

## ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КВАЗАРОВ, ОТКРЫТЫХ ТЕЛЕСКОПОМ СРГ/еРОЗИТА, НА 2.5-М ТЕЛЕСКОПЕ КАВКАЗСКОЙ ГОРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ГАИШ МГУ

© 2021 г. А. В. Додин<sup>1\*</sup>, Н. И. Шатский<sup>1</sup>, А. А. Белинский<sup>1</sup>, К. Е. Атапин<sup>1</sup>,  
М. А. Бурлак<sup>1</sup>, С. Г. Желтоухов<sup>1,2</sup>, А. М. Татарников<sup>1</sup>, К. А. Постнов<sup>1,3</sup>,  
А. М. Черепашук<sup>1</sup>, М. И. Бельведерский<sup>4,5</sup>, В. Д. Борисов<sup>4,6</sup>,  
Р. А. Буренин<sup>4</sup>, М. Р. Гильфанов<sup>4,7</sup>, Р. А. Кривонос<sup>4</sup>, П. С. Медведев<sup>4</sup>,  
А. В. Мещеряков<sup>4,3</sup>, С. Ю. Сазонов<sup>4</sup>, Р. А. Сюняев<sup>4,7</sup>, Г. А. Хорунжев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

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

<sup>4</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

<sup>6</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет ВМК, Москва, Россия

<sup>7</sup>Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 06.09.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г.; принята к публикации 06.09.2021 г.

По наблюдениям с Транзиентным двухлучевым спектрографом (TDS) на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ определены красные смещения для 15 новых квазаров, обнаруженных в рентгеновских лучах телескопом еРОЗИТА космической обсерватории СРГ в ходе трех первых обзоров всего неба. Красные смещения источников лежат в диапазоне 0.5–4.156. По ширине эмиссионной линии C IV 1549 Å и потоку в спектральном континууме на длине волны 1350 Å оценены массы центральных сверхмассивных черных дыр и болометрические светимости для 8 квазаров. Для этих объектов получены также оценки отношения рентгеновской светимости к эддингтоновскому пределу на уровне нескольких процентов. В то же время отношение болометрической светимости к эддингтоновской для них оказалось в довольно узком интервале 30–40%. Большое отношение  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  указывает на активный рост массы центральных черных дыр в этих объектах.

DOI: 10.31857/S0320010821100028

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжается успешная работа Российско-германской космической рентгеновской обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (СРГ) (Сюняев и др., 2021). Одной из научных задач миссии является построение функции рентгеновской светимости активных ядер галактик (АЯГ) и квазаров, которая может быть использована для изучения эволюции и роста сверхмассивных центральных черных дыр в их ядрах (Хорунжев и др., 2018; Шен и др., 2020). Для этого требуется определение расстояния до источников, которое

может оцениваться по фотометрическому красному смещению и измеряться спектроскопически. Спектроскопические измерения слабых объектов требуют значительного наблюдательного времени и проводятся на телескопах среднего и крупного класса (см., например, результаты наблюдений на телескопах РТТ-150 (Бикмаев и др., 2020), БТА (Хорунжев и др., 2021) и нашу предыдущую статью (Додин и др., 2020) по результатам спектроскопии ряда квазаров, открытых в наблюдениях СРГ на стадии верификации инструментов обсерватории до начала обзора (PV)).

В настоящей работе представлены результаты спектроскопии новых рентгеновских квазаров, открываемых в ходе обзора всего неба телескопом

\*Электронный адрес: dodin\_nv@mail.ru

**Таблица 1.** Журнал наблюдений выборки далеких квазаров рентгеновским телескопом СРГ/еРОЗИТА

Объект SRGE...	pos.err., угл. сек	offset, угл. сек	eRASS1	eRASS2	eRASS3	exp., сек	det.like
J002706.3–071843	30.5	5.2	2019 Dec 13–14	2020 Jun 11–15	2020 Dec 15–16	357	8.2
J002932.8–041453	7.5	3.7	2019 Dec 15–15	2020 Jun 13–13	2020 Dec 17–17	360	131.6
J005854.8–031505	22.7	14.4	2019 Dec 22–23	2020 Jun 22–23	2020 Dec 24–25	399	19.4
J011346.6+023318	12.1	3.4	2019 Dec 29–30	2020 Jun 28–29	2020 Dec 30–30	382	28.6
J013126.8–100933	5.4	1.2	2019 Dec 28–29	2020 Jun 27–28	2020 Dec 29–30	402	751.4
J095014.4+575130	19.7	3.0	2020 Apr 28–29	2020 Oct 30–31	2021 May 01–02	331	8.8
J104730.0+555439	8.0	5.8	2020 May 06–07	2020 Nov 06–07	2021 May 09–10	340	7.2
J170546.7+653111	11.9	6.9	2019 Dec 09–10	2020 Jun 10–15	2020 Dec 15–15	3311	30.1
J172340.5+635937	8.7	2.9	2020 Jan 04–21	2020 Jul 07–27	2021 Jan 03–16	6077	80.6
J175129.7+423031	11.8	3.6	2020 Mar 27–29	2020 Sep 28–01	2021 Mar 23–26	885	30.0
J211804.8+171726	16.6	2.4	2020 May 14–15	2020 Nov 14–15	2021 May 16–17	268	12.2
J214126.3+181740	19.5	8.5	2020 May 19–20	2020 Nov 19–20	2021 May 20–21	247	11.6
J214305.6+201324	21.2	4.8	2020 May 20–21	2020 Nov 20–21	2021 May 21–22	265	7.3
J222621.2+262740	18.4	2.6	2020 May 30–31	2020 Dec 03–04	2021 Jun 03–04	311	13.5
J224920.7+151732	13.0	4.9	2020 May 30–31	2020 Dec 03–04	2021 Jun 03–04	282	43.9

**Примечание.** pos.err. — радиус области локализации рентгеновского источника на уровне достоверности  $3\sigma$ , offset — расстояние между рентгеновскими и оптическими координатами источника, eRASS1–3 — периоды сканирования источника в 1–3 обзорах всего неба обсерватории СРГ, exp. — суммарная экспозиция по трем обзорам, исправленная за виньентирование в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ, det.like — значимость детектирования источника по совокупности данных трех обзоров неба в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ.

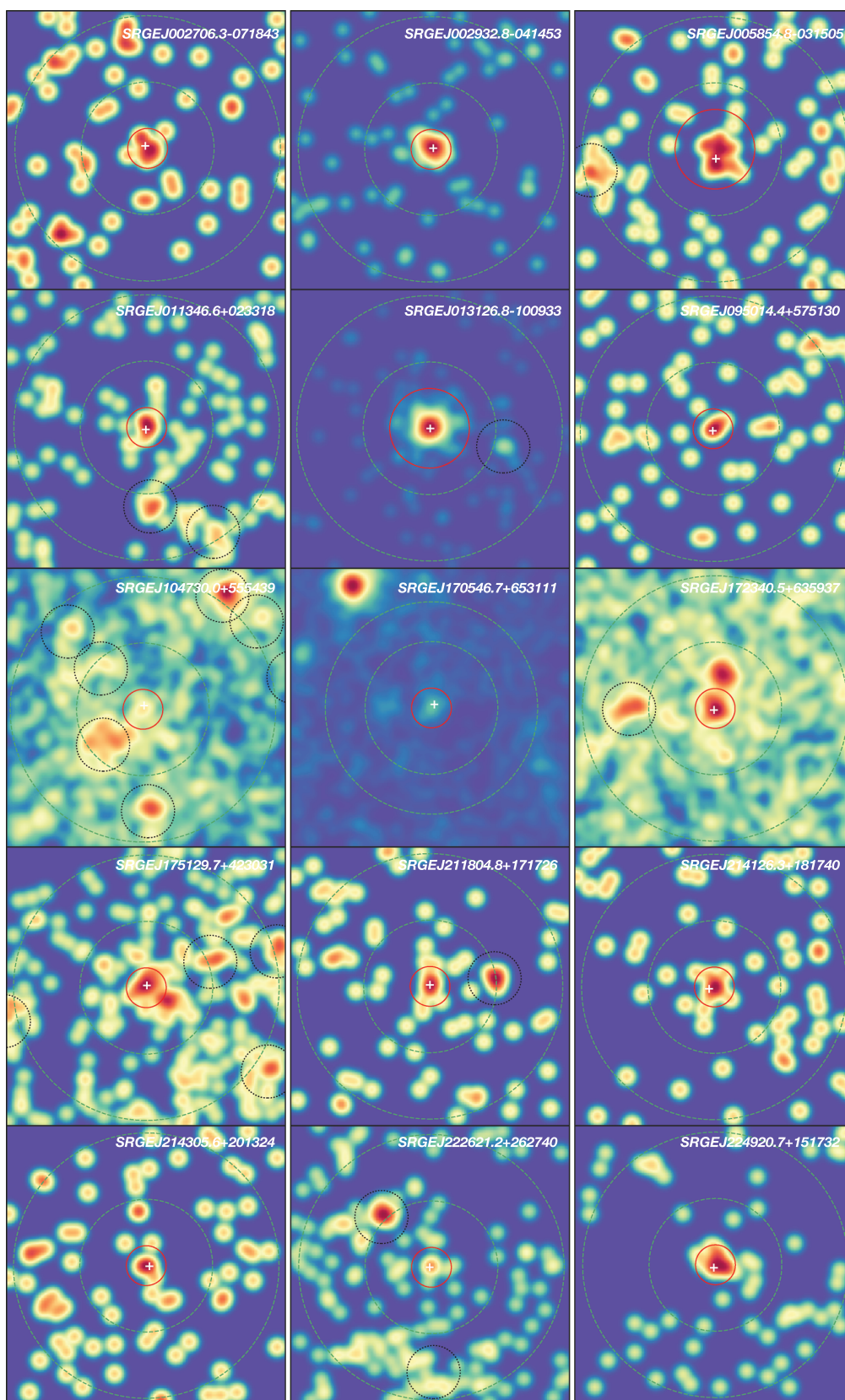
еРОЗИТА (Предел и др., 2021) обсерватории СРГ. Наблюдательные данные получены на спектрографе TDS (Потанин и др., 2020) на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (Корнилов и др., 2014; Шатский и др., 2020) во второй половине 2020 — начале 2021 г., а также во второй половине 2021 г. после модернизации спектрографа TDS, позволившей улучшить эффективность его работы на 10–20% в зависимости от длины волны.

### РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ

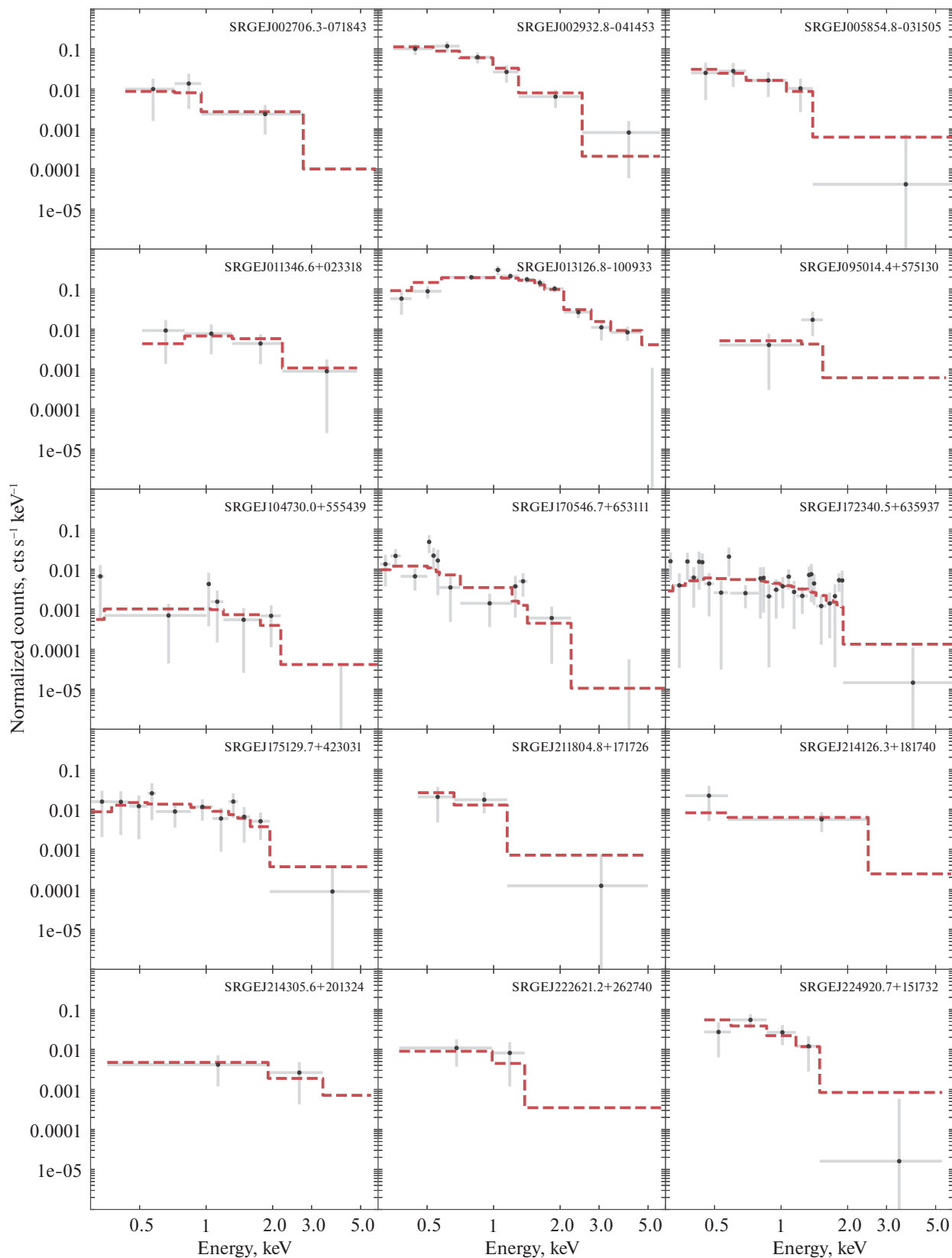
Рентгеновские источники, представленные в данной работе, были открыты в ходе первого

обзора неба телескопом еРОЗИТА космической обсерватории СРГ в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ. К настоящему моменту обсерватория СРГ завершила три полных обзора неба. Интервалы времени сканирования каждого источника, точность их локализации и значимость детектирования представлены в табл. 1.

Первичная обработка данных телескопа еROSITA проводилась с помощью программного обеспечения, разработанного в ИКИ РАН с использованием компонент системы eSASS (Институт внеземной физики Общества им. Макса Планка, Германия). Спектры источников извлекались с использованием круговой апертуры радиусом



**Рис. 1.** Рентгеновские изображения выборки далеких квазаров по данным трех первых обзоров неба телескопа СРГ/еРОЗИТА. ( $7 \times 7$  угл. мин). Изображения сглажены гауссовым фильтром с шириной  $\sigma = 8''$ . Красным кружком показаны регионы, использованные для извлечения спектра источника, зеленым пунктиром — кольцо для оценки спектра фона. Черными пунктирными кружками показаны регионы, маскирующие источники, которые попадают в область извлечения спектров фона. Белым крестиком показано положение источника по оптическим данным.



**Рис. 2.** Рентгеновские спектры выборки квазаров по данным суммы трех обзоров неба телескопом eROSITA обсерватории СРГ. Красной сплошной линией показана модель наилучшей аппроксимации для степенного спектра с поглощением в Галактике.

**Таблица 2.** Характеристики рентгеновских спектров выборки далеких квазаров

Объект SRGE...	$N_{H,gal}$ , $10^{20}$ см $^{-2}$	$F_{0.3-2.2}$ , эрг с $^{-1}$ см $^{-2}$	$\Gamma$	$L_{2-10}$ , эрг с $^{-1}$	cstat/d.o.f
J002706.3–071843	3.7	$2.35^{+1.77}_{-0.68} \times 10^{-14}$	$1.73^{+1.27}_{-1.01}$	$1.02^{+0.74}_{-0.53} \times 10^{45}$	7.2/8
J002932.8–041453	4.4	$1.77^{+0.28}_{-0.23} \times 10^{-13}$	$2.82^{+0.37}_{-0.35}$	$6.64^{+3.75}_{-2.49} \times 10^{43}$	8.8/7
J005854.8–031505	2.9	$4.25^{+1.92}_{-1.13} \times 10^{-14}$	$2.57^{+0.76}_{-0.68}$	$3.48^{+1.27}_{-1.08} \times 10^{45}$	5.0/10
J011346.6+023318	3.3	$2.88^{+2.52}_{-0.67} \times 10^{-14}$	$0.12^{+0.92}_{-0.12}$	$1.02^{+0.54}_{-0.52} \times 10^{45}$	12.2/9
J013126.8–100933	3.8	$5.76^{+0.41}_{-0.36} \times 10^{-13}$	$0.96^{+0.13}_{-0.13}$	$7.76^{+0.56}_{-0.53} \times 10^{46}$	13.2/12
J095014.4+575130	1.1	$1.83^{+31.76}_{-0.64} \times 10^{-14}$	$0.98^{+1.13}_{-0.98}$	$1.99^{+1.29}_{-0.98} \times 10^{45}$	13.2/10
J104730.0+555439	0.6	$4.34^{+2.25}_{-1.51} \times 10^{-15}$	$1.08^{+0.71}_{-0.82}$	$4.37^{+2.01}_{-1.72} \times 10^{44}$	97.0/121
J170546.7+653111	2.8	$1.52^{+0.38}_{-0.25} \times 10^{-14}$	$3.21^{+0.61}_{-0.53}$	$8.01^{+2.46}_{-2.16} \times 10^{44}$	77.6/67
J172340.5+635937	2.8	$1.45^{+0.19}_{-0.19} \times 10^{-14}$	$1.80^{+0.33}_{-0.33}$	$1.44^{+0.23}_{-0.21} \times 10^{45}$	154.9/164
J175129.7+423031	2.7	$3.64^{+1.12}_{-0.60} \times 10^{-14}$	$1.76^{+0.47}_{-0.46}$	$5.62^{+1.35}_{-1.18} \times 10^{45}$	25.9/26
J211804.8+171726	7.5	$3.93^{+3.12}_{-0.96} \times 10^{-14}$	$3.30^{+1.25}_{-0.99}$	$4.13^{+2.00}_{-1.53} \times 10^{45}$	3.1/6
J214126.3+181740	7.7	$3.29^{+1.55}_{-1.20} \times 10^{-14}$	$1.51^{+0.98}_{-1.02}$	$2.86^{+3.71}_{-1.74} \times 10^{44}$	12.1/6
J214305.6+201324	8.0	$2.50^{+1.18}_{-1.16} \times 10^{-14}$	$0.03^{+0.88}_{-0.03}$	$3.41^{+2.06}_{-1.43} \times 10^{45}$	5.7/9
J222621.2+262740	3.4	$2.13^{+2.75}_{-0.70} \times 10^{-14}$	$2.33^{+1.04}_{-1.16}$	$2.10^{+1.48}_{-1.11} \times 10^{45}$	16.2/16
J224920.7+151732	5.0	$8.95^{+3.21}_{-1.94} \times 10^{-14}$	$2.87^{+0.70}_{-0.66}$	$6.46^{+6.62}_{-3.41} \times 10^{43}$	6.2/8

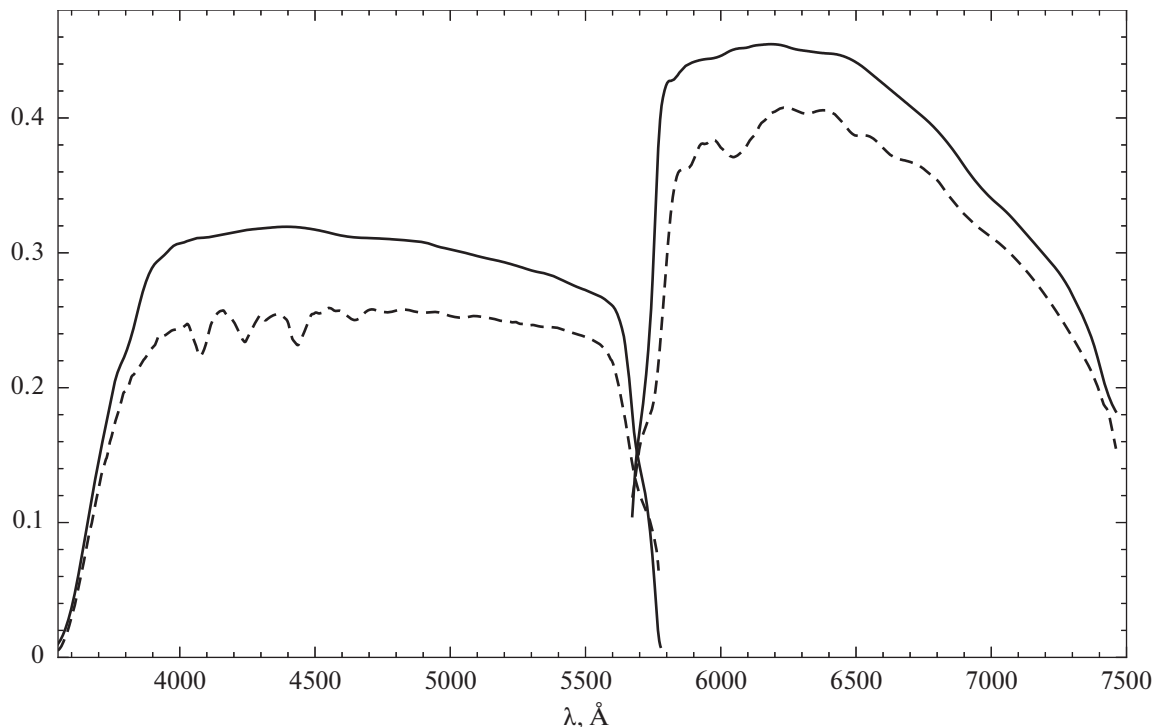
**Примечание.**  $N_{H,gal}$  — Галактическое поглощение в направлении на источник по данным карт HIPI (Коллаборация HIPI, 2016),  $F_{0.3-2.2}$  — измеренный рентгеновский поток (без коррекции на поглощение) в энергетическом диапазоне 0.3–2.2 кэВ,  $\Gamma$  — фотонный индекс степенной модели спектра,  $L_{2-10}$  — рентгеновская светимость в энергетическом диапазоне 2–10 кэВ (в собственной системе отсчета). Характеристики спектров приведены по данным суммы первых трех обзоров неба CPG/eROSITA. Ошибки соответствуют 68% уровню достоверности ( $1\sigma$ ).

30–60 угл. сек. Для оценки спектра фона использовалось кольцо вокруг источника с внутренним и внешним радиусами 100 и 200 угл. сек соответственно. Другие источники, зарегистрированные по сумме трех обзоров и попадающие внутрь области фона, маскировались с помощью круговой апертуры с радиусом 30 угл. сек. Рентгеновские карты фотонов в области локализации источников размером  $7 \times 7$  угл. мин, а также регионы для извлечения спектров источника и фона, показаны на рис. 1.

Аппроксимация полученных спектров выполнялась с помощью стандартных инструментов программного пакета XSPEC (версия 12.11, Арнауд и

др., 1996) с использованием си-статистики (Кэш, 1979), модифицированной для данных с пуассоновским фоном (W-статистика). Энергетические каналы спектров группировались так, чтобы число зарегистрированных отсчетов в каждом соответствующем канале спектра фона было не меньше пяти. Эта процедура проводилась с помощью стандартного инструмента FTGROUPEX в составе ПО HEASoft (v.6.28).

Спектральный анализ проводился в диапазоне энергий 0.3–6 кэВ по совокупности данных трех обзоров неба, так как зарегистрированное число отсчетов в первом обзоре недостаточно для этой цели. Для параметрического описания спектров



**Рис. 3.** Кривая эффективности спектрографа в каналах *B* и *R* с выносом за атмосферу. Сплошная кривая получена с новым делителем каналов, штриховая кривая взята из статьи Потанин и др. (2020) и получена со старым делителем.

использовалась простейшая модель степенного закона с поглощением (`tbabs*pow`), которая обеспечивает достаточно хорошее качество аппроксимации для всех объектов выборки. При этом величина колонковой плотности водорода  $N_{\text{H}}$  была зафиксирована на значении, равном поглощению в Галактике в направлении на источник по данным карт *HI4PI* (Коллаборация *HI4PI*, 2016). Спектры источников и наилучшие модели показаны на рис. 2, а параметры моделей приведены в табл. 2.

Найденные спектральные параметры далее использовались для вычисления внутренней (т.е. исправленной за поглощение межзвездной среды Галактики) рентгеновской светимости квазаров. Рассчитанные значения в диапазоне энергий 2–10 кэВ в системе покоя квазаров представлены в табл. 2. Для расчета использовались следующие космологические параметры:  $H_0 = 70$  км/с и  $\Omega_M = 0.3$ .

## ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Отбор кандидатов для спектроскопических наблюдений на КГО ГАИШ проводился с использованием оценок фотометрических красных смещений по программе *SRGz* (Мещеряков и др., 2018).

Наблюдения отобранных объектов были выполнены на двухлучевом спектрографе *TDS*

(*Transient Double-beam Spectrograph*)<sup>1</sup>, установленном на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Регистрация спектра производилась в диапазоне 3600–7500 Å с разрешающей силой 1300–2500 при ширине щели 1". Подробное описание прибора изложено в статье Потанина и др. (2020). С момента публикации (точнее, 18 мая 2021 г.) в спектрограф были внесены некоторые технические усовершенствования:

- дихроичный делитель каналов был заменен на новый, рассчитанный и произведенный компанией *Asahi Spectra*<sup>2</sup> специально для спектрографа *TDS*;
- добавлена щель шириной 1.5";
- выполнены чистка и переюстировка оптики спектрографа;
- сокращено время экспозиций калибровочного источника путем замены оптического волокна.

<sup>1</sup><http://lnfm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/tds>

<sup>2</sup><https://www.asahi-spectra.co.jp/>,  
<https://www.asahi-spectra.com/>

Таблица 3. Оптические свойства объектов и журнал наблюдений

Источник SRGE...	$\alpha, ^{\text{h}} \text{ m s}$	$\delta, ^{\circ} ' ''$	JD 245...	$g_{PSF}$	$r_{PSF}$	$i_{PSF}$	$z$
J002706.3–071843	00 27 06.6	–07 18 35.0	9440.5	19.55	19.32	18.78	$2.293 \pm 0.010$
J002932.8–041453	00 29 32.6	–04 14 48.0	9198.2	19.15	19.08	18.81	$0.514 \pm 0.002$
J005854.8–031505	00 58 54.6	–03 15 02.0	9086.5	20.72	20.16	19.92	$3.318 \pm 0.011$
J011346.6+023318	01 13 46.8	+02 33 21.4	9080.5	21.26	20.84	20.73	$1.269 \pm 0.001$
J013126.8–100933	01 31 26.7	–10 09 31.0	9463.5	21.81	20.75	20.56	$3.86 \pm 0.02$
J095014.4+575130	09 50 14.6	+57 51 26.0	9195.5	21.98	20.96	20.42	$3.520 \pm 0.013$
J104730.0+555439	10 47 29.8	+55 54 44.6	9139.5	21.50	20.86	20.58	$3.399 \pm 0.013$
J170546.7+653111	17 05 45.9	+65 31 16.0	9050.5	20.99	20.45	20.23	$3.054 \pm 0.005$
J172340.5+635937	17 23 39.8	+63 59 38.0	9069.3	21.84	21.11	20.88	$3.403 \pm 0.003$
J175129.7+423031	17 51 30.1	+42 30 31.0	9103.3	21.77	20.12	19.88	$4.156 \pm 0.015$
J211804.8+171726	21 18 04.7	+17 17 28.0	9087.5	21.86	20.94	20.77	$3.415 \pm 0.001$
J214126.3+181740	21 41 26.9	+18 17 42.0	9140.2	20.18	20.22	20.74	$1.000 \pm 0.001$
J214305.6+201324	21 43 05.4	+20 13 27.0	9104.4	22.08	20.66	20.37	$3.958 \pm 0.005$
J222621.2+262740	22 26 21.3	+26 27 40.0	9082.4	21.44	20.68	20.44	$3.457 \pm 0.008$
J224920.7+151732	22 49 21.0	+15 17 31.0	9084.4	20.07	19.95	19.80	$0.658 \pm 0.003$

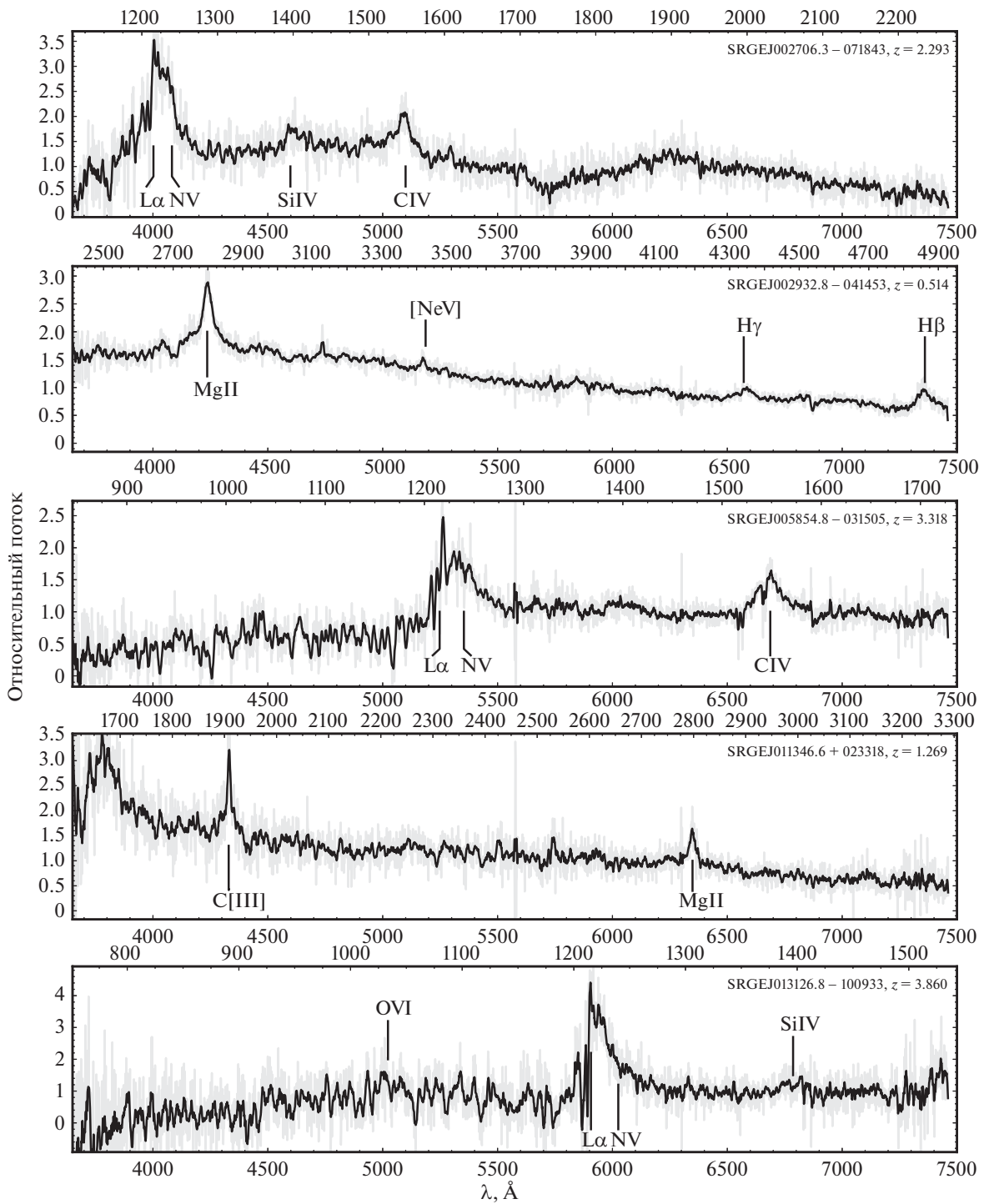
**Примечание.** JD — юлианская дата середины наблюдений. Видимые звездные величины из каталога SDSS в фильтрах  $g$ ,  $r$ ,  $i$  приведены в столбцах  $g_{PSF}$ ,  $r_{PSF}$ ,  $i_{PSF}$ .

Новый делитель на подложке из плавленого кварца рассчитан под рабочий угол падения  $35^{\circ}$  и характеризуется существенно более ровной кривой пропускания. Это позволяет точнее восстанавливать ее форму в области короче  $4500 \text{ \AA}$ , что особенно важно для источников с линиями водородной серии Бальмера. Хотя лабораторные данные дихроиков не показывают существенной разницы в средних коэффициентах пропускания и отражения на рабочих длинах волн, по результатам калибровки по спектрофотометрическим стандартам выведено общее итоговое увеличение эффективности всего тракта за вычетом атмосферы, составляющее от 10% на длинах волн  $7000 \text{ \AA}$  до 20% на  $4000 \text{ \AA}$  (рис. 3).

Яркость спектра калибровочных ламп увеличена в несколько раз путем замены оптического

волокна  $800 \text{ мкм}$  на пучок волокон  $7 \times 1000 \text{ мкм}$ , что особенно важно в коротковолновом канале, где рабочие экспозиции калибровки по лампе с линейчатым спектром теперь не превышают  $100 \text{ с}$ .

Спектральные наблюдения рентгеновских источников — кандидатов в далекие квазары из обзора SRG проводились в темные ночи с июля 2020 по январь 2021 г. Несколько объектов дополнительно наблюдались в июле 2021 г. Ориентация щели устанавливалась по снимку с камерой широкого поля 2.5-м телескопа так, чтобы, помимо объекта, в щель попадала относительно яркая звезда из ближайшей окрестности. При переходе системы в спектральный режим, положение щели контролировалось по этой звезде, так как сам объект не виден в камеру подсмотра спектрографа, а затем поддерживалось автогидирующим устройством телескопа. Непосредственно после измерений каж-



**Рис. 4.** Спектры исследуемых квазаров. На нижней оси показаны наблюдаемые длины волн. Верхняя ось соответствует длинам волн в системе отсчета источника. Серая линия — оригинальные наблюдения. Сплошная черная линия — наблюдения, сглаженные скользящим средним.

ного объекта выполнялись калибровочные измерения звезды-стандарта из списка ЕЮО<sup>3</sup>.

Методы обработки спектров аналогичны опи-

санным в Потанин и др. (2020) и в нашей предыдущей работе (Додин и др., 2020). Основное отличие в обработке наблюдений новых источников заключается в использовании алгоритма оптимальной экстракции (Хорн, 1986), который позволяет в отдельных случаях увеличить отношение сигнала

<sup>3</sup><https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>



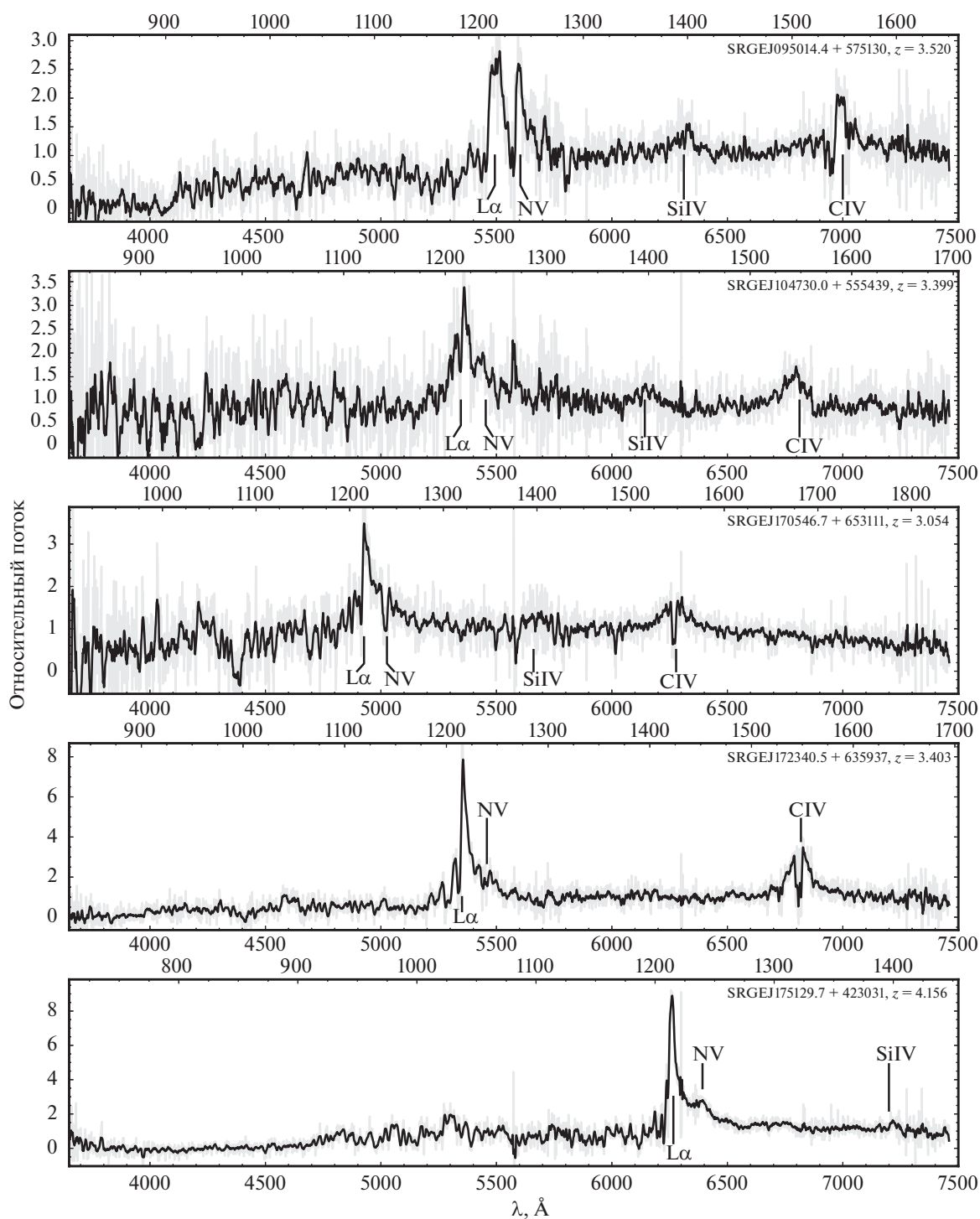


Рис. 4. Продолжение.

к шуму и очистить спектр от следов космических лучей. Однако стандартный алгоритм может приводить к ложному детектированию выбросов, когда статистический шум спектра оказывается значительно меньше, чем отклонения реального пространственного профиля от восстановленного.

Это может приводить к уменьшению отношения сигнала к шуму (SNR) на спектрах с высоким SNR. Для устранения этого эффекта мы отмечали пиксел как “плохой”, не только когда значение в нем отличалось от уровня шума больше чем заданный уровень ( $3-5\sigma$ ), но и когда вклад этого пиксела

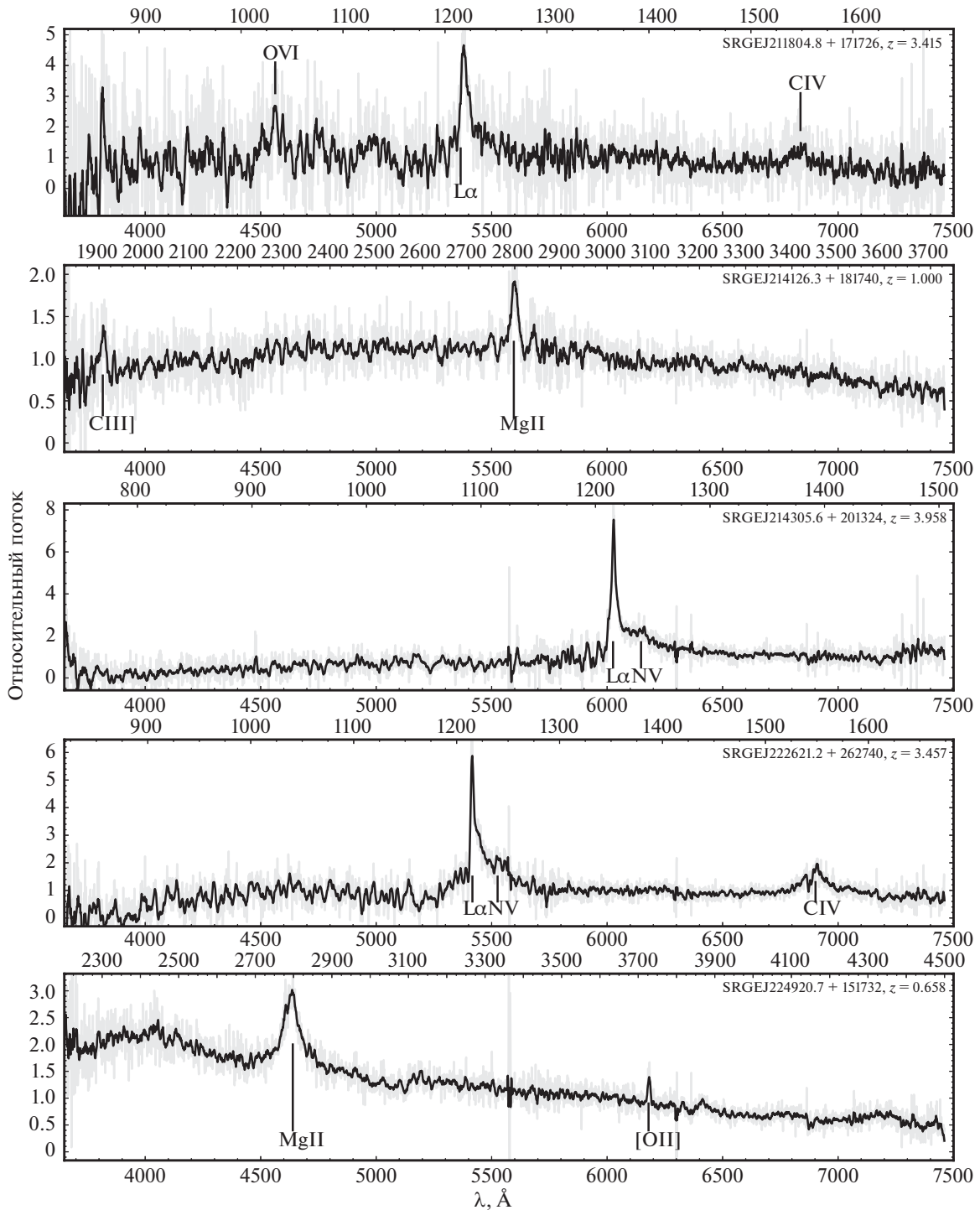


Рис. 4. Окончание.

в суммарный спектр будет превышать заданный порог (1–2%). Количество и положение плохих пикселей контролируется визуально в графической среде обработки. Такая регуляризация существенно снижает итоговую долю ложно детектированных

выбросов и не ухудшает SNR в сравнении со стандартной экстракцией.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Узкая щель, с которой были получены спектры, не позволяет провести абсолютную калибровку по

потоку, поэтому мы приводим спектры в относительных единицах. Кроме того, поскольку в общем случае щель ориентирована не вертикально (ее ориентация зависит от расположения опорной звезды и объекта), влияние атмосферной дисперсии может приводить к усилению зависимости потерь на щели от длины волны и тем самым искажать общее распределение энергии в спектре. Однако эти эффекты не влияют ни на положение, ни на форму спектральных линий, которые мы будем анализировать в этой работе.

Спектры объектов, которые удалось классифицировать как квазары и определить красное смещение, показаны на рис. 4. Для лучшего визуального восприятия спектра оригинальные данные (серая кривая) были сглажены скользящим средним по 10 точкам (черная кривая). Для измерения красного смещения  $z$  мы использовали линии, отмеченные на рис. 4. Поскольку часто линии имеют сложную форму, мы визуально оценивали центральную длину волны линии и ее ошибку, которые конвертировались в красное смещение  $z_i$  с соответствующей ошибкой  $\delta z_i$ . В качестве центральной лабораторной длины волны сливающихся многокомпонентных линий брались усредненные с весами  $gf$  длины волн каждой компоненты, что оправдано в случае оптически тонких линий. Для вычисления  $z_i$  наблюдаемые и лабораторные длины волн приводились к значениям в вакууме.

Итоговое красное смещение и его разброс приведены в табл. 3 и определялись как средневзвешенное по всем линиям:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i},$$

$$\sigma_z = t(n) \sqrt{\frac{n}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n w_i (z_i - z)^2}{\sum_{i=1}^n w_i}},$$

где  $w_i = \delta z_i^{-2}$ , а  $t(n)$  — коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0.68,  $n$  — число линий. Наименьшую  $\delta z_i$  имеют узкие линии, правильной формы, которые будут иметь наибольший вес в усреднении.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Красное смещение  $z = 3.86 \pm 0.02$  наиболее яркого рентгеновского источника SRGEJ013126.8-100933 определено по бленде  $L\alpha + N V$ , наблюдаемой на  $\lambda \sim 5900 \text{ \AA}$  и имеющей типичную для квазаров форму. Невысокая точность определения красного смещения связана с большой шириной и сложной формой профиля  $L\alpha$ , которые не позволяют однозначно определить центр линии. В спектре имеется намек на линии O VI 1035  $\text{\AA}$  и

Si IV 1397, что подтверждает правильность нашей интерпретации спектра. К сожалению, линия C IV оказалась за границей диапазона спектрографа. Заметим, что альтернативные интерпретации особенности  $\lambda \sim 5900 \text{ \AA}$ , например, как линии C IV или Mg II, вступают в противоречие с наблюдениями из-за отсутствия на своих местах линий, которые обычно имеют большую или сравнимую яркость. Этот источник уже изучался в статье (Маркотулли и др., 2020), и найденное там по фотометрическим данным красное смещение  $z = 3.5$  также согласуется с нашей интерпретацией спектра.

Аналогичным образом обосновывается однозначность интерпретации спектра SRGEJ214305.6+201324 ( $z = 3.96$ ).

Объект SRGEJ002706.3-071843 находится вблизи яркой звезды, ореол которой накладывается на спектр объекта и затрудняет его экстракцию, особенно в красной области. Мы подозреваем, что вариации наклона континуума длинее  $5500 \text{ \AA}$  связаны с неидеальностью вычитания фона. Спектр этого объекта был получен дважды, первое наблюдение 2 января 2021 г. (JD=2459217) показало, что линия C IV имеет поток, примерно равный потоку в соседней линии Si IV, и едва выделяется на фоне шумов. Для подтверждения нашей идентификации линий 13 августа 2021 г. был получен второй спектр (показан на рис. 4), в котором линия C IV легко детектируется и в 1.5–2 раза ярче, чем Si IV, что свидетельствует о наличии спектральной переменности. Дополнительно отметим, что между моментами получения первого и второго спектра была проведена модернизация TDS (см. выше в разделе “Оптические наблюдения”), которая увеличила его эффективность. В обоих случаях объект наблюдался на высоте  $\sim 35^\circ$  с суммарным временем накопления 1 ч, медианное значение отношения сигнала к шуму в пикселе оказалось равным 4 и 5 соответственно. Увеличение сигнала к шуму на 25 процентов хорошо согласуется с увеличением пропускания прибора в  $k \lesssim 1.15 \times 1.5$  раза ( $\text{SNR} \sim k^{1/2} \lesssim 1.3$ ) после его модернизации: 15% за счет чистки и юстировки оптики и до 50% за счет более широкой щели.

## ОЦЕНКА МАСС СМЧД И СВЕТИМОСТЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ЛИНИИ C IV

Эмиссионная линия C IV (1549  $\text{\AA}$ ) попадает в доступный для наблюдений спектральный диапазон при красных смещениях  $z = 1.4\text{--}3.7$ . В этот диапазон попадают восемь объектов нашей выборки, что дает возможность оценить для них массы черных дыр по ширине линии C IV (Парк и др., 2013) аналогично тому, как мы делали это в первой статье (Додин и др., 2020). Для оценки потока от

**Таблица 4.** Массы и светимости рентгеновских квазаров с  $z = 1.4\text{--}3.7$ 

Источник SRGE...	$z$	$\text{FWHM}_{\text{CIV}}$ , км/с	$1350F_{1350}$ , эрг/с/см <sup>2</sup>	$1350L_{1350}$ , эрг/с	$\lg \frac{M_{\text{ЧД}}}{M_{\odot}}$	$L_{\text{Edd}}$ , эрг/с
J002706.3–071843	2.293	$5800 \pm 340$	$3.36 \times 10^{-13}$	$1.4 \times 10^{46}$	$9.0 \pm 0.5$	$1.3 \times 10^{47}$
J005854.8–031505	3.318	$6060 \pm 190$	$1.45 \times 10^{-13}$	$1.4 \times 10^{46}$	$9.0 \pm 0.5$	$1.4 \times 10^{47}$
J095014.4+575130	3.520	$3950 \pm 280$	$7.27 \times 10^{-14}$	$8.2 \times 10^{45}$	$8.8 \pm 0.4$	$8.1 \times 10^{46}$
J104730.0+555439	3.399	$5210 \pm 400$	$7.76 \times 10^{-14}$	$8.1 \times 10^{45}$	$8.9 \pm 0.5$	$9.4 \times 10^{46}$
J170546.7+653111	3.054	$7040 \pm 410$	$1.04 \times 10^{-13}$	$8.4 \times 10^{45}$	$9.0 \pm 0.5$	$1.1 \times 10^{47}$
J172340.5+635937	3.403	$5090 \pm 160$	$6.17 \times 10^{-14}$	$6.4 \times 10^{45}$	$8.8 \pm 0.5$	$8.3 \times 10^{46}$
J211804.8+171726	3.415	$3970 \pm 740$	$7.23 \times 10^{-14}$	$7.6 \times 10^{45}$	$8.8 \pm 0.4$	$7.8 \times 10^{46}$
J222621.2+262740	3.457	$4510 \pm 160$	$9.28 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{46}$	$8.9 \pm 0.4$	$9.7 \times 10^{46}$

квазаров на длине волны  $\sim 1350 \text{ \AA}$  мы использовали *gr*-фотометрию из табл. 3. Для расчета фотометрического расстояния по красному смещению мы использовали космологический калькулятор (Райт, 2006) для параметров  $H_0 = 70 \text{ км/с/Мпк}$ ,  $\Omega_M = 0.3$  и  $\Omega_{\text{vac}} = 0.7$ . Полученные величины  $\lambda L_{\lambda}$  и  $\text{FWHM}_{\text{CIV}}$  собраны в табл. 4.

Калибровка масс СМЧД по ширине линии C IV и монохроматической светимости в континууме  $L_{1350}$  взята из работы Парк и др. (2013):

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

где  $\alpha = 7.48 \pm 0.24$ ,  $\beta = 0.52 \pm 0.09$  и  $\gamma = 0.56 \pm 0.48$ . Полученные оценки масс СМЧД для всех объектов имеют близкие значения (около  $10^9 M_{\odot}$ ) и собраны в табл. 4.

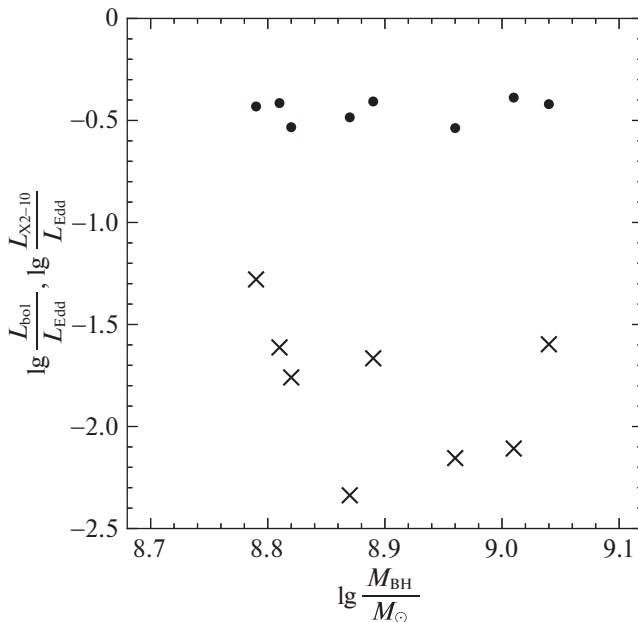
Близость полученных оценок масс центральных СМЧД в изученных квазарах, по-видимому, связана с эффектами селекции: в таблицу попадают объекты из небольшого интервала красных смещений  $z$  и примерно одинаковой звездной величины, что дает примерно одинаковые значения монохроматической светимости. Однако эффект селекции должен отсутствовать для ширины линии. Можно было бы ожидать, что в некоторых случаях линия C IV не детектируется, поскольку сливается с континуумом из-за своей большой ширины. Тем не менее во всех случаях мы детектировали линию C IV, если она попадала в спектральный диапазон

3600–7500  $\text{ \AA}$ , т.е. в нашей выборке отсутствуют объекты с экстремально большими ширинами. Проблем для детектирования узких линий также нет. Наши измерения показывают, что  $\text{FWHM}$  линии C IV заключена в интервале 4000–7000 км/с, т.е. изменяется от объекта к объекту менее чем в два раза. Точность же оценки масс СМЧД по формуле (1) определяется не качеством наблюдений, а неопределенностью коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

Полученные оценки масс СМЧД позволяют рассчитать эддингтоновские светимости объектов,  $L_{\text{Edd}} \approx 1.26 \times 10^{38} (M_{\text{ЧД}}/M_{\odot})$  эрг/с, и отношение наблюдаемой рентгеновской светимости (2–10 кэВ) к эддингтоновской  $L_{\text{X}2-10}/L_{\text{Edd}}$  (см. крестики на рис. 5). Во всех случаях последнее отношение не превышает нескольких процентов, хотя надежность этих оценок может быть невысока из-за оценочного характера формулы (1). Аналогично нашей предыдущей работе, используя калибровку  $L_{\text{bol}} \approx 3.81 \times 1350L_{1350}$  из работы Дай и др. (2014), мы можем оценить болометрическую светимость  $L_{\text{bol}}$ . Отношение  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  представлено точками на рис. 5, из которого видно, что все значения сосредоточены в узком диапазоне от  $\sim 30$  до  $\sim 40\%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены новые результаты спектроскопических измерений красных смещений некоторых рентгеновских квазаров из первых трех обзоров всего неба телескопа eROSITA обсерватории СРГ (табл. 1). Объекты были отобраны



**Рис. 5.** Отношения  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  (точки) и  $L_{X2-10}/L_{\text{Edd}}$  (крестики) как функция массы центральной черной дыры. Ошибки по обеим координатам составляют  $\sim 0.5$  dex и связаны с неточностью используемых калибровок  $L_{\text{bol}}(L_{1350})$ ,  $M_{\text{BH}}(L_{1350}, \text{FWHM}_{\text{CIV}})$ .

для получения спектроскопии на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с помощью двухлучевого спектрографа TDS. Наблюдения проводились во второй половине 2020 г., а также летом 2021 г. В мае 2021 г. в спектрографе TDS был заменен дихроичный делитель света, позволивший сгладить кривую эффективности спектрографа. Это и другие технические меры позволили увеличить эффективность спектрографа TDS в красном и синем каналах на  $\sim 15\%$  (в зависимости от длины волны, рис. 3). Разрешение TDS является избыточным для определения красных смещений квазаров, поэтому для уменьшения потерь света на щели была добавлена щель шириной  $1''.5$ , которую впоследствии планируется заменить на щель  $2''$ .

Измеренные спектроскопические красные смещения выбранных квазаров соответствуют фотометрическим красным смещениям, оцененным по программе SRGz (Мещеряков и др., 2018). Измеренные рентгеновские светимости 2–10 кэВ лежат в широких пределах от  $\sim 7 \times 10^{43}$  до  $\sim 8 \times 10^{46}$  эрг/с (табл. 2). Для подвыборки из восьми квазаров массы черных дыр выведенные по ширине линии C IV имеют близкие значения  $\sim 10^9 M_{\odot}$ , что в совокупности с большим разбросом в рентгеновской светимости  $L_{X2-10}$  приводит к большому разбросу отношения  $L_{X2-10}/L_{\text{Edd}}$ : от 0.5 до 5%. В

то же время отношение болометрической светимости к эддингтоновской заключено в довольно узком интервале 30–40%. Высокое отношение  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  говорит об активном росте черных дыр в этих объектах.

На 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ планируется продолжить спектроскопию рентгеновских источников — кандидатов в далекие квазары для измерения их красных смещений.

Данное 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.

Поиск кандидатов в далекие квазары в рентгеновском обзоре всего неба орбитальной обсерватории СРГ и анализ представленных в статье данных телескопа СРГ/ePOZITA проводились при поддержке гранта РФФ 21-12-00343. Модернизация спектрографа TDS 2.5-м телескопа КГО осуществлена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука”, грант номер 075-15-2020-778. Наблюдения на КГО ГАИШ поддержаны ведущей Научно-образовательной школой МГУ “Фундаментальные и прикладные космические исследования”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнауд и др. (K.A. Arnaud), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **101**, 17 (1996).
2. Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 689 (2020) [I.F. Bikmaev, E.N. Irtuganov, E.A. Nikolaeva, N.A. Sakhibullin, R.I. Gumerov, A.S. Sklyanov, et al., *Astron. Lett.* **46**, 645 (2020)].

3. Дай и др. (Y.S. Dai, M. Elvis, J. Bergeron, G.G. Fazio, J.-S. Huang, B.J. Wilkes, et al.), *Astrophys. J.* **791**, 113 (2014).
4. Додин А.В., Потанин С.А., Шатский Н.И. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 459 (2020) [A.V. Dodin, S.A. Potanin, N.I. Shatsky, A.A. Belinski, K.E. Atapin, M.A. Burlak, et al., *Astron. Lett.* **46**, 429 (2020)].
5. Коллаборация HI4PI (HI4PI Collaboration, N. Ben Bekhti, L. Flöer, R. Keller, J. Kerp, D. Lenz, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A116 (2016).
6. Корнилов и др. (V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, N. Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126**, 482 (2014).
7. Кэш (W. Cash), *Astrophys. J.* **228**, 939 (1979).
8. Маркотулли и др. (L. Marcotulli, V. Paliya, M. Ajello, A. Kaur, S. Marchesi, M. Rajagopal, et al.), *Astrophys. J.* **889**, 164 (2020).
9. Мещеряков А.В., Глазкова В.В., Герасимов С.В., Машечкин И.В., Письма в Астрон. журн. **44**, 801 (2018) [A.V. Meshcheryakov, V.V. Glazkova, S.V. Gerasimov, and I.V. Mashechkin, *Astron. Lett.* **44**, 735 (2018)].
10. Парк и др. (D. Park, J.-H. Woo, K.D. Denney, and J. Shin), *Astrophys. J.* **770**, 87 (2013).
11. Потанин С.А., Белинский А.А., Додин А.В. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 894 (2020) [S.A. Potanin, A.A. Belinski, A.V. Dodin, S.G. Zheltoukhov, V.Y. Lander, K.A. Postnov, et al.), *Astron. Lett.* **46**, 836 (2020)].
12. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
13. Райт (E.L. Wright), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 1711 (2006).
14. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), arXiv:2104.13267 (2021).
15. Хорн (K. Horne), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **98**, 609 (1986).
16. Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **44**, 546 (2018) [G.A. Khorunzhev, S.Y. Sazonov, and R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **44**, 500 (2018)].
17. Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Медведев П.С. и др., Письма в Астрон. журн. **47**, 155 (2021) [G.A. Khorunzhev, A.V. Meshcheryakov, P.S. Medvedev, V.D. Borisov, R.A. Burenin, R.A. Krivonos, et al., *Astron. Lett.* **47**, 123 (2021)].
18. Шатский и др. (N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Kornilov, K. Postnov, et al.), *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century* (Ed. I.I. Romanyuk, I.A. Yakunin, A.F. Valeev, D.O. Kudryavtsev), p. 127–132 (2020).
19. Шен и др. (X. Shen, P.F. Hopkins, C.-A. Faucher-Giguère, D.M. Alexander, G.T. Richards, N.P. Ross, et al.), *MNRAS* **495**, 3252 (2020).