

УДК 524.82-732:520.82/.84

ИЗБРАННЫЕ АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК ИЗ ОБЗОРА СРГ/eROSITA: ОПТИЧЕСКИЕ И ИК-НАБЛЮДЕНИЯ НА 2.5-М ТЕЛЕСКОПЕ КГО ГАИШ МГУ В 2021 И 2022 ГОДАХ

© 2023 А. А. Белинский^{1*}, А. В. Додин¹, С. Г. Желтоухов¹, К. А. Постнов¹,
С. А. Потанин¹, А. М. Татарников¹, А. Н. Тарасенков¹, Н. И. Шатский¹, П. С. Медведев²,
Г. А. Хорунжев², А. В. Мещеряков², С. Ю. Сазонов², М. Р. Гильфанов²

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

Поступила в редакцию 16 апреля 2023 года; после доработки 1 июня 2023 года; принята к публикации 4 июня 2023 года

Представлены результаты оптической спектроскопии на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ со спектрографом TDS (3600–7500 Å, $R \approx 2000$) восьми сильно переменных рентгеновских источников — кандидатов в ядра активных галактик из обзора всего неба телескопа eROSITA обсерватории СРГ. По эмиссионным и абсорбционным линиям в спектрах определены красные смещения источников. Как минимум пять объектов можно отнести к сейфертовским галактикам. С помощью камеры ASTRONIRCAM проведена пробная ИК-фотометрия трех далеких квазаров с $z > 5$. Показано, что на диаграмме « $(z - J) - (J - W1)$ » исследуемые далекие квазары уверенно отделяются от галактических красных и коричневых карликов. Это доказывает возможность предварительной классификации кандидатов в далекие рентгеновские квазары по ИК-цветам для дальнейшего детального спектроскопического исследования на крупных телескопах.

Ключевые слова: галактики: активные — рентгеновское излучение: галактики

1. ВВЕДЕНИЕ

Российская космическая обсерватория СРГ была успешно запущена 13 июля 2019 г. с космодрома Байконур в окрестность точки L2 системы Солнце–Земля (Sunyaev et al., 2021). Комплекс научной аппаратуры обсерватории состоит из двух рентгеновских телескопов косоугольного падения: немецкого eROSITA (0.2–8 кэВ) (Predehl et al., 2021) и российского ART-XC им. М. Н. Павлинского (4–30 кэВ) (Pavlinsky et al., 2021).

Наземная поддержка рентгеновских наблюдений миссии требуется для определения типа новых рентгеновских источников и транзиентов, определения спектроскопических красных смещений внегалактических объектов и изучения физических условий по фотометрическим и спектральным данным. В программах наземной поддержки миссии СРГ участвуют крупные российские телескопы (6-м телескоп БТА САО РАН, 2.5-м телескоп КГО ГАИШ МГУ, российско-турецкий 1.5-м телескоп РТТ-150, 1.6-м телескоп АЗТ-ЗЗИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН и др.).

Всего с 2020 г. по начало 2023 г. на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ были получены спектры более 160 кандидатов в квазары и 45 скоплений галактик. Часть результатов по спектроскопическим наблюдениям объектов СРГ/eROSITA различной природы телескопами КГО ГАИШ МГУ опубликована ранее в работах Dodin et al. (2020, 2021), Sazonov et al. (2021), Khorunzhev et al. (2022b), Mereminskiy et al. (2022). Результаты спектроскопических измерений красных смещений далеких рентгеновских квазаров по программам наземной поддержки рентгеновского обзора неба СРГ/eROSITA другими телескопами опубликованы в работах Vikmaev et al. (2020, 2021) (РТТ-150), Khorunzhev et al. (2020) (АЗТ-ЗЗИК), Khorunzhev et al. (2021, 2022a) (БТА). В настоящей работе представлены результаты новых спектроскопических измерений восьми избранных сильно переменных рентгеновских источников — кандидатов в активные ядра галактик (АЯГ) — для определения их красного смещения и параметров эмиссионных линий. Эти объекты отобраны по изменению величины рентгеновского потока в семь и более раз между полугодовыми обзорами

*E-mail: alexs@sai.msu.ru

неба SPG/eROSITA. Полученные результаты будут использованы при составлении статистически полных выборок переменных рентгеновских источников (см. Medvedev et al., 2022) и для отбора кандидатов в события приливного разрушения (см. Khorunzhev et al., 2022b).

Также приведены результаты пробной программы ИК-наблюдений с помощью камеры ASTRONIRCAM на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ далеких (на красных смещениях $z > 5$) рентгеновских квазаров из обзора неба SPG/eROSITA. Продемонстрированы возможности камеры для фотометрических наблюдений в инфракрасном диапазоне 1.25–2.2 мкм оптически слабых источников, которыми являются квазары на $z > 5$. Обсуждается перспектива использования наблюдений на ASTRONIRCAM для отбора фотометрических кандидатов в квазары на $z > 5$ для последующей спектроскопии на крупных телескопах.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Оптическая спектроскопия

Спектральные наблюдения выполнены на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с двухлучевым спектрографом TDS¹ (Transient Double-beam Spectrograph) в 2021–2022 гг. Голубой канал покрывает диапазон 3550–5770 Å с разрешением $R \sim 1000$, а красный — диапазон 5650–7450 Å с разрешением $R \sim 2400$ (более подробно о разрешении см. в разделе 3). Каналы сшиваются на одной длине волны, положение которой выбирается визуально, исходя из качества сшиваемых участков, и обычно лежит в диапазоне 5690–5730 Å. Детально прибор описан в статье Potanin et al. (2020). Список объектов и детали наблюдений приведены в таблице 1.

Поскольку объекты слабее 19^m (в зависимости от качества изображения и яркости фона неба) не видны в камеру подзора спектрографа, начиная со звездных величин 18^m применяется метод дифференциального наведения, который заключается в определении погрешности наведения телескопа при наблюдении близкой к исследуемому объекту яркой звезды с известными координатами. Мы используем звезды из каталога Hipparcos, для которых хорошо известны координаты и собственные движения. Опыт работы показывает, что ближайшая звезда оказывается не дальше чем в градусе от исследуемого объекта. Перед наведением на слабый источник выполняются наведение на яркую звезду и установка её в нужное место щели. Необходимое для этого смещение телескопа и дает

нам поправки азимутальных координат, которые мы считаем медленно меняющимися с течением времени и по небу. После этого телескоп наводится на интересующий нас объект и применяются определённые ранее поправки координат. В результате объект также попадает в нужное место щели. Поскольку метод достаточно быстрый и стабильный, он часто применяется и для установки видимых в подзор, но слабых или протяженных объектов, для которых сложно визуально определить центр.

Методы обработки спектров аналогичны описанным в работе Potanin et al. (2020) и в нашей предыдущей статье (Dodin et al., 2021). Опыт наблюдения слабых объектов показал необходимость избавления от эффектов персистенции — увеличения темнового тока участков ПЗС после их засвечивания ярким источником (яркая звезда, калибровочные лампы). Эти эффекты проявляются неоднородным образом на матрице голубого канала и могут приводить к искажениям результатов. Для их устранения спектр плоского поля снимается перед началом экспозиции слабого объекта, а плоское поле снимается перед началом экспозиции темновых кадров. Такая последовательность действий делает персистенцию в темновых и научных кадрах одинаковой, что позволяет убрать ее эффект простым вычитанием.

2.2. Наблюдения в ИК-диапазоне

Инфракрасные фотометрические наблюдения выполнены с камерой-спектрографом ASTRONIRCAM² (Nadjip et al., 2017), установленной в фокусе Несмита 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ. Изображения формата 1 К×1 К с масштабом изображения 0".27/пиксел были получены в фотометрических полосах *J*, *H* и *K*. Подробное описание работы камеры в фотометрическом режиме приведено в работе Tatarnikov et al. (2023). Список объектов и детали наблюдений собраны в таблице 2. Из-за большого уровня фона в ИК-диапазоне наблюдения проводились в режиме получения большого количества отдельных кадров с экспозициями 30–100 с со смещением телескопа между ними на угол 3"–5". Полученные кадры после первичной обработки суммировались. Измерения блеска звезд сравнения, контрольных звезд и объектов были проведены методом апертурной фотометрии с радиусом апертуры 1".3–2" (в зависимости от качества изображений). Звездами сравнения были выбраны близкие к объекту звезды поля, оценки блеска которых в каталоге 2MASS в фильтрах *J*, *H* и *K* лежат в интервале 12^m–15^m. С помощью уравнений редукиции (Tatarnikov and Tatarnikov, 2023) блеск звезд сравнения переведен в фотометрическую систему MKO-NIR.

¹<https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/tds/>

²<https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/astronircam/>

Таблица 1. Журнал спектральных наблюдений и некоторые оптические свойства исследуемых объектов. Звездная величина в фильтре r взята из каталога Pan-STARRS DR2 ([https://catalogs.mast.stsci.edu/panstarrs/Stacked object](https://catalogs.mast.stsci.edu/panstarrs/Stacked%20object)), z_e , z_a — красные смещения, определенные соответственно по эмиссионным и абсорбционным линиям. SNR — медианное значение отношения сигнала к шуму

Объект*	Дата	z_e	z_a	r , mag	Щель, arcsec	T_{exp} , с	SNR
J001007.3–133539	2021/10/12	0.2386 ± 0.0003	0.2389 ± 0.0004	19.1	1.5	5×1200	10
J004214.9+102003	2021/10/13	0.0856 ± 0.0004	0.0856 ± 0.0002	17.4	1.5	4×1000	20
J013454.7+374714	2021/12/30	0.0620 ± 0.0001	0.0620 ± 0.0002	18.0	1.5	3×1200	10
J155656.9+420554	2022/03/28	-0.0003 ± 0.0001	—	20.0	1.5	2×1200	1.5
J170446.1+432517	2022/05/21	0.3675 ± 0.0004	—	17.5	1.5	2×1200	30
J173410.4+613343	2021/12/10	0.1354 ± 0.0002	0.1353 ± 0.0003	18.9	1.0	$3 \times 1200 + 900$	20
J225649.0+405111	2021/12/11	0.0682 ± 0.0002	0.0679 ± 0.0003	17.5	1.5	3×1200	40
J235910.9+260133	2021/11/22	0.0643 ± 0.0001	0.0639 ± 0.0002	17.6	1.5	3×1200	40

Примечание: * — в названиях АЯГ здесь и далее для краткости мы опускаем акроним SRGe.

Таблица 2. ИК-фотометрия трех далеких квазаров

Объект	RA (J2000), hh:mm:ss	Dec (J2000), dd:mm:ss.s	Дата	Фильтр	Seeing, arcsec	t_{exp} , с	Блеск, mag
SRGe J020142.9–01534 $z = 5.02^a$	02:01:42.79	–01:53:50.0	2021/09/10	J	1.1	2420	$18.77_{\pm 0.03}$
				H	1.1	2100	$17.82_{\pm 0.03}$
				K	1.0	1660	$17.18_{\pm 0.03}$
CFHQS J142952+544717 $z = 6.183^b$	14:29:52.10	+54:47:17.6	2021/06/11	J	1.2	2100	$19.82_{\pm 0.05}$
			2021/06/21	H	1.3	2900	$18.80_{\pm 0.10}$
				K	1.0	3000	$18.17_{\pm 0.10}$
SRGe J170245.3+130104 ^c $z = 5.466^c$	17:02:45.28	+13:01:02.0	2021/05/28	J	1.4	2020	$19.39_{\pm 0.05}$
			2021/06/11	J	1.2	2320	$19.36_{\pm 0.05}$
			2021/06/22	H	1.6	1870	$19.25_{\pm 0.20}$
			2021/06/11	K	1.1	2280	$18.68_{\pm 0.20}$

Ссылки: ^a — Khorunzhev et al. (2022); ^b — Wang et al. (2011); ^c — Khorunzhev et al. (2021).

3. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ КАНДИДАТОВ В СИЛЬНОПЕРЕМЕННЫЕ АЯГ

Определение красных смещений объектов требует надежной калибровки по длинам волн. Эта калибровка выполняется периодически по спектру линейчатой лампы, однако спектрограф подвержен различного рода деформациям, влияние которых на сдвиг длин волн мы учитываем по эмиссионным линиям ночного неба. В случае темного неба и при экспозициях больше 5 минут остаточный разброс в положениях линий неба после применения поправок в красном канале составляет $0.05\text{--}0.1 \text{ \AA}$

или $3\text{--}5 \text{ км с}^{-1}$. Недостаток линий неба в голубом канале делает контроль калибровки затруднительным: для вычисления поправок мы используем только одну линию $\lambda 5577$. Поскольку поправка к калибровке может быть непостоянна по диапазону, мы принимаем ошибку калибровки для длин волн $\lambda 4500\text{--}5700$ равной 0.1 \AA (что соответствует среднеквадратичному разбросу калибровки по лампе в голубом канале), а в более коротковолновой области — 0.5 \AA . После коррекции калибровки длины волн приводятся к барицентру Солнечной

системы. Для определения красных смещений все длины волн преобразуются к значениям в вакууме.

Спектры исследуемых объектов (см. рис. 1) показывают либо набор узких линий, либо линии, состоящие из узкой и широкой компонент. Для определения красного смещения мы использовали только узкие линии, положение которых находили путем аппроксимации их профилей функцией Гаусса. В случае наличия широкой компоненты или наложения нескольких близко расположенных линий общий профиль также моделировался суммой нескольких гауссовых профилей. Пары линий [O III] λ 4959/ λ 5007, [N II] λ 6548/ λ 6583, [O I] λ 6364/ λ 6300 подгонялись (фитировались) при условии, что их ширины одинаковы, расстояние между линиями известно и отношение потоков равно теоретическому. Аналогично фитировались профили линий [S II] λ 6716/ λ 6731, но без фиксации отношения потоков. Подлежащий континуум мы аппроксимировали прямой, параметры которой находились одновременно с параметрами гауссовских профилей методом наименьших квадратов. Центральные длины волн с их ошибками конвертировались в красные смещения z_i и их ошибки σ_i путем сравнения с лабораторными значениями. В случае неразрешенной бленды в качестве лабораторной длины волны бралась длина волны, усредненная с весами gf каждой компоненты.

Наблюдаемые профили узких линий неточно описываются гауссовским профилем и могут показывать асимметрию, которая связана с кинематикой газа, излучающего в этих линиях. Для определения скорости галактики, не зависящей от движения газа в ней, можно также использовать абсорбционный спектр, который виден у большинства источников. Для определения красного смещения по абсорбционному спектру мы сравнивали наблюдаемый спектр со спектром шаблона, который был подобран из каталога RCSED³ (Chilingarian et al., 2017). Длины волн спектра сравнения были исправлены за z и приведены к значениям в вакууме. Поскольку спектр сравнения неидеально описывает спектры наших объектов, сравнивались только отдельные части, которые мы выбирали вручную, исходя из их подобия наблюдаемому спектру, — всего 5–10 участков на всем доступном интервале длин волн. На каждом участке спектры нормировались и масштабировались к одинаковым глубинам спектральных линий, после чего методом наименьших квадратов мы искали сдвиг между наблюдаемым и опорным спектрами и его погрешность, которые конвертировались в z_i и σ_i .

³<http://rcsed.sai.msu.ru/>

Средневзвешенные красные смещения, определенные по эмиссионным и абсорбционным линиям, даны в таблице 1. В качестве неопределенности для каждой из величин приведен среднеквадратичный разброс с весами ошибок σ_i^{-2} .

Один из объектов выборки, J155656.9+420554, имеет красное смещение, близкое к нулю. Его лучевая скорость $V_r = -90 \pm 30$ км с⁻¹, и он, вероятно, относится к объектам нашей Галактики со спектром, похожим на спектр катализмических переменных (см., например, работу Pretorius and Knigge (2007)). Остальные являются галактиками. Выбранные объекты характеризуются большой переменностью в рентгеновском диапазоне, и, следовательно, также могут показывать спектральную переменность. Для ее количественного изучения в будущем найденные параметры спектральных линий собраны в таблице 3.

Практически для всех объектов имеются наблюдения спектрофотометрического стандарта из списка ESO⁴ на близкой воздушной массе, за исключением J001007.3–133539, где воздушная масса отличается на 0.8. Наблюдения с узкой щелью не позволяют получать абсолютные потоки из-за неизвестных потерь света на щели как для объекта, так и для стандарта, однако относительное распределение энергии может быть восстановлено. В таблице 3 мы приводим поток в линиях относительно линии [O III] λ 5007, а там, где этой линии нет, — относительно H β .

Объекты, для которых наблюдаемый диапазон содержит линию H α , попадают на диаграмме « $\lg([\text{N II}] \lambda 6583/\text{H}\alpha) - \lg([\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta)$ » (рис. 2) в область активных ядер галактик (Kewley et al., 2006). Также к активным галактическим ядрам можно отнести J170446.1+432517 — благодаря сильным широким линиям водорода ($FWHM \sim 3500$ км с⁻¹). Подъем на краю спектра J173410.4+613343 выглядит как часть широкой эмиссионной линии H α , и тогда этот объект также является активным ядром.

Ширина узких компонент линий сравнима с шириной инструментального профиля. При ширине щели больше нормальной ширина инструментального профиля зависит от качества изображения и ограничена снизу разрешением, которое определяется искажениями камеры, а сверху — шириной щели. Этот верхний предел мы определили по линиям излучения неба. Поскольку в голубой области сильных линий неба мало, уширение линий вычислялось по спектру рассеянного солнечного света (сумеречное небо и поверхность Луны), который

⁴<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

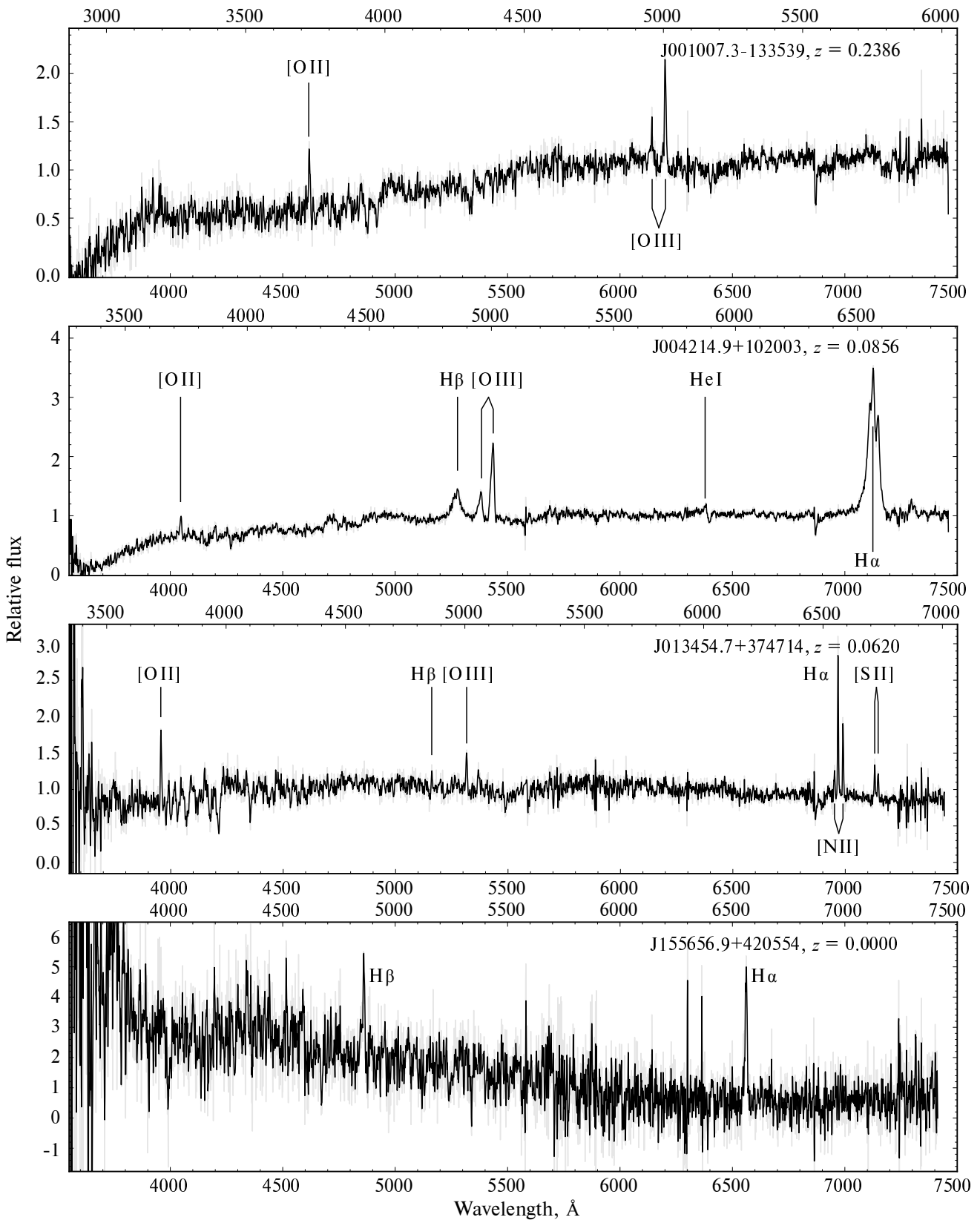


Рис. 1. Спектры исследуемых объектов. На нижней оси показаны наблюдаемые длины волн. Верхняя ось соответствует длинам волн в системе отсчета источника. Поток нормирован на медианный поток, вычисленный по всему наблюдаемому диапазону. Серая линия — оригинальные наблюдения. Сплошная черная линия — наблюдения, сглаженные скользящим средним. Подписаны только те линии, по которым производилось измерение z_e .

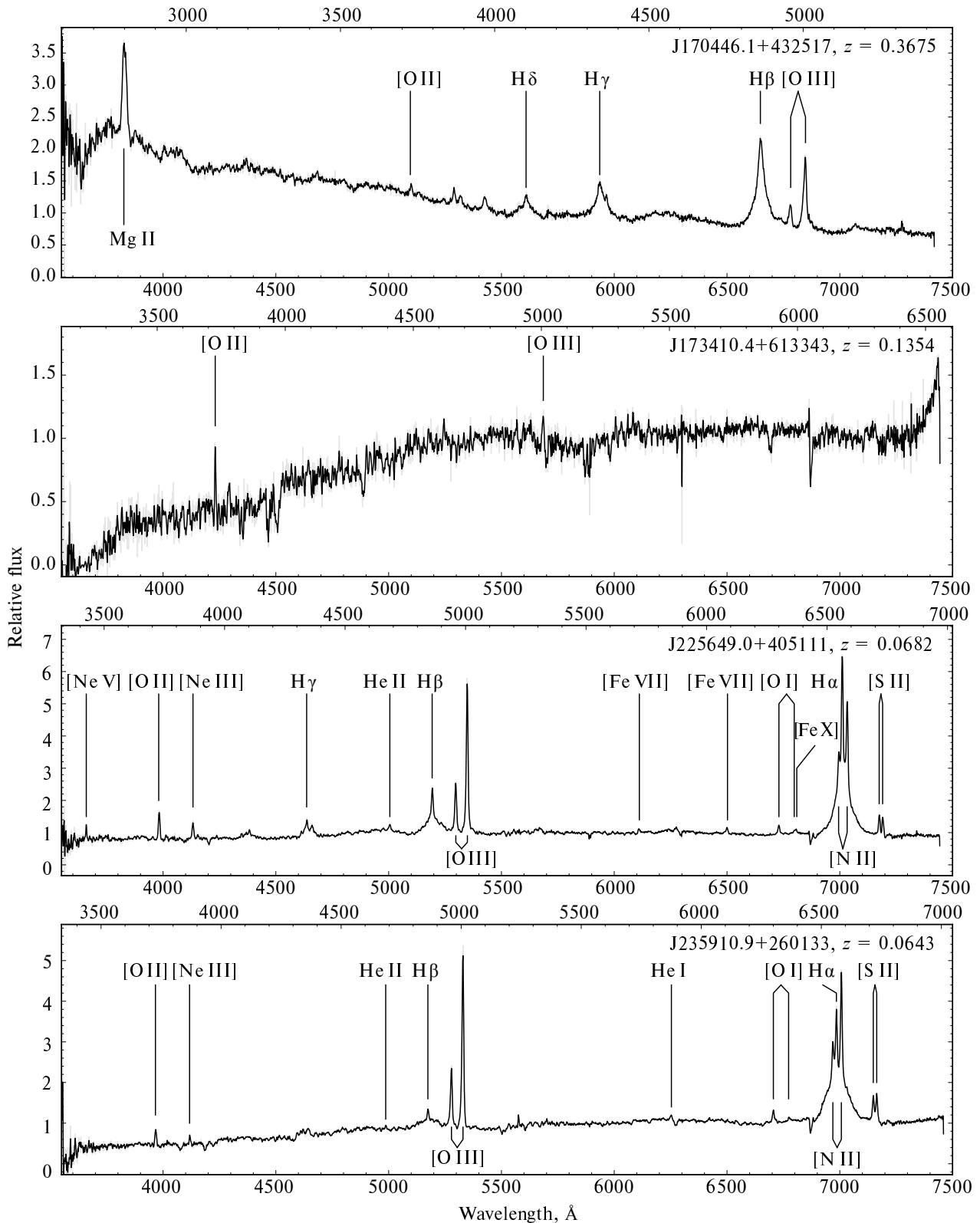


Рис. 1. Продолжение.

Таблица 3. Параметры линий: относительные потоки, дисперсия скоростей и соответствующий инструментальный профиль (см. подробнее в тексте, раздел 3)

Линия	F/F_0	σ , км с ⁻¹	σ_{inst} , км с ⁻¹	Линия	F/F_0	σ , км с ⁻¹	σ_{inst} , км с ⁻¹
J001007.3–133539				J225649.0+405111			
[O II] λ 3727	0.505 ± 0.105	200 ± 30	129	[Ne V] λ 3426	0.048 ± 0.009	130 ± 19	191
[O III] λ 5007*	1.000 ± 0.082	173 ± 8	70	[O II] λ 3727	0.148 ± 0.009	221 ± 9	162
J004214.9+102003				[Ne III] λ 3869	0.096 ± 0.006	240 ± 11	152
[O II] λ 3727	0.149 ± 0.025	278 ± 35	157	H γ	0.030 ± 0.005	126 ± 18	128
H β	0.069 ± 0.023	207 ± 54	113	H γ	0.232 ± 0.021	892 ± 64	128
H β	1.012 ± 0.079	1376 ± 67	113	He II λ 4686	0.049 ± 0.006	278 ± 28	118
[O III] λ 5007*	1.000 ± 0.050	394 ± 11	110	H β	0.194 ± 0.008	208 ± 7	114
He I λ 5876	0.082 ± 0.018	277 ± 46	67	H β	1.010 ± 0.036	2001 ± 50	114
H α	0.441 ± 0.037	186 ± 11	60	[O III] λ 5007*	1.000 ± 0.021	210 ± 2	111
H α	4.165 ± 0.185	978 ± 13	60	[Fe VII] λ 5721	0.027 ± 0.004	202 ± 24	71
[N II] λ 6583*	0.477 ± 0.036	200 ± 10	60	[Fe VII] λ 6087	0.039 ± 0.004	184 ± 13	65
J013454.7+374714				[O I] λ 6300*	0.060 ± 0.003	176 ± 7	62
[O II] λ 3727	1.732 ± 0.334	176 ± 15	164	[Fe X] λ 6375	0.028 ± 0.004	245 ± 28	61
H β	0.261 ± 0.127	83 ± 29	115	H α	0.697 ± 0.017	141 ± 2	60
[O III] λ 5007*	1.000 ± 0.220	156 ± 19	112	H α	3.613 ± 0.081	1315 ± 14	60
H α	2.352 ± 0.379	70 ± 2	60	[N II] λ 6583*	0.467 ± 0.014	138 ± 3	60
[N II] λ 6583*	1.369 ± 0.235	81 ± 4	60	[S II] λ 6716**	0.112 ± 0.004	129 ± 3	60
[S II] λ 6716**	0.673 ± 0.128	90 ± 7	60	[S II] λ 6731**	0.096 ± 0.003	129 ± 3	60
[S II] λ 6731**	0.565 ± 0.111	90 ± 7	60	J235910.9+260133			
J155656.9+420554				[O II] λ 3727	0.073 ± 0.008	229 ± 18	163
H β	1.000 ± 0.278	233 ± 35	121	[Ne III] λ 3869	0.034 ± 0.006	167 ± 23	153
H α	1.553 ± 0.338	206 ± 15	64	He II λ 4686	0.018 ± 0.004	158 ± 29	118
J170446.1+432517				H β	0.052 ± 0.006	174 ± 16	115
Mg II λ 2800	1.748 ± 0.073	693 ± 18	175	H β	0.625 ± 0.036	2577 ± 114	115
[O II] λ 3727	0.102 ± 0.018	281 ± 38	116	[O III] λ 5007*	1.000 ± 0.025	216 ± 3	112
H δ	0.096 ± 0.024	271 ± 53	106	He I λ 5876	0.029 ± 0.003	187 ± 17	69
H δ	0.598 ± 0.078	1361 ± 125	106	[O I] λ 6300*	0.072 ± 0.004	189 ± 8	62
H γ	0.361 ± 0.040	474 ± 35	75	H α	0.312 ± 0.010	148 ± 3	60
H γ	1.196 ± 0.122	1718 ± 95	75	H α	3.505 ± 0.078	1858 ± 17	60
H β	0.937 ± 0.037	426 ± 10	63	[N II] λ 6583*	0.537 ± 0.013	150 ± 2	60
H β	2.980 ± 0.108	1552 ± 25	63	[S II] λ 6716**	0.138 ± 0.005	157 ± 3	60
[O III] λ 5007*	1.000 ± 0.033	316 ± 6	61	[S II] λ 6731**	0.151 ± 0.005	157 ± 3	60
J173410.4+613343							
[O II] λ 3727	1.361 ± 0.408	143 ± 18	105				
[O III] λ 5007	1.000 ± 0.351	186 ± 35	86				

Примечание:* — линии с общим верхним уровнем фитировались с учетом общей ширины, известного расстояния между линиями и фиксированного отношения потоков: [O III] λ 4959/ λ 5007=0.3432, [N II] λ 6548/ λ 6583=0.3363, [O I] λ 6364/ λ 6300=0.3221; ** — линии [S II] λ 6716 и [S II] λ 6731 фитировались при условии общей ширины и известного расстояния между ними, отношение потоков линий не фиксировалось.

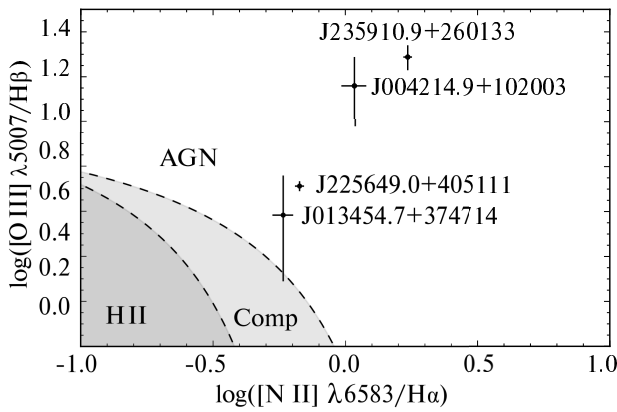


Рис. 2. Диагностическая диаграмма « $\lg([N II] \lambda 6583/H\alpha) - \lg([O III] \lambda 5007/H\beta)$ » для объектов из таблицы 1, у которых линия $H\alpha$ попадает в наблюдаемый спектральный диапазон. Разграничение областей с разным типом ионизации: AGN, Comp (смешанный), H II (фотоионизация) — согласно Kewley et al. (2006).

сравнивался с эталонным солнечным спектром высокого разрешения. Оба метода согласуются друг с другом, поэтому мы объединили их результаты, и по ним были построены аппроксимирующие кривые — см. рис. 3, на котором показана величина σ_{inst} ($FWHM \approx 2.35\sigma$) для обоих каналов с двумя вариантами ширины щели в каждом. Так как ширина инструментального профиля меняется с длиной волны, для удобства мы приводим ее значение в таблице 3 рядом с ширинами изучаемых линий для соответствующей щели.

4. ИК-ФОТОМЕТРИЯ ДАЛЕКИХ КВАЗАРОВ

Классификация объектов, наблюдаемых обсерваторией СРГ, в основном проводится по оптическим спектрам. В случае слабых источников получение спектральных данных необходимого качества требует значительных затрат наблюдательного времени крупных телескопов. Для его результативного использования важна предварительная селекция объектов. Один из примеров — квазары, находящиеся на больших красных смещениях (например, $z > 5$, Khorunzhev et al. (2021)). Подобные источники в оптических обзорах обычно видны лишь в полосах i или z и по величине показателя цвета $i - z$ могут быть похожи на слабые галактические красные или коричневые карлики (Kirkpatrick et al., 2011). Другие показатели цвета могут быть более информативными, позволяя разделить эти классы объектов.

Для проверки возможности предварительного отделения далеких слабых квазаров от звездных галактических источников по ИК-показателям

цвета до проведения затратных спектроскопических измерений на крупных телескопах мы проанализировали положение трех далеких квазаров, отождествленных с помощью программы SRGz (Belvedersky et al., 2022), на двухцветных ИК-диаграммах.

На рис. 4 приведена двухцветная диаграмма « $(z - J) - (J - W1)$ », где J — фотометрическая полоса камеры ASTRONIRCAM с центральной длиной волны 1.25 мкм, а $W1$ — фотометрическая полоса WISE ($\lambda = 3.37$ мкм). На эту диаграмму нанесены результаты синтетической фотометрии, выполненной нами для трех шаблонов распределений энергии в спектрах квазаров (SED), которые наблюдаются на красных смещениях от 2 до 6. Мы также нанесли положения цветов карликов поздних спектральных классов из работы Kirkpatrick et al. (2011), z -величины из обзора Pan-STARRS (Chambers et al., 2016) и измерения трех квазаров из таблицы 2, наблюдения которых были проведены в КГО ГАИШ МГУ для тестирования методики отделения квазаров от холодных карликов. Мы вынужденно используем архивные данные фотометрии в z -полосе, полученные за несколько лет до наших наблюдений. Однако характерная переменность АЯГ в континууме обычно не превышает 30–50% (Kollatschny et al., 2006). Кроме того, мы ожидаем, что в ярких далеких квазарах находятся массивные черные дыры с массами порядка $10^9 M_{\odot}$ и типичный временной масштаб оптической переменности таких квазаров составляет порядка нескольких лет (Vochkaev and Gaskell, 2009). Рассматриваемые в работе квазары находятся на красном смещении $z \sim 5$, поэтому временной интервал между наблюдениями в фильтре J в КГО ГАИШ МГУ (2021 г.) и фильтрах Pan-STARRS (2016 г.) в системе отсчета квазара сокращается на множитель $1/(1+z)$ и становится меньше характерного времени заметного изменения потока. Поэтому для иллюстрации способа отбора мы пренебрегаем эффектом переменности АЯГ. Как видно на рис. 4, исследуемые квазары попали в область, близкую к положению шаблонов далеких квазаров на диаграмме, при точности фотометрии в J полосе лучше $0^m1 - 0^m2$. Использование других цветов (например, $(Y - J)$ или $(Y - H)$) может еще больше повысить эффективность такого метода разделения классов, но требует дополнительного исследования, которому мы планируем посвятить отдельную работу.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты оптической спектроскопии на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ со спектрографом TDS ($\lambda 3600 - 7500$,

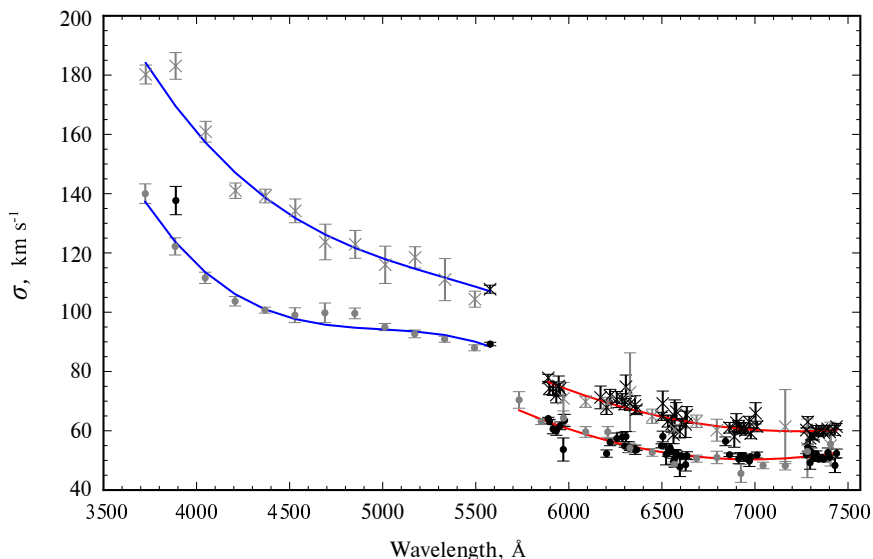


Рис. 3. Ширина инструментального профиля: крестики — при щели шириной $1''.5$, точки — $1''$. Черные символы соответствуют измерениям по эмиссионным линиям неба, серые — по рассеянному солнечному свету. Кривыми показаны аппроксимирующие функции (см. детали в тексте).

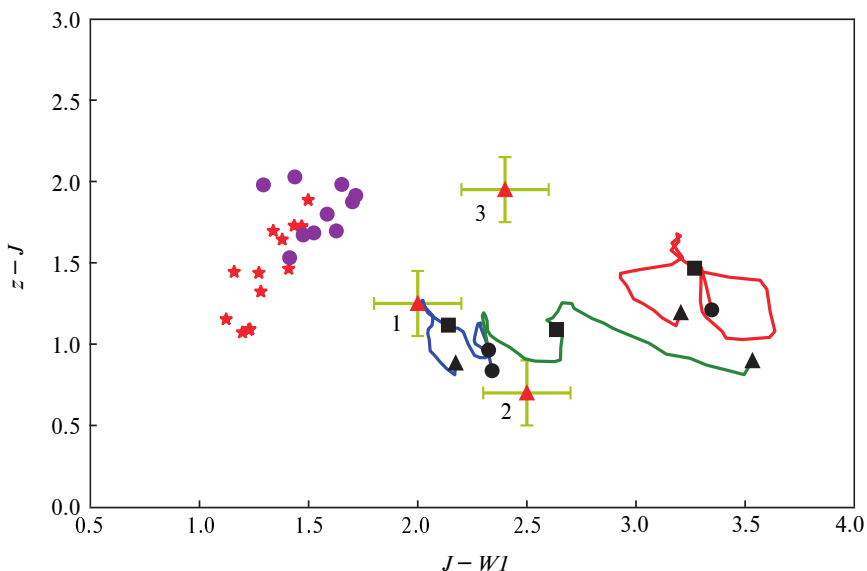


Рис. 4. Двухцветная ИК-диаграмма: красные и коричневые карлики — красные звездочки и фиолетовые кружки соответственно; шаблоны SED квазаров на красных смещениях $z = 2-6$ из библиотеки FAST (<https://github.com/jamesaird/FAST>) — синяя линия, из статьи Vanden Berk et al. (2001) — зеленая линия, из работы Shang et al. (2011) (для радиогромких квазаров) — красная линия; наблюдаемые в КГО ГАИШ МГУ в полосе J квазары: 1 — SRGeJ170245.3+130104, 2 — SRGeJ142952.1+544716 = CFHQS J142952+544717 и 3 — SRGeJ020142.9-01534 (см. таблицу 2; отметим, что последние два квазара являются радиогромкими, см. статьи Medvedev et al. (2020); Khorunzhev et al. (2021)). Треугольные метки на кривых для синтетических цветов квазаров соответствуют $z = 2$, квадратные — $z = 4$, круглые — $z = 6$.

$R \approx 2000$) восьми сильнопеременных рентгеновских источников — кандидатов в ядра активных галактик, обнаруженных в ходе обзоров всего неба телескопом eROSITA космической обсерватории СРГ. По эмиссионным и абсорбционным линиям в спектрах определены красные смещения источников (таблица 1), приведены параметры измеренных

спектральных линий (таблица 3). Отношение интенсивности запрещенных линий к водородным (ВРТ-диаграмма, рис. 2) для четырех кандидатов подтверждает их принадлежность к классу сейфертовских галактик. По причине наличия широких эмиссионных линий в спектре к сейфертовским галактикам также относится J170446.1+432517.

Один источник из исследованных оказался галактическим, со спектром, похожим на спектр катаклизмических переменных.

Также приведены результаты пробной ИК-фотометрии на камере ASTRONIRCAM трех далеких квазаров на красных смещениях $z > 5$ (таблица 2) для проверки возможности разделения по ИК-цветам далеких квазаров и слабых галактических красных и коричневых карликов (рис. 4). Показано, что рассмотренные далекие квазары уверенно отделяются от галактических красных и коричневых карликов на диаграмме « $(z - J) - (J - W1)$ ». Это доказывает перспективность предлагаемого подхода для предварительной классификации кандидатов в далекие рентгеновские квазары по ИК-цветам для дальнейшего детального спектроскопического исследования на крупных телескопах.

Представленные результаты демонстрируют возможности штатных приборов 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ (спектроскопия низкого разрешения на спектрографе TDS и ИК-фотометрия на камере ASTRONIRCAM) для классификации и последующего детального изучения рентгеновских источников, открываемых в ходе обзора всего неба СРГ/eROSITA.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны техническому персоналу КГО ГАИШ МГУ за создание комфортных условий для эффективной работы наблюдателей на телескопах КГО. Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные советы и замечания, сделанные при рецензировании рукописи статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-12-00210. Наблюдения на телескопах КГО ГАИШ МГУ выполнены с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. I. Belvedersky, A. V. Meshcheryakov, P. S. Medvedev, and M. R. Gilfanov, *Astronomy Letters* **48** (2), 109 (2022).
2. I. F. Bikmaev, E. N. Irtuganov, E. A. Nikolaeva, et al., *Astronomy Letters* **46** (10), 645 (2020).
3. I. F. Bikmaev, E. N. Irtuganov, E. A. Nikolaeva, et al., *Astronomy Letters* **47** (5), 277 (2021).
4. N. G. Bochkarev and C. M. Gaskell, *Astronomy Letters* **35** (5), 287 (2009).
5. K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, et al., arXiv e-prints astro/ph:1612.05560 (2016).
6. I. V. Chilingarian, I. Y. Zolotukhin, I. Y. Katkov, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **228** (2), article id. 14 (2017).
7. A. V. Dodin, S. A. Potanin, N. I. Shatsky, et al., *Astronomy Letters* **46** (7), 429 (2020).
8. A. V. Dodin, N. I. Shatsky, A. A. Belinski, et al., *Astronomy Letters* **47** (10), 661 (2021).
9. L. J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, and T. Heckman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372** (3), 961 (2006).
10. G. A. Khorunzhev, S. N. Dodonov, A. V. Meshcheryakov, et al., *Astronomy Letters* **48** (2), 69 (2022a).
11. G. A. Khorunzhev, A. V. Meshcheryakov, R. A. Burenin, et al., *Astronomy Letters* **46** (3), 149 (2020).
12. G. A. Khorunzhev, A. V. Meshcheryakov, P. S. Medvedev, et al., *Astronomy Letters* **47** (3), 123 (2021).
13. G. A. Khorunzhev, S. Y. Sazonov, P. S. Medvedev, et al., *Astronomy Letters* **48** (12), 767 (2022b).
14. J. D. Kirkpatrick, M. C. Cushing, C. R. Gelino, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **197** (2), article id. 19 (2011).
15. W. Kollatschny, M. Zetzl, and M. Dietrich, *Astron. and Astrophys.* **454** (2), 459 (2006).
16. P. Medvedev, S. Sazonov, M. Gilfanov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **497** (2), 1842 (2020).
17. P. S. Medvedev, M. R. Gilfanov, S. Y. Sazonov, et al., *Astronomy Letters* **48**, 735 (2022).
18. I. A. Mereminskiy, A. V. Dodin, A. A. Lutovinov, et al., *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A32 (2022).
19. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 349 (2017).
20. M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, et al., *Astron. and Astrophys.* **650**, id. A42 (2021).
21. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Letters* **46** (12), 836 (2020).
22. P. Predehl, R. Andrikschke, V. Arefiev, et al., *Astron. and Astrophys.* **647**, id. A1 (2021).
23. M. L. Pretorius and C. Knigge, *Astron. and Astrophys.* **461** (3), 1103 (2007).
24. S. Sazonov, M. Gilfanov, P. Medvedev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (3), 3820 (2021).
25. Z. Shang, M. S. Brotherton, B. J. Wills, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **196** (1), article id. 2 (2011).
26. R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al., *Astron. and Astrophys.* **656**, id. A132 (2021).
27. A. M. Tatarnikov and A. A. Tatarnikov, *Moscow University Physics Bulletin* **78** (2) 221 (2023).
28. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, N. Shatsky, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 384 (2023).
29. D. E. Vanden Berk, G. T. Richards, A. Bauer, et al., *Astron. and Astrophys.* **122** (2), 549 (2001).
30. R. Wang, J. Wagg, C. L. Carilli, et al., *Astrophys. J.* **739** (1), article id. L34 (2011).

**Selected Active Galactic Nuclei from SRG/eROSITA Survey:
Optical and IR Observations in 2021 and 2022 with the 2.5-m Telescope
at the Caucasian Mountain Observatory of SAI MSU**

**A. A. Belinski¹, A. V. Dodin¹, S. G. Zheltoukhov¹, K. A. Postnov¹, S. A. Potanin¹, A. M. Tatarnikov¹,
A. N. Tarasenkov¹, N. I. Shatsky¹, P. S. Medvedev², G. A. Khorunzhev², A. V. Meshcheryakov²,
S. Yu. Sazonov², and M. R. Gil'fanov²**

¹ Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

² Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

We report the results of optical spectroscopy of eight highly variable X-ray sources—AGN candidates from all-sky survey of the eROSITA telescope of the Spectrum-Roentgen-Gamma Space Observatory—performed with the TDS spectrograph (3600–7500 Å, $R \approx 2000$) attached to the 2.5-m telescope of the Caucasian Mountain Observatory of Sternberg Astronomical Institute of M. V. Lomonosov Moscow State University. We determined the redshifts of the sources from the emission and absorption lines in their spectra. At least five objects can be classified as Seyfert galaxies. We performed pilot infrared photometry of three distant quasars with $z > 5$ using the ASTRONIRCAM camera and show that on the “ $(z - J) - (J - W1)$ ” diagram the distant quasars studied can be confidently distinguished from Galactic red and brown dwarfs. This result proves the possibility of preliminary classification of distant X-ray quasar candidates by their IR colors for further detailed spectroscopic study on large telescopes.

Keywords: *galaxies: active—X-rays: galaxies*