO	-4.52
J193822.0+630651	8.5	294.59702	+63.11448	19.62	0.057	3.46	0.48	3.501 ± 0.015	QSO	-5.04
J223835.7+124014	8.0	339.64678	+12.66975	20.98		4.69	0.96		STAR	

Примечание. R — расстояние между оптическим компаньоном и рентгеновским источником, $\alpha_{opt}, \delta_{opt}$ — прямое восхождение и склонение оптического компаньона (J2000) из каталога Pap-STARRS PS1 DR2, i — видимая звездная величина источника “iPSFMag” из каталога Pap-STARRS, $E(B - V)$ — избыток цвета согласно картам поглощения (Шлегель и др., 1998), $z_{\text{фот}}$ — фотометрическая оценка красного смещения, z_{Conf} — достоверность фотометрической оценки, характеризующая вероятность найти спектральное красное смещение в интервале $z_{\text{фот}} \pm 0.06 \times (1 + z_{\text{фот}})$, $z_{\text{спек}}$ — спектроскопическое красное смещение и соответствующая ошибка, тип — спектральный класс источника: QSO — квазар с широкими эмиссионными линиями, STAR — звезда, Sy2 — сейфертовская галактика второго типа, ELG — галактика с узкими эмиссионными линиями, GAL — галактика без эмиссионных линий, $\lg(\text{PrndQ})$ — логарифм вероятности случайно обнаружить в области локализации рентгеновского источника с радиусом R_{98} квазар на $z > z_{\text{спек}}$ с видимой звездной величиной ярче i . ^a Видимая звездная величина источника приведена в фильтре z . ^b Источник в ранней версии SRGz имел $z_{\text{фот}} = 5.06$. Получен спектр соседнего оптического компаньона внутри R_{98} , который оказался сейфертовской галактикой 2 типа. ^c Предполагаемый оптический компаньон был в пределах R_{98} от рентгеновского источника в ранней версии каталога СРГ/еРОЗИТА, но оказался за пределами области локализации R_{98} в новой версии каталога. ^d Источник в ранней версии SRGz имел $z_{\text{фот}} = 4.89$.

браны наиболее интересные объекты, как это описано в следующем разделе. Список рентгеновских источников, обсуждаемых в данной работе, приведен в табл. 1, где также приведены их основные параметры, определенные по данным еРОЗИТы: координаты, ошибка локализации, рентгеновский поток и число отсчетов в диапазоне 0.3–2.2 кэВ.

Из-за переменности потока и статистических флуктуаций квазары, обнаруженные в одном обзоре неба, могут оказаться ниже выбранного порога детектирования в другом обзоре. Аналогично, в сумме двух обзоров неба достоверность детектирования некоторых источников может оказаться

ниже, чем в одном из этих обзоров, а некоторые источники могут оказаться ниже порога детектирования. Поэтому мы определяли рентгеновские характеристики одних объектов выборки по данным первого обзора СРГ/еРОЗИТА, а других — по комбинации первого и второго обзора (см. столбец “Обзор” в табл. 1).

Рентгеновские изображения окрестностей рассматриваемых источников, полученные телескопом еРОЗИТА, показаны на левых панелях на рис. 1, соответствующие оптические изображения из архива Pap-STARRS (Чамберс и др., 2016) в фильтре i приведены на центральных панелях, а в правой

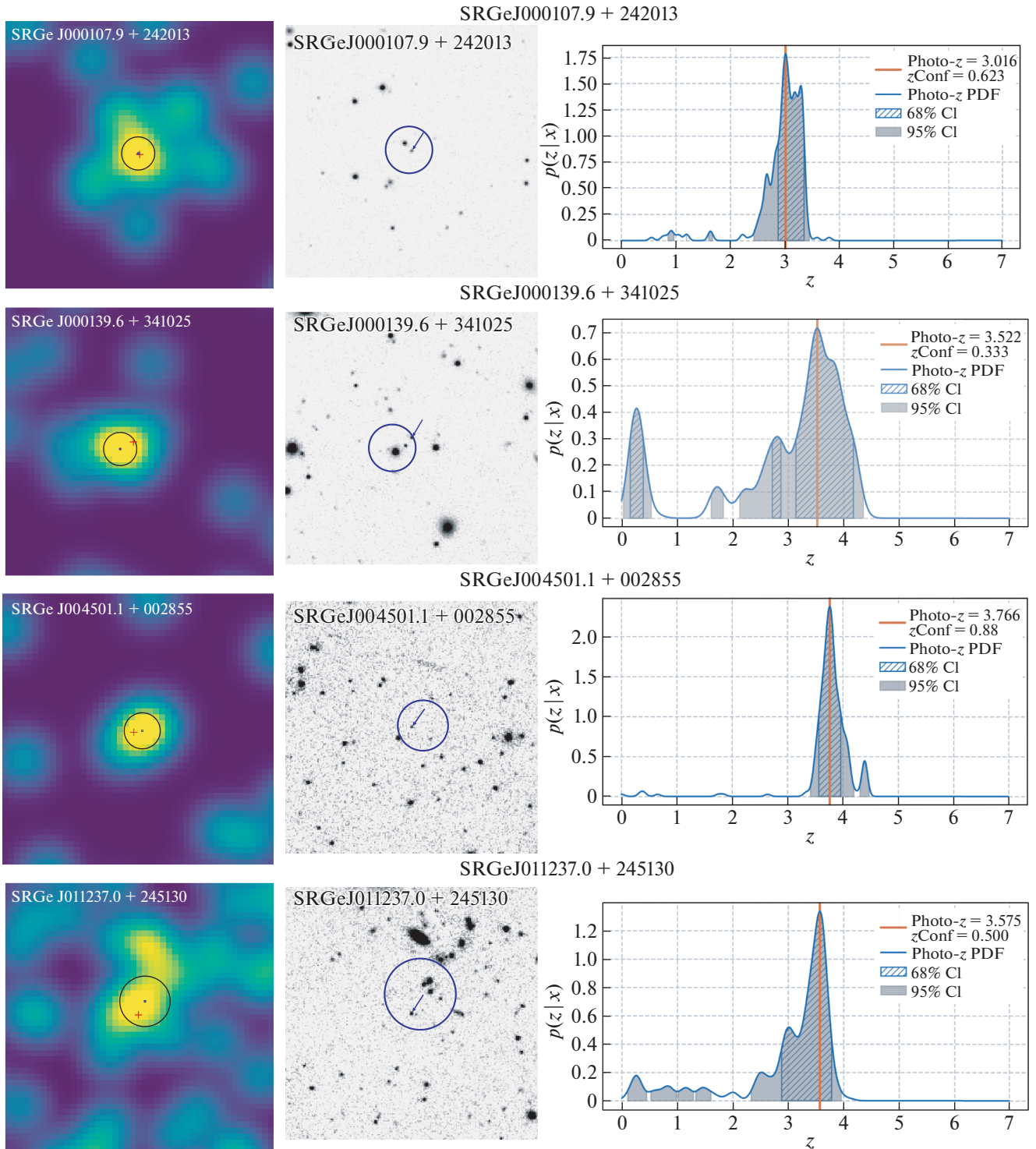


Рис. 1. Слева: рентгеновская карта фотонов в диапазоне 0.3–2.2 кэВ размером 3 × 3 угл. мин. В центре: оптическое изображение в фильтре i' Pan-STARRS размером 2 × 2 угл. мин. Кругок соответствует размеру области 98% ошибки на локализацию рентгеновского источника. Красный крестик на рентгеновской карте фотонов и стрелка на оптическом изображении указывают на положение вероятного оптического компаньона — кандидата в квазары на $z_{\text{фот}} > 3$, спектр которого приводится в данной статье. Справа: сплошной линией показана функция плотности вероятности фотометрического красного смещения для оптического компаньона по результатам SRGz. Вертикальной красной линией показано наиболее вероятное значение фотометрического красного смещения $z_{\text{фот}}$; области, закрашенные серой и косой штриховкой, показывают 68 и 95% доверительные интервалы прогноза фотометрического красного смещения объекта соответственно.

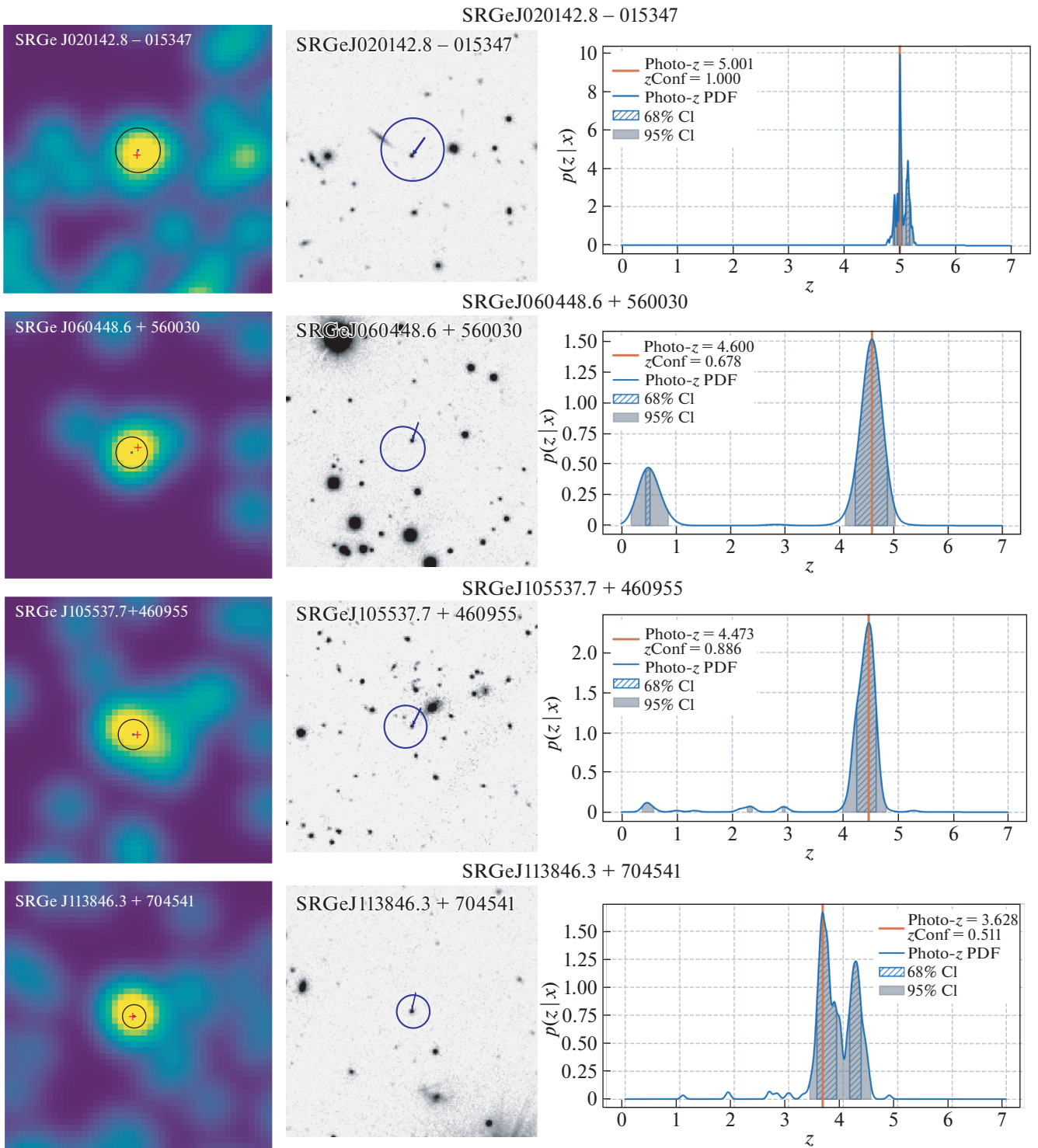


Рис. 1. Продолжение.

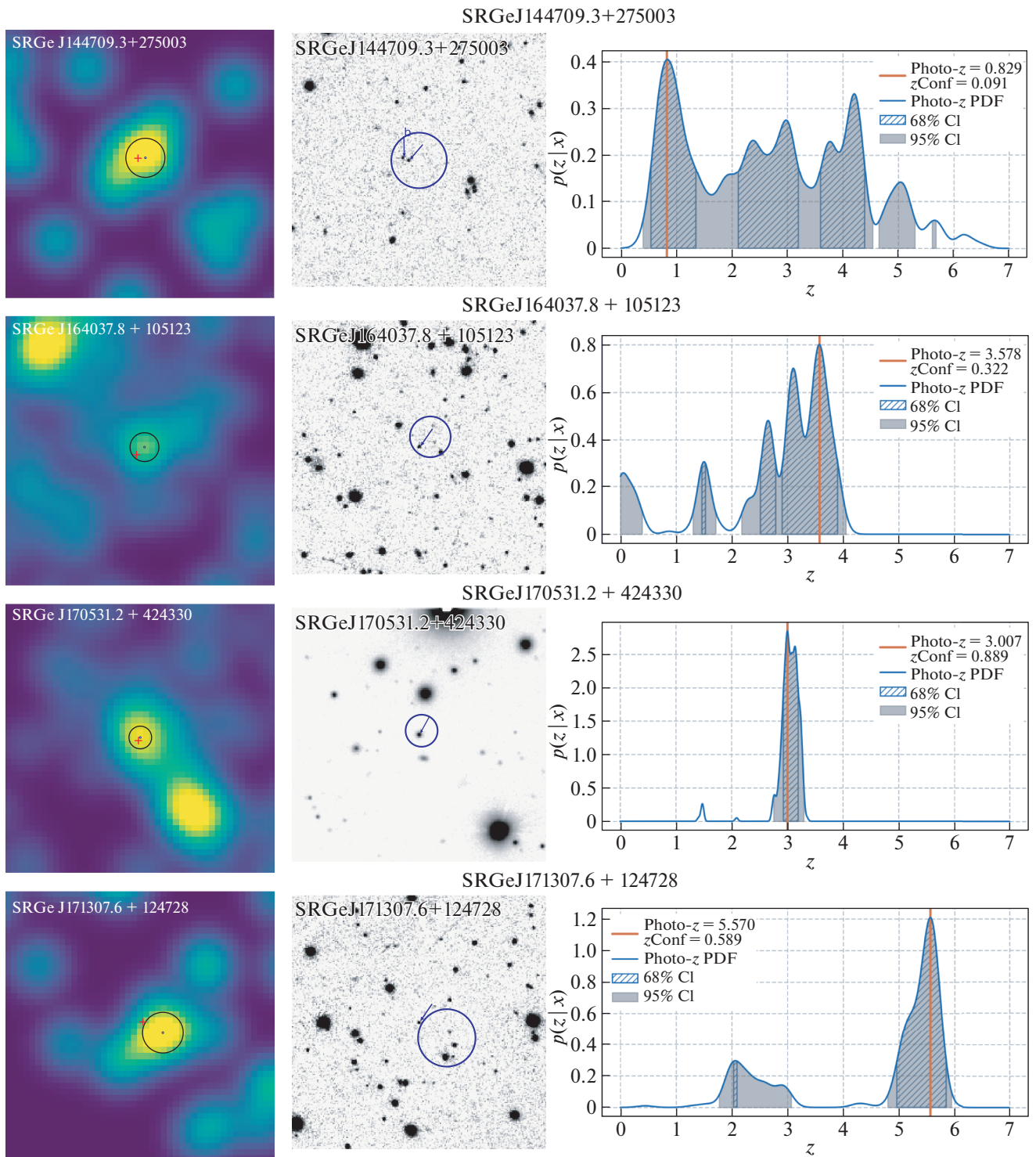


Рис. 1. Продолжение.

колонке показаны распределение плотности вероятности и наилучшая фотометрическая оценка красного смещения для оптических компаньонов кандидатов в далекие и светимые квазары. Координаты, звездные величины и фотометрическое красное смещение вероятных оптических компаньонов

приведены в табл. 2. Фотометрическое красное смещение в табл. 2 приведено согласно результатам современной версии SRGz. Отбор объектов для спектроскопии осуществлялся на основе более ранних версий SRGz, и все источники на момент

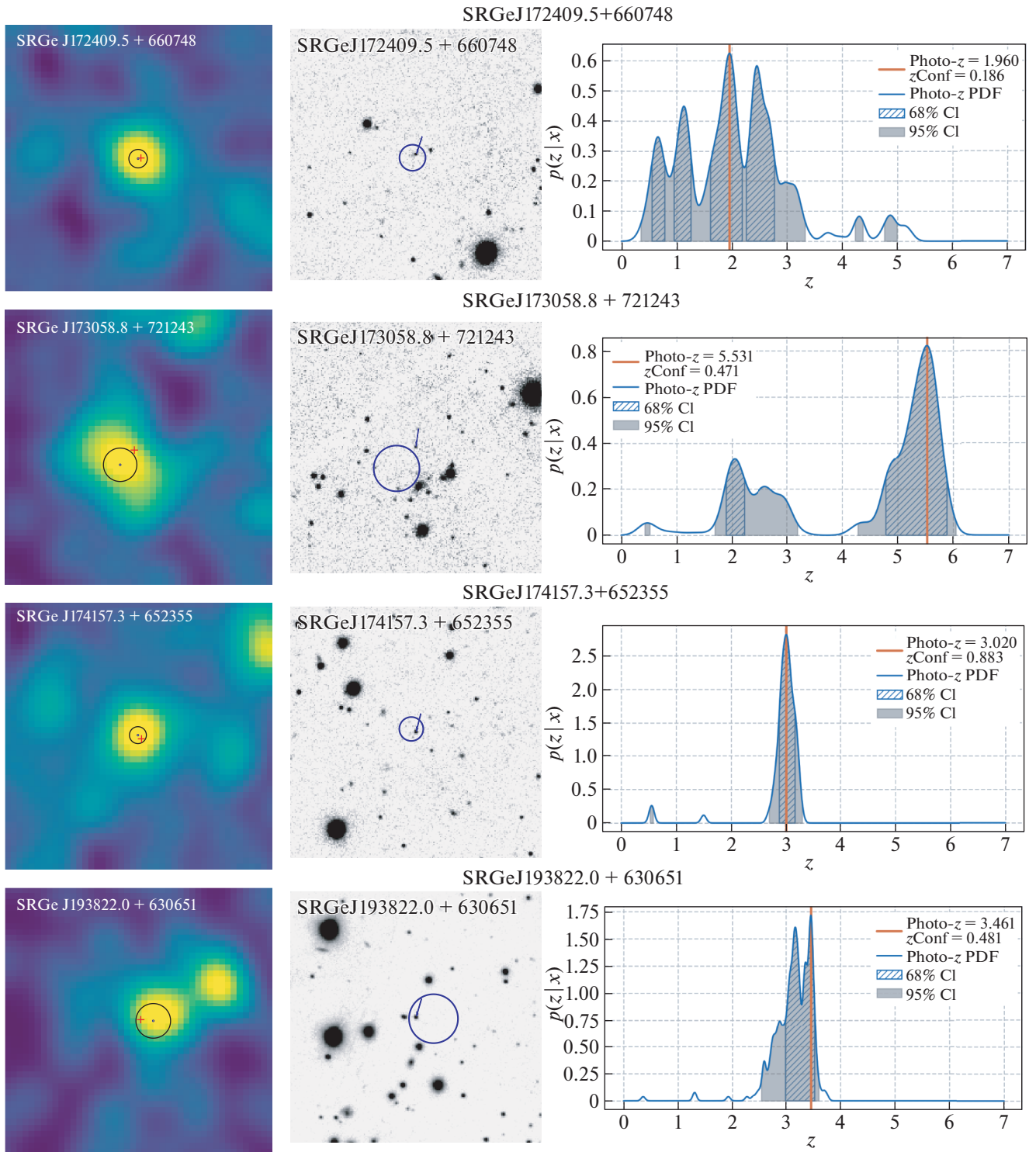


Рис. 1. Продолжение.

их наблюдения считались кандидатами в квазары на $z_{\text{фот}} > 3$.

СПЕКТРОСКОПИЯ НА ТЕЛЕСКОПЕ БТА

Для наблюдений на 6-м телескопе БТА (САО РАН) отбирались преимущественно кандидаты в

квазары программы DaLeQo слабее 20 зв. величины или объекты, для которых фотометрическая оценка красного смещения $z_{\text{фот}} > 4$. Условия, при которых велись наблюдения, — темное время (фаза Луны меньше 0.3), размер турбулентных дисков звезд (seeing) меньше 2 угл. с. Наблюдения про-

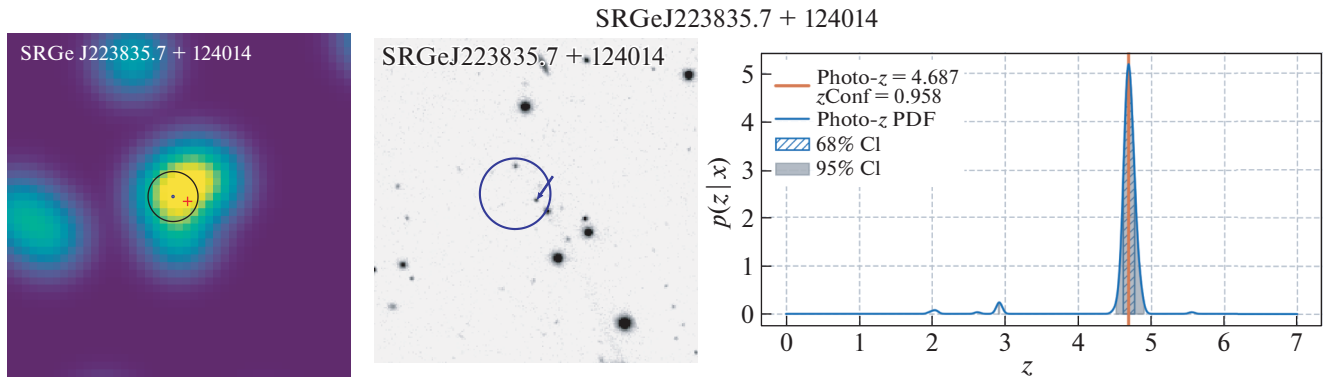


Рис. 1. Окончание.

водились с помощью многорежимного редуктора светосилы первичного фокуса БТА SCORPIO-2¹ (Афанасьев, Моисеев, 2011) в режиме спектроскопии с длинной щелью. В качестве детектора применялись ПЗС-матрицы E2V 261-84 и E2V 42-90 (в сентябре 2020 г.), имеющие пиковую квантовую эффективность 95% и позволяющие проводить наблюдения в диапазоне 3600–10 000 Å. Квантовая эффективность ПЗС-матриц на длине волны 9000 Å составляет около 50%. Для наблюдений применялись объемные фазовые голографические решетки² VPHG940@600 и VPHG1026@735. Гризма VPHG940@600 с рабочим диапазоном 3500–8500 Å, дисперсией 1.16 Å/пикс и спектральным разрешением $\text{FWHM}^3 = 7.0 \text{ Å}$ использовалась для спектроскопии кандидатов в квазары на фотометрических красных смещениях $z_{\text{фот}} < 4.5$. Гризма VPHG1026@735 с рабочим диапазоном 5800–9500 Å, дисперсией 1.02 Å/пикс и $\text{FWHM}^3 = 6.1 \text{ Å}$ применялась для кандидатов в квазары на $z_{\text{фот}} \gtrsim 4.5$ при ширине щели 1.5–2 угл. с. Указанные характеристики спектрографа позволяют измерять параметры спектральной линии CIV(1549 Å) для квазаров DaLeQo до $z \approx 5.5$ наиболее эффективным образом. В табл. 3 “Журнал наблюдений” приведена информация о параметрах SCORPIO-2, (ширина щели и обозначение гризмы), дате наблюдений и времени экспозиции исследуемых объектов.

Обработка спектров проводилась с помощью стандартного математического обеспечения

¹<https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/index.html>

²https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/grisms_rus.html

³Спектральное разрешение для щели шириной 1 угл. сек.

IRAF^{4,5}. Перевод наблюдаемого распределения энергии в спектрах в абсолютные энергетические единицы выполнен на основе наблюдений спектрофотометрических стандартов из списка Массей и др. (1988). Спектроскопическое красное смещение квазаров и галактик с эмиссионными линиями определено по положению пиков эмиссионных линий. Измеренные спектроскопические красные смещения и классы источников приведены в табл. 2. Квазаром (QSO) считался источник, если в его спектре обнаруживались широкие эмиссионные линии ($\text{FWHM} > 2000 \text{ км/с}$). Для классификации источников с узкими эмиссионными линиями использовалась ВРТ-диаграмма Болдуин и др. (1981); Ламарье (2010). Диаграмма позволяет разделить объекты с разными источниками ионизации (излучение АЯГ или звездообразование), сравнивая отношения потоков в узких эмиссионных линиях. Таким образом, мы по спектру классифицируем сейфертовские галактики второго типа (Sy2). Красное смещение обычных галактик (GAL) без эмиссионных линий определено по линиям H, K ионизованного кальция и другим особенностям в спектре. Звезды M-класса определяются в ходе визуального сравнения с соответствующим спектральным шаблоном.

Точность определения красных смещений для 17 кандидатов в квазары составила $\sigma_{NMAD} = 1.48 \text{ Me} \left(\frac{|z_{\text{фот}} - z_{\text{спек}}|}{1 + z_{\text{спек}}} \right) = 0.01$ при 53% выбросов $\left(\frac{|z_{\text{фот}} - z_{\text{спек}}|}{1 + z_{\text{спек}}} > 0.15 \right)$. Если исключить из рассмотрения кандидаты в квазары на $z_{\text{фот}} > 5$, которые отбирались ранними версиями SRGz, то процент выбросов снизится до 38%.

⁴<http://iraf.noao.edu>

⁵<https://iraf-community.github.io>

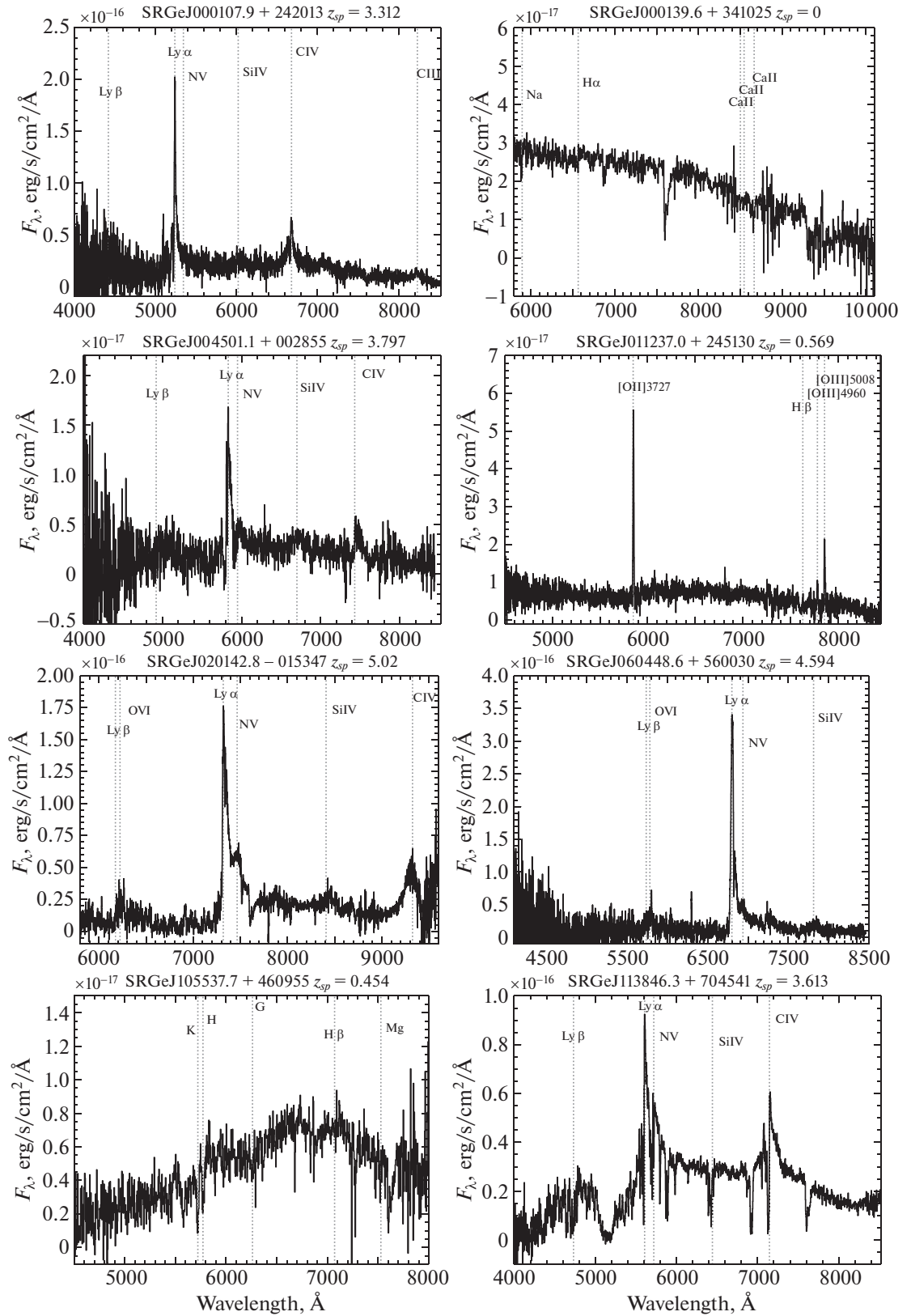


Рис. 2. Спектры объектов. Соседние спектральные каналы квазаров сгруппированны по два вдоль оси длин волн, а соседние спектральные каналы звезд и галактик — по четыре.

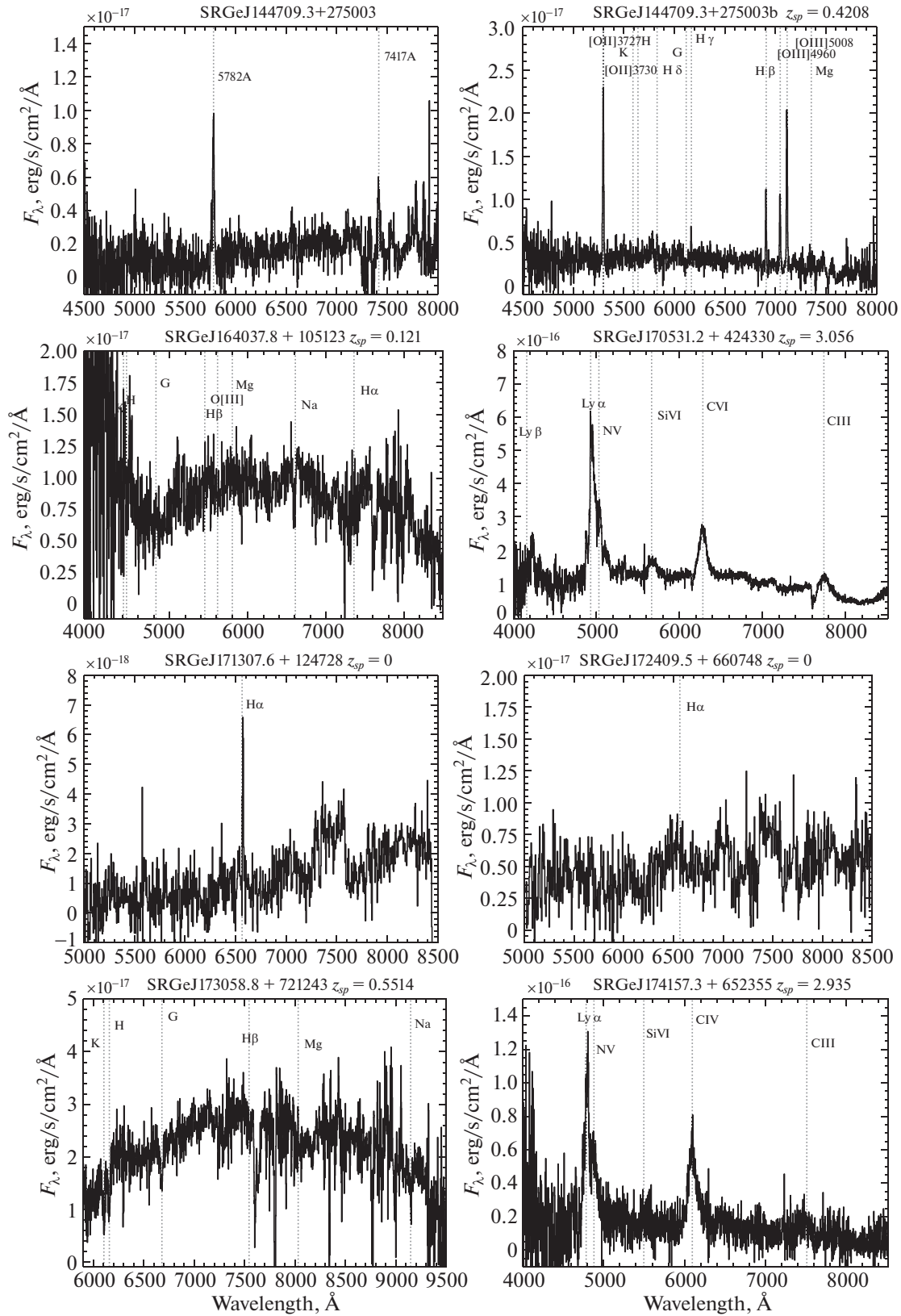


Рис. 2. Продолжение.

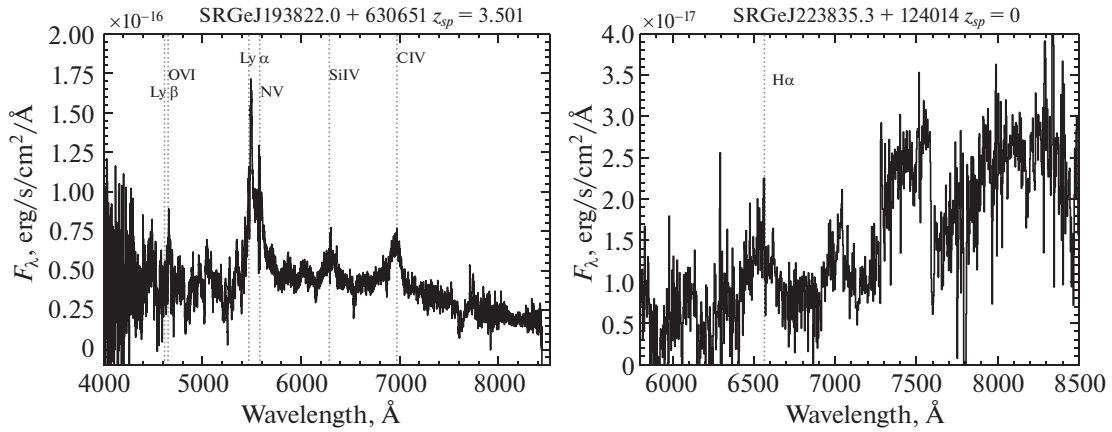


Рис. 2. Окончание.

На рис. 2 показаны полученные на телескопе БТА спектры оптических компаньонов. Ниже приводятся комментарии по отдельным источникам. Форма спектра поправлена за Форма спектра далеких квазаров исправлена за галактическое поглощение, согласно картам из работы Шлегель и др. (1998). Для расчета поглощения на заданной длине волны использовались: стандартный закон $R_V = 3.1$ и зависимость из работы Карделли и др. (1989).

Характерный радиус локализации рентгеновского источника $R_{98} \approx 10$ угл. сек. Поэтому велика вероятность случайного попадания оптического источника в область локализации рентгеновского источника (вероятность порядка $\sim 0.1-1$). Однако известно, что большинство рентгеновских источников на потоках $\approx 10^{-14}$ эрг/с/см² являются квазарами, и процент далеких квазаров среди оптических источников поля — исчезающе мал. Следовательно, если внутри радиуса R_{98} обнаруживается квазар, то мы можем рассчитать вероятность случайного отождествления квазара (PrndQ), доказать, что эта вероятность мала, а значит, оптический квазар является источником рентгеновского излучения.

Была использована ультрафиолетовая функция светимости далеких квазаров из работы Кулкарни, Ворсек, Хеннави (2019) ($\phi(M_{1450}, z)$, “Модель 1”) для расчета поверхностной плотности квазаров и, соответственно, вероятности их случайного попадания внутрь кружка радиусом R_{98} . Пересчет видимой звездной величины в фильтре i в абсолютную звездную величину M_{1450} осуществлялся с помощью шаблона среднего спектра квазара Ванден Берк и др. (2001). Десятичный логарифм вероятности PrndQ приведен в табл. 2. Для большинства квазаров на $z_{\text{спек}} > 3$ вероятность PrndQ чрезвычайно мала. Следовательно, можно однозначно утверждать, что именно этот оптический квазар является источником рентгеновского потока.

SRGe J000107.9+24201

Далекый квазар, красное смещение которого измерено по пику положения линии Ly α . В районе линии C IV ($\lambda = 1549$ Å) видна особенность широкой линии поглощения (см. увеличенный фрагмент спектра в районе этой линии на рис. 3). При определении ширины линии C IV область $\lambda = 1541-1547$ Å была исключена из рассмотрения. Спектр линии C IV наилучшим образом описывается двумя функциями Гаусса: более широкой (FWHM=9000 км/с, $F = 3.5 \times 10^{-15}$ эрг/с/см²) и сравнительно узкой (FWHM = 2300 км/с, $F = 1.5 \times 10^{-15}$ эрг/с/см²). Параметр положения пика гауссианы был общим для компонент. Особенность поглощения в голубом крыле линии C IV, возможно, связана с оттоком вещества из центральных областей квазара. Можно зафиксировать параметры моделей с двумя функциями Гаусса и добавить третью гауссову компоненту, ответственную за поглощение. Расстояние между пиками эмиссионной и абсорбционной компоненты позволяет оценить скорость оттока вещества ≈ 400 км/с. Сравнение моделей показано на рис. 3.

SRGe J004501.0+002855

Далекый квазар. Накопленного сигнала оказалось недостаточно, чтобы надежно измерить ширину линии C IV. Наблюдаемый резкий обрыв профиля широких эмиссионных линий Ly α и C IV характерен для квазаров с широкими линиями поглощения. Полученную ширину линии следует рассматривать как оценку снизу.

SRGe J011237.0+245130

Объект оказался сейфертовской галактикой второго типа (Sy2) на $z_{\text{спек}} = 0.569$ с узкими эмиссионными линиями согласно классификации, проведенной по ВРТ-диаграмме Болдуин и др. (1981);

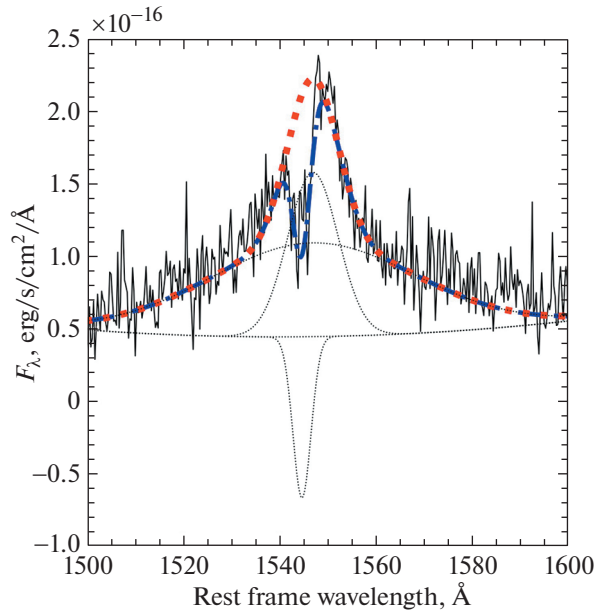


Рис. 3. Фрагмент спектра квазара SRGe J000107.9+24201 в области линии C IV. Красным пунктиром показана модель, где форма линии описывается двумя функциями Гаусса и область $\lambda = 1541\text{--}1547 \text{ \AA}$ исключена из рассмотрения. Синим штрихпунктиром показана модель, где параметры линий эмиссий зафиксированны и добавлена функция Гаусса, описывающая поглощенный участок $\lambda = 1541\text{--}1547 \text{ \AA}$. Серым пунктиром — показаны соответствующие компоненты моделей линий и континуума.

Ламарье (2010) для соотношения интенсивности линий [OII](3726 Å+3729 Å), [OIII](5007 Å) и H β .

В щель спектрографа попал также слабый источник с координатами RA = 01:12:37.13 DEC = +24:51:20.5, находящийся по соседству с целевым объектом. Накопленной экспозиции недостаточно для достоверного определения красного смещения слабого источника. Но в его спектре видна эмиссионная линия на $\lambda = 5731 \text{ \AA}$. В область локализации R₉₈ попадает еще несколько оптических источников, поэтому нельзя однозначно сказать, что рентген идет от сейфертовской галактики. Согласно каталогу кандидатов в скопления галактик, отобранных по фотометрии Слоановского обзора (Огури, 2014), в этой области может быть скопление галактик на $z_{\text{фот}} = 0.56$. Возможно, и скопление, и сейфертовская галактика из этого скопления дают совместный вклад в наблюдаемый рентгеновский поток. Проблема отождествления данного источника может быть снята по мере накопления рентгеновских данных в следующих обзорах СРГ/еРОЗИТА.

SRGe J020142.8–015347

Кандидат с фотометрическим красным смещением $z_{\text{фот}} = 5.00$ был подтвержден как квазар на $z_{\text{спек}} = 5.02$. Это самый далекий квазар в данной работе. В текущей версии каталога

СРГ/еРОЗИТА он имеет достоверность детектирования в рентгене на уровне S/N ~ 2.5 , тогда как в ранней версии каталога, по которой происходил отбор кандидатов для спектроскопии, имел более высокую значимость. Объект также упоминается в каталоге кандидатов в квазары, отобранных по фотометрии SDSS и WISE (Ричардс и др., 2015), с $z_{\text{фот}} = 4.94$.

SRGe J060448.6+56003

В полученном спектре линия C IV оказывается за пределами рабочего диапазона гримзы. Для этого источника не получится измерить массу СМЧД с помощью соотношения (1).

SRGe J113846.3+704541

Источник можно классифицировать как квазар с широкими линиями поглощения. Профили широких эмиссионных линий в спектре чрезвычайно изрезаны, что характерно для квазаров с широкими линиями поглощения. При подгонке формы линии C IV функцией Гаусса были исключены из рассмотрения области спектра с явными особенностями поглощения.

SRGe J144709.3+275003

В ранней версии системы SRGz считался кандидатом в далекие квазары на $z_{\text{фот}} = 5.06$. В табл. 2 и на соответствующей вкладке рис. 1 приведены оценки, согласно актуальной версии SRGz. В спектре целевого оптического компаньона видны две эмиссионные линии $\lambda = 5782 \text{ \AA}$ и $\lambda = 7417 \text{ \AA}$. К сожалению, по этим линиям не удастся провести классификацию объекта. В щель спектрографа попал и другой оптический компаньон SDSS12 J144709.88+275003.7, в спектре которого присутствуют эмиссионные линии H β , [OII] и [OIII]. Источник, согласно BPT-диаграмме (Болдуин и др. (1981); Ламарье (2010)), классифицируется как сейфертовская галактика второго типа (Sy2) на красном смещении $z = 0.421$. Вероятно, рентгеновский поток идет от источника SDSS12 J144709.88+275003.7.

SRGe J164037.8+105123

В 98% области локализации рентгеновского источника находится единственный оптический компаньон с видимой звездной величиной $i = 22.1$. Согласно ранним версиям SRGz (Хорунжев и др., 2020), оптический компаньон считался кандидатом в квазары на $z_{\text{фот}} = 3.67$ с высокой достоверностью $z_{\text{Conf}} = 0.54$. Полученный оптический спектр показывает, что объект является галактикой на $z = 0.121$. В более поздней версии SRGz объект перестал считаться надежным кандидатом в далекие квазары, так как имеет $z_{\text{Conf}} = 0.32$, что ниже границы значимости красных смещений $z_{\text{Conf}} = 0.4$.

SRGe J223835.7+124014

Целевой кандидат с $z_{\text{фот}} = 3.46$ оказался звездой M-класса. На расстоянии 11.9 угл. сек от положения рентгеновского источника находится сейфертовская галактика SDSS12 J223834.93+124006.8 на $z_{\text{спек}} = 0.686$, спектр которой опубликован в статье Альбарети и др. (2015). По имеющимся данным нельзя однозначно сказать, какой из двух источников является оптическим компаньоном для рентгеновского источника. Так как рентгеновский источник надежно детектируется только в первом обзоре, то он может быть связан и со вспышкой звезды M-класса, и с переменностью в рентгене сейфертовской галактики.

ОЦЕНКИ МАСС ЧЕРНЫХ ДЫР
И ЭДДИНГТОНОВСКОГО ОТНОШЕНИЯ

У семи объектов нашей выборки в рабочий спектральный диапазон попала широкая линия C IV (1549 Å). Это позволяет оценить для них массы сверхмассивных черных дыр (СМЧД) на основе эмпирического соотношения из работы Парк и др. (2013), которое связывает светимость спектрального континуума на длине волны 1350 Å в системе отсчета квазара и ширину на полувысоте линии C IV с массой СМЧД:

$$\lg \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\odot}} = \alpha + \beta \lg \frac{1350 L_{1350}}{10^{44} (\text{эрг/с})} + \gamma \lg \frac{\text{FWHM}_{\text{CIV}}}{1000 (\text{км/с})}, \quad (1)$$

где $\alpha = 7.48 \pm 0.24$, $\beta = 0.52 \pm 0.09$ и $\gamma = 0.56 \pm 0.48$. Данный метод оценки масс СМЧД уже использовался ранее для квазаров СРГ/еРОЗИТА в работе Додин и др. (2020).

Согласно табл. 3, типичное время экспозиции источника порядка часа. Неопределенность в абсолютной нормировке спектра при длительных экспозициях в режиме длинной щели может достигать нескольких десятков процентов из-за переменного качества атмосферы во время длительной экспозиции. Поэтому для расчета L_{1350} спектры квазаров были нормированы на видимую звездную величину в фильтре i из каталога Pan-STARRS (см. табл. 2). Множитель нормировки подбирался таким, чтобы видимая звездная величина, полученная сверткой спектра с кривой пропускания фильтра Pan-STARRS $PS1.i^6$, соответствовала значению звездной величины i из каталога. Для нормировки спектра источника SRGe J020142.8–015347 использовалась фотометрия в фильтре z . Светимость λL_{λ} на длине волны 1350 Å в системе покоя квазара рассчитывалась из нормированных, поправленных за межгалактическое поглощение и сглаженных сверткой с функцией окна спектров. Расчет фотометрического расстояния проводился с использованием пакета *astropy*.

Форма линии C IV в спектрах большинства квазаров описывается моделью функции Гаусса, из параметров которой рассчитывалось значение ширины на полувысоте линии (FWHM). Локальный континуум подгонялся полиномом второй степени. Только объект SRGe J000107.9+24201 потребовал описания более сложной моделью (см. соответствующее примечание к источнику выше). Полученные оценки λL_{λ} , FWHM_{CIV} и масс СМЧД приведены в табл. 4.

⁶<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/ips/>

Таблица 3. Журнал наблюдений

N	Источник	Прибор	Щель	Конфигурация	Дата	t_{exp}	S/N
1	SRGe J000107.9+242013	SCO2	2''	VPHG940@600	14.07.2020	4 × 600	2.5
2	SRGe J000139.6+341025	SCO2	2''	VPHG1026@735	15.09.2020	3 × 900	5.5
3	SRGe J004501.1+002855	SCO2	2''	VPHG940@600	16.09.2020	5 × 900	2.5
4	SRGe J011237.0+245130	SCO2	2''	VPHG940@600	17.09.2020	4 × 900	3.0
5	SRGe J020142.8–015347	SCO2	1.5''	VPHG1026@735	17.12.2020	6 × 600	3.5
6	SRGe J060448.6+560030	SCO2	2.0''	VPHG940@600	20.02.2021	3 × 1200	2.0
7	SRGe J105537.7+460955	SCO2	1.5''	VPHG940@600	16.12.2020	6 × 900	4.0
8	SRGe J113846.3+704541	SCO2	1.5''	VPHG940@600	17.12.2020	3 × 600	5.0
9	SRGe J144709.3+275003	SCO2	2''	VPHG940@600	21.02.2021	6 × 1200	2.0
10	SRGe J164037.8+105123	SCO2	2''	VPHG940@600	16.07.2020	3 × 900	4.0
11	SRGe J170531.2+424330	SCO2	2''	VPHG940@600	17.07.2020	4 × 300	8.0
12	SRGe J171307.6+124728	SCO2	2''	VPHG940@600	20.02.2021	3 × 900	1.5
13	SRGe J172409.5+660748	SCO2	2''	VPHG940@600	19.07.2020	5 × 900	2.0
14	SRGe J173058.8+721243	SCO2	2''	VPHG1026@735	15.09.2020	3 × 900	3.0
15	SRGe J174157.3+652355	SCO2	2''	VPHG940@600	16.06.2020	1 × 600	1.5
16	SRGe J193822.0+630651	SCO2	2''	VPHG940@600	16.09.2020	3 × 600	6.5
17	SRGe J223835.7+124014	SCO2	2''	VPHG1026@735	14.09.2020	3 × 900	2.5

Примечание. “Конфигурация” — ширина щели спектрографа и название решетки, “Дата” — дата проведения наблюдений, t_{exp} — количество и длительность экспозиций в секундах, S/N — среднее отношение сигнала к шуму в континууме спектра.

Таблица 4. Оценки светимости квазаров и масс черных дыр

Название	$\lg(L_{X,2-10})$	$\lg(1350L_{1350})$	FWHM	$\lg(M_{\text{BH}})$	λ_{Edd}
SRGe J000107.9+242013	45.54 ± 0.15	46.06 ± 0.22	9900 ± 1000	9.11 ± 0.56	0.27
SRGe J004501.1+002855	45.65 ± 0.20	45.36 ± 0.59	>4000	>8.5	<0.2
SRGe J020142.8–015347	45.49 ± 0.21	46.65 ± 0.10	8000 ± 200	9.37 ± 0.52	0.59
SRGe J060448.6+560030	45.73 ± 0.19	46.34 ± 0.29	—	—	—
SRGe J113846.3+704541	45.65 ± 0.13	46.37 ± 0.06	8700 ± 1400	9.23 ± 0.53	0.53
SRGe J170531.2+424330	45.50 ± 0.10	46.75 ± 0.05	4800 ± 1600	9.30 ± 0.44	0.87
SRGe J174157.3+652355	44.67 ± 0.07	45.82 ± 0.31	5500 ± 1600	8.84 ± 0.48	0.29
SRGe J193822.0+630651	45.65 ± 0.11	46.51 ± 0.09	4400 ± 1400	9.15 ± 0.43	0.70

Примечание. $\lg(L_{X(2-10)})$ — десятичный логарифм рентгеновской светимости в диапазоне 2–10 кэВ в системе отсчета квазара, $\lg(1350L_{1350})$ — десятичный логарифм монохроматической светимости (эрг/с) на длине волны $\lambda = 1350 \text{ \AA}$ в системе покоя квазара, FWHM — ширина на полувысоте линии CIV (1549 Å), $\lg(M_{\text{BH}})$ — десятичный логарифм массы СМЧД, выраженной в массах Солнца, $\lambda_{\text{Edd}} = L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ — отношение болометрической светимости к эддингтоновскому пределу.

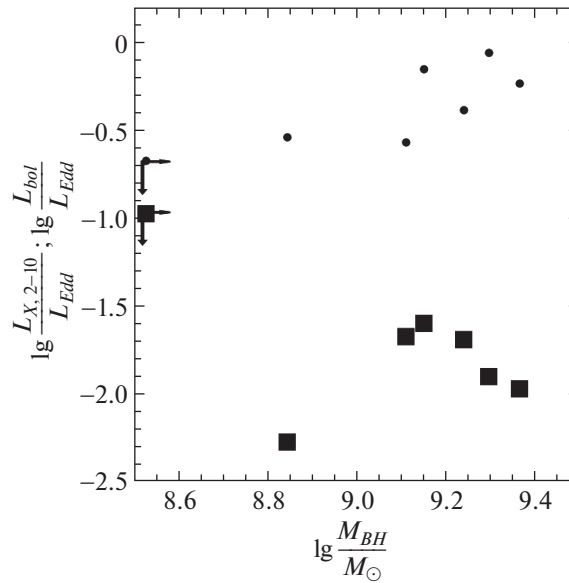


Рис. 4. Отношение болометрической светимости к эддингтоновской в зависимости от массы СМЧД (точки) и отношение рентгеновской светимости в диапазоне 2–10 кэВ к эддингтоновской светимости (квадраты). Ошибки по обеим координатам составляют ~ 0.5 dex и связаны с дисперсией в эмпирической зависимости $M_{\text{BH}} = f(L_{1350}, \text{FWHM}_{\text{CIV}})$ из работы Парк и др. (2013). Для объекта SRGe J004501.1+00285 стрелками показаны: нижний предел на массу СМЧД и верхние пределы на отношение светимостей.

Источник SRGe J004501.1+002855, вероятно, является квазаром с широкими линиями поглощения, поэтому наблюдаемая ширина на полувысоте широкой эмиссионной линии C IV может не отражать картину истинной дисперсии скоростей. Недооценка ширины линии C IV может привести к заниженному значению массы СМЧД. Поэтому для такого объекта полученное значение M_{BH} будет рассматриваться как нижний предел на массу СМЧД.

Оценив массу СМЧД, можно оценить эддингтоновское отношение, т.е. отношение болометрической светимости квазара L_{bol} к его эддингтоновской светимости, $L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{38} (M_{\text{ЧД}}/M_{\odot})$ эрг/с, а также отношение рентгеновской светимости квазара (в диапазоне энергий 2–10 кэВ в системе покоя квазара) к эддингтоновской светимости. Болометрическую светимость можно оценить по светимости на длине волны 1350 Å, используя формулу $L_{\text{bol}} \approx 3.81 \times 1350 L_{1350}$ из работы Даи и др., (2014). Полученные значения приведены в табл. 4 и проиллюстрированы на рис. 4. Измеренные массы черных дыр оказались порядка $10^9 M_{\odot}$, а эддингтоновские отношения превышают 20% (за исключением SRGe J004501.1+002855, для которого получен верхний предел ~ 0.2), что говорит о высоком темпе аккреции на СМЧД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из представленных результатов, для достижения основной цели программы DaLeQo —

получения полной спектроскопической выборки рентгеновских квазаров со светимостью $L_{2-10 \text{ keV}} \gtrsim 5 \times 10^{45}$ эрг/с на $z_{\text{спек}} \gtrsim 3$, требуется получать спектры слабых в оптике объектов ($i > 20$ зв. вел.). Медианная видимая звездная величина текущей выборки программы DaLeQo $i \approx 20.2$, тогда как медианная звездная величина объектов, спектры которых обсуждаются в настоящей работе $i \approx 20.8$. Основную роль в отождествлении таких слабых объектов из программы DaLeQo играет 6-м телескоп БТА. Спектроскопия более ярких объектов из этой же программы проводится на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК и 1.5-м Российско-Турецком телескопе.

В данной работе проведена проверка эффективности работы системы SRGz при отборе слабых в оптике кандидатов в квазары среди рентгеновских источников из обзора неба СРГ/еРОЗИТА. Мы ведем постоянную работу над улучшением эффективности системы SRGz, в том числе улучшая алгоритмы отсева звезд M-класса и используя спектроскопические данные, полученные в рамках программы DaLeQo.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-12-00343. Наблюдения на телескопах CAO РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор

проекта RFMEFI61919X0016). Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука”.

Это исследование основано на наблюдениях телескопа eРОЗИТА на борту обсерватории SRG. Обсерватория SRG 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 SRG/eРОЗИТА изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка (MPE) при поддержке DLR. Космический аппарат SRG 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 eРозита обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом eРОЗИТА, и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа SRG/eРОЗИТА. Система SRGz создана в научной рабочей группе по поиску рентгеновских источников, их отождествлению и составлению каталога по данным телескопа SRG/eРОЗИТА в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

В работе при расчете галактического⁷ и межгалактического⁸ поглощения, расстояний и других астрофизических величин использовались функции из библиотек astropy (Робитайль и др., 2013), (pysynphot Лим и др. (2015)) и specutils⁹. Сведения о кривых пропускания и других характеристиках фотометрических фильтров взяты с сайта Spanish Virtual Observatory Filter Profile Service¹⁰, Родриго и др. (2012, 2020). В работе использовались каталоги базы данных VizieR Охзенбейн и др. (2000).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбарети и др. (F. Albareti, J. Comparat, C. Gutierrez, F. Prada, I. Paris, D. Schlegel, et al.), *MNRAS* **452**, 4153 (2015).
2. Афанасьев, Моисеев (V. Afanasiev and A. Moiseev), *Baltic Astron.* **20**, 363 (2011).
3. Беннет и др. (C. Bennett, D. Larson, J. Weiland, and G. Hinshaw), *Astrophys. J.* **794**, 135 (2014).
4. 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)].
5. Бикмаев и др. (Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А., Сахибуллин Н.А., Гумеров Р.И., Склянов А.С., Глушков М.В., Хамитов И.М., и др.), Письма в Астрон. журн. **47**, 311 (2021). [I.F. Bikmaev et al., *Astron. Lett.* **47**, 277 (2021)].
6. Буренин и др. (Готовится к печати), Письма в Астрон. журн. **48**, (2022). [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **48**, (2022)].
7. Болдуин и др. (J. Baldwin, M. Phillips, R. Terlevich), *PASP* **93**, 5 (1981).
8. Ванден Берк и др. (D. Vanden Berk, G. Richards, A. Bauer, M. Strauss, D. Schneider, T. Heckman), *Astron. J.* **122**, 549 (2001).
9. Георгакакис и др. (A. Georgakakis, J. Aird, J. Buchner, M. Salvato, M. Menzel, W. Brandt, et al.), *MNRAS*. **453**, 1946 (2015).
10. Даи и др. (Y. Dai, M. Elvis, J. Bergeron, G. Fazio, J. Huang, B. Wilkes, et al.), *Astrophys. J.* **791**, 113 (2014).
11. Деи и др. (A. Dey, D. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
12. Додин и др. (А.В., Потанин С.А., Шатский Н.И., Белинский А.А., Атапин К.Е., Бурлак 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)].
13. Додин и др. (Додин А.В., Шатский Н.И., Белинский А.А., Атапин К.Е., Бурлак М.А., Егоров О.В., Желтоухов С.Г. и др.), Письма в Астрон. журн. **47**, 683 (2021).
14. Карделли и др. (J. Cardelli, G. Clayton, J. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
15. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, and M. Brusa), *Astron. Astrophys.* **558**, A89 (2013).
16. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, G. Huetsi, R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **558**, A90 (2013).
17. Кулкарни, Ворсек, Хеннави (G. Kulkarni, G. Worsecck, J. Hennawi), *MNRAS* **488**, 1035 (2019).
18. Ламарье (F. Lamareille), *Astron. Astrophys.* **509**, 53 (2010).
19. Лим и др. (P. Lim, R. Diaz, V. Laidler), *PySinhphot User's Guide* (Baltimore, MD: STScI); <https://pysynphot.readthedocs.io/>
20. Массей и др. (P. Massey, K. Strobel, J. Barnes, E. Anderson), *Astrophys. J.* **328**, 315 (1988).
21. 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).
22. Медведев и др. (P. Medvedev, M. Gilfanov, S. Sazonov, N. Schartel, R. Sunyaev), *MNRAS* **504**, 576 (2021); <https://arxiv.org/abs/2011.13724>.

⁷<https://extinction.readthedocs.io/en/latest/>

⁸<https://pysynphot.readthedocs.io>

⁹<https://specutils.readthedocs.io/>

¹⁰<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/>

23. Мещеряков (Мещеряков А., Глазкова В., Герасимов С., Машечкин И.), Письма в Астрон. журн. **44**, 801 (2018). [A.V. Mescheryakov et al., *Astron. Lett.* **44**, 735 (2018)].
24. Мещеряков (А. Мещеряков), in preparation (2022).
25. Огури (М. Oguri), *MNRAS* **444**, 147 (2014).
26. Охзенбейн, Бауэр, Марко (F. Ochsenbein, P. Bauer, J. Marcout), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 23 (2000).
27. Д. Парк, Дж. Ву, К. Денни, Ж. Шин (D. Park, J. Woo, K. Denney, J. Shin), *Astrophys. J.* **770**, 87 (2013).
28. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
29. Пэрис и др. (I. Paris, P. Petitjean, E. Aubourg, A. Myers, A. Streblyanska, B. Lyke, et al.), *Astron. Astrophys.* **613**, 51 (2018).
30. Райт и др. (E. Wright, P. Eisenhardt, A. Mainzer, M. Ressler, R. Cutri, T. Jarrett, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
31. Ричардс и др. (G. Richards, A. Myers, C. Peters, S. Krawczyk, G. Chase, N. Ross, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, 39 (2015).
32. Робитайль и др. (T. Robitaille, E. Tollerud, P. Greenfield, M. Droettboom, E. Bray, T. Aldcroft, et al.), *Astron. Astrophys.* **558**, A33 (2013).
33. Родриго и др. (C. Rodrigo, E. Solano, A. Bayo), IVOA Working Draft 15 october 2012. 10.5479/ADS/bib/2012ivoa.rept.1015R
34. Родриго и др. (C. Rodrigo, E. Solano, A. Bayo), XIV.0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society, 2020 id.182. <https://www.sea-astronomia.es/reunion-cientifica-2020>.
35. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, 132 (2021).
36. Трюмпер (J. Trümper), *Advances in Space Research* **2**, 241 (1982).
37. Уида и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, M. Watson), *Astrophys. J.* **786**, 104 (2014).
38. Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, С.Ю. Сазонов, Р.А. Буренин), Письма в Астрон. журн. **44**, 546 (2018).
39. Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, С.Ю. Сазонов, И.А. Зазнобин, М.В. Еселевич), Письма в Астрон. журн. **45**, 464 (2019). [G.A. Khorunzhev et al., *Astron. Lett.* **45**, 411 (2019)].
40. Хорунжев и др. (Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Буренин Р.А., Ляпин А.Р., Медведев П.С., Сазонов С.Ю., Еселевич М.В., Сюняев Р.А. и др.), Письма в Астрон. журн. **46**, 155 (2020). [G.A. Khorunzhev et al., *Astron. Lett.* **46**, 149 (2020)].
41. Хорунжев и др. (Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Медведев П.С., Борисов В.Д., Буренин Р.А., Кривонос Р.А. и др.), Письма в Астрон. журн. **47**, 155 (2021). [G.A. Khorunzhev et al., *Astron. Lett.* **47**, 123 (2021)].
42. Чамберс и др. (K. Chambers, E. Magnier, N. Vetalfe, H. Flewelling, M. Huber, C. Waters, et al.); <https://arxiv.org/abs/1612.05560>
43. Шлегель и др. (D. Schlegel, D. Finkbeiner, M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).