# ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ОБЪЕКТОВ СРГ-еРОЗИТА НА 2.5-м ТЕЛЕСКОПЕ КАВКАЗСКОЙ ГОРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ГАИШ МГУ

© 2020 г. А. В. Додин<sup>1\*</sup>, С. А. Потанин<sup>1,2</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>, О. В. Егоров<sup>1</sup>, А. М. Татарников<sup>1</sup>, К. А. Постнов<sup>1,2,3</sup>, М. И. Бельведерский<sup>4,5</sup>, Р. А. Буренин<sup>4</sup>, М. Р. Гильфанов<sup>4,6</sup>, П. С. Медведев<sup>4</sup>, А. В. Мещеряков<sup>4,3</sup>, С. Ю. Сазонов<sup>4</sup>, Г. А. Хорунжев<sup>4</sup>, Р. А. Сюняев<sup>4,6</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия <sup>2</sup>Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 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> Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия
 Поступила в редакцию 08.06.2020 г.
 После доработки 16.06.2020 г.; принята к публикации 25.06.2020 г.

По наблюдениям с новым Транзиентным двухлучевым спектрографом (TDS) на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ определен тип и найдено красное смещение для 6 новых рентгеновских источников (4 квазара и 2 скопления галактик), обнаруженных космической обсерваторией СРГ во время наблюдений Дыры Локмана на фазе проверочных наблюдений телескопа ePO3ИТА. Показано, что TDS позволяет получать спектры объектов  $\sim\!20^m$  за 2 ч наблюдений с отношением сигнал к шуму выше 5 и разрешением  $R\sim\!1500$ . Типы и красные смещения объектов, определенные по спектральным наблюдениям, хорошо согласуются с предсказаниями по фотометрическим данным с помощью автоматической системы классификации SRGz.

*Ключевые слова:* активные ядра галактик, скопления галактик, рентгеновские обзоры, спектроскопия, СРГ, Спектр-РГ, еРОЗИТА.

DOI: 10.31857/S0320010820070049

## ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская обсерватория СРГ (Сюняев и др., 2020), запущенная 13 июля 2019 г., успешно работает на орбите вокруг точки Лагранжа L2 системы Земля—Солнце. Основная цель обсерватории — обзор всего неба в широком диапазоне энергий 0.2—30 кэВ продолжительностью 4 года. В ходе обзора предполагается открыть около трех миллионов активных ядер галактик (АЯГ), в том числе далеких квазаров (Колодзиг и др., 2013а,b), около ста тысяч скоплений и групп галактик, а также сотни тысяч рентгеновских источников различной природы в нашей Галактике. Ожидается, что чувствительность обзора неба обсерватории СРГ

будет примерно в 25 раз выше в мягком рентгеновском диапазоне (0.5—2 кэВ), чем у предыдущего обзора всего неба спутника ROSAT, который был проведен в начале 90-х годов XX века. Полученные рентгеновские данные помогут решить ряд важнейших задач современной астрофизики и космологии. Среди них — измерение космологических параметров и восстановление истории роста сверхмассивных черных дыр (СМЧД) во Вселенной.

Во время перелета обсерватории СРГ в точку Лагранжа L2 была проведена серия калибровочных и проверочных наблюдений (Calibration and Performance Verification Phase, Cal/PV-фаза) телескопов АРТ-ХС (Павлинский и др., 2020) и еРОЗИТА (Предэль и др., 2020), в ходе которой проверялось функционирование научной аппара-

<sup>\*</sup>Электронный адрес: dodin\_nv@mail.ru

туры в различных режимах, уточнялись характеристики телескопов и проводилась отладка математического обеспечения обработки данных. Для проверочных наблюдений были отобраны мишени и участки на небе, представляющие самостоятельный научный интерес. После завершения Cal/PVфазы 8 декабря 2019 г. обсерватория СРГ начала работать в режиме обзора всего неба.

В рамках российской программы PV-фазы телескопа еРОЗИТА 12-14 ноября 2019 г. был проведен глубокий обзор участка неба площадью 18.5 кв. град вокруг Дыры Локмана (Lockman Hole, LH). В этой области лучевая концентрация межзвездного газа и пыли в Галактике минимальна  $(N_H \sim 5 \times 10^{19}~{
m cm}^{-2})$ , что позволяет находить максимальное количество внегалактических объектов (скоплений галактик и квазаров) в мягком рентгеновском диапазоне энергий. В ходе обзора за время экспозиции 180 000 с была достигнута чувствительность  $\sim 4 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в диапазоне энергий 0.5-2 кэВ. Этот обзор стал самым большим по площади рентгеновским обзором области Дыры Локмана, причем все полученные данные принадлежат российским ученым.

Несколько кандидатов в квазары и скопления галактик, обнаруженных в рентгеновском обзоре Дыры Локмана, было решено пронаблюдать на новом 2.5-м телескопе ГАИШ МГУ, чтобы точно установить природу объектов и убедиться в эффективности нового телескопа для решения задач наземной оптической поддержки обзора СРГ. В данной статье представлены результаты спектроскопических наблюдений рентгеновских источников из обзора Дыры Локмана обсерватории СРГ на новом спектрографе 2.5-м телескопа ГАИШ МГУ.

## РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ И ОТБОР ОПТИЧЕСКИХ КАНДИДАТОВ

С помощью обсерватории СРГ в режиме растрового сканирования были проведены наблюдения площадки  $5^{\circ} \times 3.7^{\circ}$  с центром в  $\alpha = 10^{\rm h}35'$  и  $\delta = +57^{\circ}38'$ . Среднее время экспозиции составило около 8 ксек, что позволило достигнуть средней глубины около  $4 \times 10^{-15}$  эрг/с/см² в диапазоне 0.5-2 кэВ. Регистрация источников проводилась с помощью программного обеспечения обработки данных рентгеновского телескопа еРОЗИТА. Всего было обнаружено более 8000 рентгеновских источников.

На первом этапе была проведена кросскорреляция в радиусе 30" всех рентгеновских точечных источников СРГ/еРОЗИТА из обзора Дыры Локмана с каталогом оптических источников SDSS DR14 (Аболфати и др., 2018), для которых

имеются также данные принудительной фотометрии в инфракрасном диапазоне обзора WISE (Лэнг и др., 2016). Выбранный радиус 30" на порядок превышает характерную ошибку локализации источников еРОЗИТЫ в поле Дыры Локмана. что гарантирует попадание оптического партнера в область поиска. Полученный фотометрический каталог возможных оптических партнеров рентгеновских источников был обработан системой SRGz версии 1.8, которая оперирует в области покрытия фотометрического обзора SDSS и в автоматическом режиме анализирует совместные данные широкополосной фотометрии  $(X_{
m ph})$  из трех крупнейших оптических обзоров — SDSS (фильтры u, g, r, i, z), DESI Legacy Imaging Survey DR8 ( $g_{LS}$ ,  $r_{LS}$ ,  $z_{LS}$ ; Дей и др. 2019), PanSTARRS1  $DR2 (g_{PS}, r_{PS}, i_{PS}, z_{PS}, y_{PS};$  Чамберс и др. 2016), а также данные принудительной фотометрии инфракрасного обзора WISE (фильтры w1 и w2).

Система отождествления точечных рентгеновских источников SRGz представляет собой набор программных компонентов, последовательно решающих задачи автоматического поиска (кроссотождествления) наиболее вероятного оптического компаньона, его фотометрической классификации (по схеме звезда/квазар/галактика) и получения фотометрической оценки красного смещения (photo-z). Для каждого оптического кандидата SRGz измеряет вероятность ассоциации  $P_{\rm match}$  с рентгеновским источником, в поле которого он находится (при этом учитываются точность локализации рентгеновского объекта, плотность оптических объектов в поле и фотометрическая априорная вероятность для оптического кандидата). Фотометрический классификатор позволяет для выбранного оптического компаньона рентгеновского источника измерить вероятность того, что он является квазаром  $P_{
m qso}$  или галактикой  $P_{
m gal}$  (или звездой,  $P_{
m star}=1-P_{
m qso}-P_{
m gal}$ ). Фотометрическая оценка красного смещения объекта доступна в SRGz как в виде полного прогноза условного вероятностного распределения  $p(z|X_{\rm ph})$ , так и в виде точечного прогноза  $z_{
m ph}$  и его доверительного интервала  $CI_{\alpha}$  с выбранным уровнем значимости  $\alpha$ . Также измеряется достоверность прогноза photo-z в виде стандартной величины zConf, представляющей собой вероятность найти спектральное красное смещение в окрестности  $\pm 0.06(1+z_{\rm ph})$  от наилучшего прогноза  $z_{\rm ph}$ .

Система SRGz построена на использовании ансамблевых древовидных алгоритмов машинного обучения (градиентный бустинг и случайный лес деревьев решений, см. Мещеряков и др., 2018), которые обучаются на выборках квазаров, галактик и звезд из спектроскопического каталога SDSS, а также выборки звезд GAIA DR2, ассоциированных

Таблица 1. Рентгеновские свойства объектов

Объект*	R.A.	DEC	pos.err.	ext.	det.like	$F_{0.3-2}, 10^{-14}$	$F_{2-6}, 10^{-14}$
SRGE J102214.2+563443	10:22:14.2	+56:34:43	2.2	0	44	$0.6^{+0.2}_{-0.1}$	$0.9^{+0.8}_{-0.5}$
SRGE J104529.2+602537	10:45:29.2	+60:25:37	3.2	0	15	$0.6^{+0.2}_{-0.1}$	$0.22^{+0.29}_{-0.17}$
SRGE J104842.6+551858	10:48:42.6	+55:18:58	_	34	375	$6.0^{+0.4}_{-0.6}$	$2.7^{+1.4}_{-0.5}$
SRGE J105213.3+585541	10:52:13.3	+58:55:41	_	38	411	$7.5_{-1.0}^{+0.6}$	$8.0_{-3.0}^{+2.2}$
SRGE J105256.0+585146	10:52:56.0	+58:51:46	1.8	0	90	$1.6^{+0.3}_{-0.2}$	$0.9_{-0.3}^{+0.5}$
SRGE J110359.2+585028	11:03:59.2	+58:50:28	3.0	0	19	$0.7 \pm 0.2$	$0.4 \pm 0.2$

<sup>\*</sup> Приведены полные названия источников, далее в статье используются их сокращенные названия в формате Jhhmm ddmm. **Примечание.** pos.err. — Ошибка положения источника ( $1\sigma$ ); ext. — протяженность рентгеновского источника; det.like — значимость детектирования;  $F_{0.3-2}$ ,  $F_{2-6}$  — рентгеновские потоки (в эрг/с/см<sup>2</sup>) в энергетических диапазонах 0.3-2 и 2-6 кэВ (без поправки за поглощение), полученные в результате моделирования спектра источника степенной функцией с поглощением. Ошибка соответствует 68% уровню достоверности ( $1\sigma$ ).

с источниками из рентгеновского каталога XMM-Newton (3XMM DR8). Подробнее принципы работы SRGz и реализованные в ней алгоритмы будут представлены в отдельной статье (Мещеряков и др., 2020). Дополнительную информацию об отборе для спектроскопии кандидатов в квазары из рентгеновского обзора Дыры Локмана можно найти в статье Хорунжев и др. (2020). Система SRGz была создана в рабочей группе по поиску рентгеновских источников, их отождествлению и составлению каталога по данным телескопа еРОЗИТА в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

Для пробных наблюдений на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ были отобраны кандидаты в квазары с  $i_{PSF} < 20$  в интервале красных смещений  $0 < z \lesssim 3$  (по фотометрической оценке), для которых ранее не имелось спектроскопических измерений красного смещения. Наиболее вероятные оптические компаньоны для рентгеновских источников выбирались по значению  $P_{\rm match}$ .

Скопления галактик на изображениях телескопа еРОЗИТА выглядят как протяженные рентгеновские источники. Отождествление скоплений 
галактик проводилось по данным обзоров неба в 
оптическом и ИК-диапазонах (SDSS, DESI LIS, 
PanSTARRS, WISE). Для этого использовалась 
процедура, которая применялась нами ранее в работах по оптическому отождествлению скоплений 
галактик среди источников Сюняева—Зельдовича, 
обнаруженных в обзоре обсерватории им. Планка 
(Сообщество Планка, 2015; Буренин, 2017; Буренин и др., 2018). По фотометрическим данным

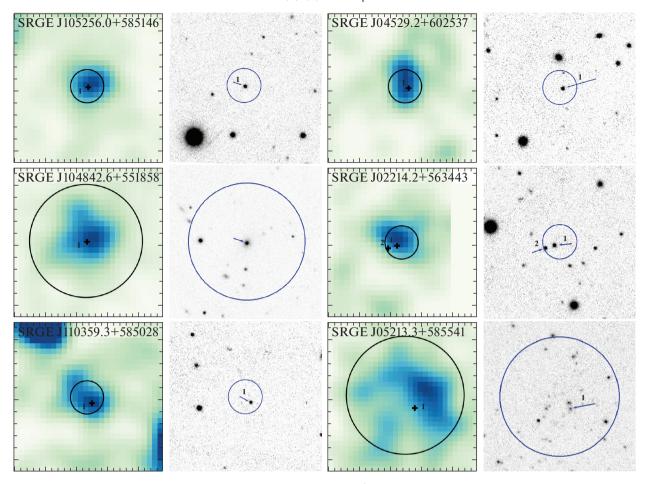
обзоров неба в области локализации протяженного рентгеновского источника проводился поиск красной последовательности галактик скопления. Кандидаты для спектроскопии отбирались среди ярчайших галактик красной последовательности. Такая методика позволяет даже по одному спектроскопическому измерению получить надежное и точное измерение красного смещения скопления галактик.

Для пробных наблюдений на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ были отобраны скопления галактик из обзора Дыры Локмана в широком диапазоне красных смещений z=0.2-0.7 (согласно фотометрическим оценкам). Чтобы измерить красные смещения этих скоплений, в них для спектроскопических наблюдений были отобраны ярчайшие галактики красной последовательности.

Рентгеновские свойства отобранных объектов приведены в табл. 1. Их рентгеновские и оптические изображения представлены на рис. 1.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения выполнялись с помощью 2.5-м рефлектора F/8 системы Ричи—Кретьена, установленного на Кавказской горной обсерватории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Обсерватория и астроклимат места наблюдений описаны в статье Корнилов и др. (2014).



**Рис. 1.** В левом столбце показаны изображения источников СРГ/еРОЗИТА в рентгеновском диапазоне 0.5-2 кэВ, в правом — изображения в фильтре  $i_{PS}$  обзора Pan-STARRS их возможных оптических компаньонов. Размер изображений  $1.5 \times 1.5$  угл. мин. Стрелкой отмечен наиболее вероятный оптический партнер для данного рентгеновского источника, для него снимался спектр с помощью спектрографа TDS 2.5-м телескопа KГО. Окружность радиусом 10 угл. сек обозначает область гарантированной локализации рентгеновского источника. Для предполагаемых скоплений галактик SRGE J104842.6+551858 и SRGE J105213.3+585541 окружность показывает радиус протяженности рентгеновского источника.

Двухлучевой Транзиентный Спектрограф 1 (ТДС) разработан для наблюдений нестационарных и внегалактических источников на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ в оптическом диапазоне с низким спектральным разрешением. Регистрация спектра проводится одновременно в двух каналах: коротковолновом (350-585 нм, дисперсия 1.21 Å/пиксель, разрешающая сила  $R \sim 1200$  с рабочей шириной щели 1") и длинноволновом (565-750) нм, дисперсия 0.87 Å/пиксель,  $R \sim$  $\sim 2200$ ), свет между которыми распределяется дихроичным зеркалом с 50% уровнем пропускания на длине волны 575 нм. Приемниками служат две ПЗС-камеры на основе детекторов E2V 42-10, охлаждаемые до  $-70^{\circ}$ С и имеющие шум считывания менее 3 электронов на рабочей скорости считывания 50 кГц. Длина входной щели 3 угл. мин,

имеются рабочая 1" и спектрофотометрическая 10" щели. В составе спектрографа имеются камера защелевого подсмотра и калибровочный узел, позволяющий снимать линейчатый спектр газоразрядной Ne-Kr-Pb лампы с полым катодом (ЛПК), а также источник с непрерывным спектром ("плоское поле") для учета виньетирования и неравномерности ширины щели. Световая эффективность (пропускание) всего оптического тракта, включая атмосферу, телескоп и спектрограф, но без учета переменных потерь на щели, составляет в максимуме не менее 30%: в "синем" канале 31% и 45% в "красном". Спектрограф постоянно установлен в фокусе Кассегрена телескопа вместе с фотометрической ПЗС-камерой широкого поля, свет в спектрограф подается вводящимся в тракт плоским диагональным зеркалом. Подробно инструмент описан в статье Потанин и др. (2020).

http://lnfm1.sai.msu.ru/kgo/instruments/tds

δ JD 245...  $t_{\rm exp}$ N Источник  $SNR_B$  $SNR_R$  $i_{PSF}$  $q_{PSF}$  $r_{PSF}$ h m s 0 / // ДНИ сек 19.86 J1022+5634 10 22 14.2 +56 34 42 8911.54 1200 6 5.1 7.7 20.38 19.68 J1045+6025 10 45 28.9 +60 25 36 8853.62 300 8 3.8 5.8 19.63 19.62 19.54 J1048+5518 10 48 42.5 +55 18 57 8854.53 300 8 1.1 6.1 19.94\* 18.46\* 17.90\* J1052+5855 10 52 12.5 +58 55 33 8922.31 1200 4 0.3 2.4 24.59\* 20.68\* 19.58\* 5 2.5 J1052+5851 10 52 55.9 +585145 8852.63 600 2.9 19.78 19.66 19.59 3 J1103+5850 11 03 58.7 +5850258913.59 1200 4.3 5.8 20.32 19.97 19.81

Таблица 2. Оптические свойства объектов и журнал наблюдений

**Примечание.** JD — юлианская дата середины наблюдений;  $t_{\rm exp}$  — время экспозиции, N — число усредняемых кадров;  ${\rm SNR_{B,R}}$  — медианное отношение сигнала к шуму в синем и красном каналах для итогового спектра. Видимые звездные величины из каталога SDSS в фильтрах q, r, i приведены в колонках  $q_{PSF}, r_{PSF}, i_{PSF}$ .

Спектральные наблюдения проводились в январе и марте 2020 г. в ясную погоду до восхода Луны в темное время ночи. Ориентация щели устанавливалась по снимку с камерой широкого поля так, чтобы помимо объекта в щель попадала относительно яркая звезда в ближайших окрестностях. Затем, при переходе системы в спектральный режим, положение щели контролировалось по этой звезде, так как сам объект был не виден в камеру подсмотра спектрографа, а затем поддерживалось автогидирующим устройством телескопа. Непосредственно после измерений каждого объекта выполнялись калибровочные измерения звезды-стандарта из списка ЕЮО https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/ spectra/stanlis.html. Список объектов и выполненных измерений представлен в табл. 2.

## Обработка наблюдений

Обработка проводилась с помощью специально созданного пакета программ на языке python и включала в себя следующие этапы:

**Вычитание темновых кадров.** Наборы темновых кадров для разных времен экспозиций были сняты заранее при той же температуре и тех же настройках приемника, что и во время наблюдений.

**Удаление следов космических лучей** проводилось с помощью пакета LAcosmic (ван Док-кум, 2001).

**Коррекция кривизны изображения щели и калибровка по длинам волн** проводились по

спектру ЛПК. Дисперсионная кривая аппроксимировалась полиномом 5-й степени методом наименьших квадратов с весами, зависящими от ошибки определения положения линий. Положения линий определялись путем аппроксимации их гауссовским профилем. Остаточные отклонения положений индивидуальных линий от полинома не превышают 0.5 Å.

**Неравномерность чувствительности вдоль щели** исправлялась путем вычисления плоского поля либо по спектру сумеречного неба, либо по спектру источника непрерывного спектра.

**Комбинирование кадров** отдельных экспозиций в суммарное изображение.

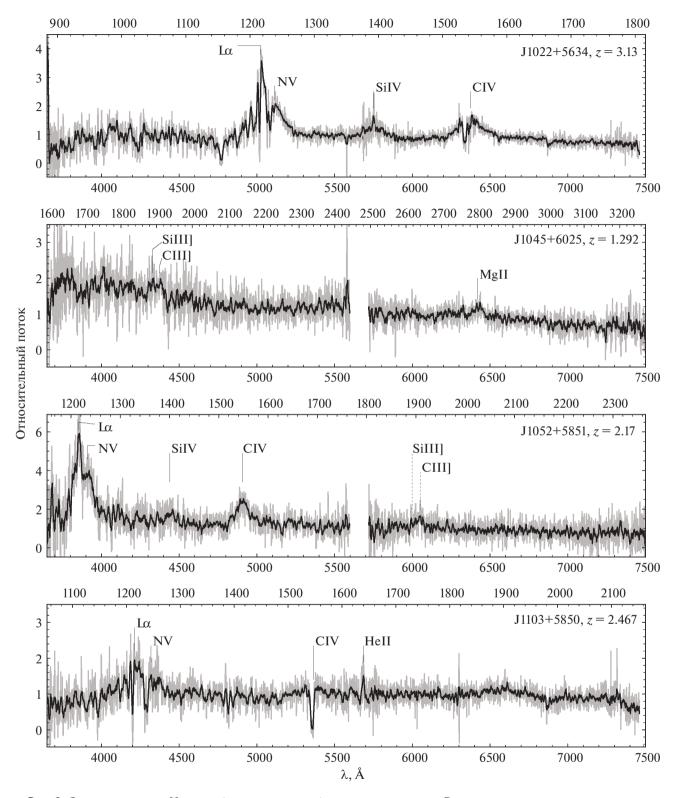
Экстракция спектра. Отсчеты суммировались в апертуре длиной 2"5 за вычетом фона, который определялся как медианное среднее по областям длиной 15"—20" по обеим сторонам от спектра объекта. Шаги до этого включительно выполнялись также для спектро-фотометрических стандартов, по которым определялась кривая реакции всей системы.

**Коррекция длин волн по линиям ночного неба.** Типичная величина поправки составляла доли Å.

**Коррекция за кривую реакции системы** выполнялась по найденному отношению экстрагированных спектров стандартов к опубликованным распределениям энергии в их спектрах.

Поскольку наблюдения проводились с узкой щелью, мы приводим спектры только в относительных единицах. Заметим, что и в этом случае

 $<sup>^*</sup>$  Протяженные в оптике галактики, для которых приведено значение modelMag.



**Рис. 2.** Спектры 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. Сплошными вертикальными чертами отмечены положения линий, которые использовались для измерения красного смещения, штриховыми чертами — вычисленные положения линий по найденному красному смещению.

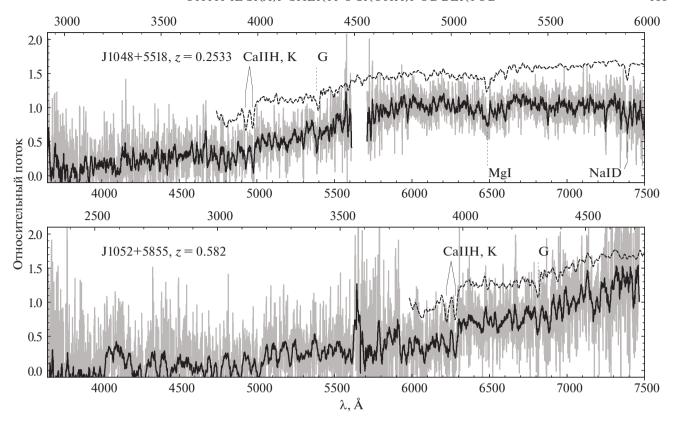


Рис. 3. Спектры ярчайших галактик скоплений. На нижней оси показаны наблюдаемые длины волн. Верхняя ось соответствует длинам волн в системе отсчета источника. Серая линия — оригинальные наблюдения. Сплошная черная линия — наблюдения, сглаженные скользящим средним. Штриховая линия — смещенный для удобства сравнения спектр галактики SDSS J231904.77-082906.3. Сплошными вертикальными чертами отмечены положения линий, которые использовались для измерения красного смещения, штриховыми чертами — вычисленные положения линий по найденному красному смещению.

распределение энергии может быть искажено из-за вариаций спектральной прозрачности атмосферы и зависимости атмосферного дрожания от длины волны, однако для выводов статьи эти эффекты не играют роли.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе фотометрических данных (SDSS, DESI LIS, PanSTARRS, WISE) из 6 объектов 4 были классифицированы системой SRGz как квазары. С помощью SRGz фотометрические красные смещения были определены и для ярчайших галактик скоплений. Полученные спектральные данные подтвердили результаты классификации SRGz для всех объектов. Спектры квазаров показаны на рис. 2, а ярчайших галактик скоплений — на рис. 3.

Для каждого объекта было определено красное смещение. Полученные спектры имеют избыточное спектральное разрешение для решения этой задачи, но недостаточное отношение сигнала к шуму. Поэтому исходные спектры были сглажены по 10 точкам (в случае J1052+5855 по 20 точкам), что позволило увеличить отношение сигнала к шуму и

провести визуальную идентификацию линий. Для измерения красного смещения z мы использовали линии, отмеченные на рис. 2 и 3. Для каждой линии мы визуально определили интервал длин волн, в котором может находиться центр линии. Середины таких интервалов использовались для оценки  $z_i$  каждой линии, а их ширины для определения меры неопределенности  $\delta z_i$  красного смещения  $z_i$ . Итоговое красное смещение и его разброс приведены в табл. 3 и определялись как средневзвешенное по всем линиям:

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

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

где  $w_i = \delta z_i^{-2}$ , а t(n) — коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0.68, n — число линий. Основными источниками неопределенности  $\delta z_i$  являются ширина линии, степень ее симметричности, блендирование с другими линиями; таким

<b>Таблица 3.</b> Результаты SRGz (на основе фотометрических данных) и спектроскопические измерения, полученные
для оптических компаньонов рентгеновских источников

Источник	Спектроскопия		$L_{X,2-10}$	SRGz				
линготот	Класс $z_{ m spec}$		×10 <sup>44</sup> эрг/с	$z_{ m phot}$	zConf	$P_{qso}$	$P_{ m gal}$	$P_{match}$
J1022+5634	квазар	$3.13 \pm 0.01$	$4.8^{+1.6}_{-0.8}$	$3.15^{+0.12}_{-0.12}$	0.95	0.98	0.00	0.97
J1045+6025	квазар	$1.292 \pm 0.004$	$0.6^{+0.2}_{-0.1}$	$1.57^{+0.13}_{-0.23}$	0.57	1.00	0.00	1.00
J1048+5518	галактика	$0.2533 \pm 0.0004$	_	$0.27^{+0.02}_{-0.01}$	1.00	0.02	0.98	0.98
J1052+5855	галактика	$0.582 \pm 0.001$	_	$0.61^{+0.04}_{-0.02}$	0.98	0.02	0.98	_
J1052+5851	квазар	$2.17 \pm 0.01$	$5.6^{+1.1}_{-0.7}$	$2.18^{+0.03}_{-0.07}$	0.99	1.00	0.00	1.00
J1103+5850	квазар	$2.467 \pm 0.003$	$3.3^{+0.9}_{-0.9}$	$2.32^{+0.14}_{-0.06}$	0.85	0.99	0.00	0.99

образом, узкие линии правильной формы получали наибольший вес в усреднении. Мы не применяли формальные методы определения центра линий, поскольку линии часто имеют сложную форму и простые методы определения центра могут приводить к систематическим ошибкам не только в  $z_i$ , но и в  $\delta z_i$ .

В случае квазаров в качестве центральной лабораторной длины волны сливающихся многокомпонентных линий брались усредненные с весами gf длины волны каждой компоненты, что оправдано в случае оптически тонких линий. Для абсорбционной линии Na I D, наблюдаемой в спектрах галактик, за центральную длину волны бралась средняя длина волны обоих компонент, что оправдано для оптически толстого случая, когда оба компонента имеют практически равные эквивалентные ширины.

Поскольку в случае квазаров в оптический диапазон попадают линии вакуумного ультрафиолета, то при вычислении z все длины волн были приведены к значениям в вакууме.

Спектры обеих ярчайших галактик скоплений имеют изрезанную форму и сильно зашумлены, что осложняет узнаваемость линий. Для проверки правильности идентификации найденных линий Na I и Ca II мы сравнили на рис. З спектры наших объектов со спектром галактики SDSS J231904.77-082906.3, который был выбран из каталога RCSED<sup>2</sup> (Чилингарян, Золотухин, 2012; Чилингарян и др., 2016) и сдвинут по длинам волн на найденное z (с учетом собственного z выбранной галактики). Видно, что в обоих спектрах совпадают

не только линии, по которым определялось z, но и другие сильные особенности (G полоса, линии Mg I), а также общее распределение энергии, что свидетельствует о правильности идентификации линий. Поскольку эти галактики входят в красные последовательности, измерения красных смещений этих галактик дают также красные смещения соответствующих скоплений.

Для квазаров — точечных рентгеновских источников — в табл. 3 приведено значение рентгеновской светимости в системе отсчета квазара в диапазоне 2-10 кэВ. Светимость получена из наблюдаемого рентгеновского потока в диапазоне 0.3-2 кэВ в предположении, что рентгеновский спектр квазара описывается степенным законом с фотонным инлексом  $\Gamma=1.8$ .

## ОЦЕНКА МАСС СМЧД И ТЕМПОВ АККРЕЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ ЛИНИИ С IV

Объекты J1052+5851 и J1022+5634 имеют в своих спектрах достаточно выразительную эмиссионную линию С IV для того, чтобы можно было применить метод оценки массы СМЧД по ее ширине (Парк и др., 2013). Для измерения ширины линии мы фитировали ее профиль гауссианой, маскируя абсорбционные детали. Инструментальная ширина профиля оценивется по линии неба 5577 Å и дает пренебрежимо малый вклад в общую ширину линий С IV. Для применения метода, помимо ширины линии С IV, необходимо знать монохроматическую светимость в континууме  $\lambda L_{\lambda}$  в районе 1350 Å в системе отсчета источника. В системе отсчета наблюдателя эта длина волны

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://rcsed.sai.msu.ru

FWHM<sub>C IV</sub>  $1350F_{1350}^{\text{raw}}$  $1350F_{1350}$  $1350L_{1350}$ Источник  $\lg M$ чД $/M_{\odot}$ zэрг/с/см $^2$ 9рг/с/см $^2$ км/с эрг/с  $1.38 \times 10^{-13}$  $1.64 \times 10^{-13}$  $1.5 \times 10^{46}$ J1022+5634 3.13  $7500 \pm 300$  $9.1 \pm 0.5$  $2.40\times10^{-13}$ J1052+5851 2.17  $5600 \pm 300$  $3.16 \times 10^{-13}$  $9 \times 10^{45}$  $8.9 \pm 0.5$ 

Таблица 4. Оценка масс СМЧД

попадает в видимый диапазон, и нужная величина может быть вычислена из наших наблюдений. Поскольку спектры были получены с узкой щелью, мы скорректировали наблюдаемые потоки  $F_{1350}^{\rm raw}$ , используя фотометрию SDSS. Величина коррекции составляла около 20%. Для расчета фотометрического расстояния по красному смещению мы использовали космологический калькулятор (Райт, 2006) для параметров  $H_0=69.6$ , км/с/Мпк,  $\Omega_{\rm M}=0.286$  и  $\Omega_{\rm vac}=0.714$ . Полученные величины  $\lambda L_{\lambda}$  и FWHM $_{\rm C\,IV}$  собраны в табл. 4.

Соотношение, связывающее ширину линии в системе отсчета квазара (FWHM<sub>C IV</sub>) и монохроматическую светимость континуума  $L_{1350}$  с массой СМЧД, взято из статьи Парк и др. (2013):

$$\lg \frac{M_{\rm BH}}{M_{\odot}} = \alpha + \beta \lg \frac{1350L_{1350}}{10^{44} \text{pd}/\text{c}} + \gamma \lg \frac{\text{FWHM}_{\text{C IV}}}{1000 \, \text{km/c}},$$

где  $\alpha=7.48\pm0.24$ ,  $\beta=0.52\pm0.09$  и  $\gamma=0.56\pm0.48$ . Для обоих объектов получившиеся значения масс составляют  $10^9~M_{\odot}$  с точностью до фактора 3 (см. табл. 4). Заметим, что невысокая точность оценки определяется не качеством наблюдений, а неопределенностью коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

Используя полученные значения  $L_{1350}$ , можно оценить болометрическую светимость квазаров J1022+5634 и J1052+5851:  $L_{\rm bol}=3.81 \times 1350L_{1350}$ . Это соотношение взято из работы Даи и др. (2014) и основано на усредненном спектральном распределении энергии квазаров 1-го типа из работы Ричардс и др. (2006). На основе полученных оценок масс СМЧД, в свою очередь, можно оценить эддингтоновские светимости обоих объектов:  $L_{\rm Edd}=1.26\times 10^{38}(M_{BH}/M_{\odot})$  эрг/с. В итоге для обоих квазаров получается  $L_{\rm bol}/L_{\rm Edd}\approx 0.3$  (от  $\sim 0.1$  до  $\sim 1$  с учетом погрешности), т.е. аккреция на СМЧД идет в высоком темпе и радиационно эффективном режиме.

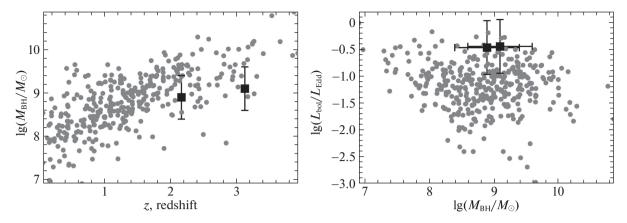
Полученные значения интересно сравнить с соответствующими значениями для представительной выборки (391 объект) ранее известных квазаров в области Дыры Локмана из упомянутой

работы Даи и др. (2014). Эти объекты были отобраны по потоку на длине волны 24 мкм в инфракрасном обзоре SWIRE обсерватории Spitzer на площадке размером  $\approx \! 11$  кв. градусов (которая входит в область покрытия обзора Дыры Локмана обсерватории  $CP\Gamma$ ) и отождествлены как квазары с широкими эмиссионными линиями в ходе спектроскопического обзора на телескопе MMT. Как видно на рис. 4, отношение  $L_{\rm bol}/L_{\rm Edd}$  для квазаров J1022+5634 и J1052+5851 оказывается среди самых высоких значений для квазаров в области Дыры Локмана.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практике показано, что введенный в эксплуатацию на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ спектрограф TDS позволяет получать спектры объектов  $\sim 20^m$  за 2 ч наблюдений с отношением сигнал к шуму больше 5 и разрешением  $R \sim 1500$ . Такие характеристики позволяют использовать инструмент для изучения слабых объектов, в частности, оптических компаньонов рентгеновских источников, которые открываются в большом количестве обсерваторией СРГ. Значительный объем наблюдательного материала СРГ требует автоматического отождествления рентгеновских источников в оптическом диапазоне, их классификации и фотометрических измерений красных смещений. Для решения этой задачи в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН была создана система SRGz на основе алгоритмов машинного обучения, а также созданы алгоритмы автоматического поиска красных последовательностей в скоплениях галактик по данным в оптическом и ИК-диапазонах.

Первые спектральные наблюдения со спектрографом TDS кандидатов в квазары на  $z\lesssim 3$  и скоплений галактик, открытых телескопом ePO3ИTA обсерватории CPГ, показали, что система SRGz правильно отождествляет такие объекты, а ее результаты по фотометрическому измерению красных смещений рентгеновских источников хорошо согласуются с результатами оптической спектроскопии. Характеристики нового спектрографа TDS КГО ГАИШ МГУ позволяют решать широкий круг задач, связанных с отождествлением в видимом



**Рис. 4.** Слева: распределение ранее известных квазаров с широкими эмиссионными линиями в области Дыры Локмана (Даи и др. 2014, серые точки) по красному смещению и массе СМЧД. Черными квадратами с ошибками показаны соответствующие значения для квазаров SRGE J102214.2+563443 и SRGE J105213.3+585541, обнаруженных в ходе рентгеновского обзора Дыры Локмана телескопом СРГ/еРОЗИТА и отождествленных с помощью 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ. Справа: соответствующая диаграмма для темпа аккреции и массы черной дыры.

диапазоне рентгеновских источников обзора СРГ и определением их физических свойств.

Спектрограф TDS создан при финансовой поддержке программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова и грантов РНФ 16-12-10519 (красный канал), РНФ 17-12-01241 (синий канал). Работа АВД, САП, ААБ, ОВЕ, АМТ, КАП выполнена при поддержке гранта Программы развития МГУ "Ведущая научная школа "Физика звезд, релятивистских объектов и галактик".

Это исслелование основано на наблюдениях телескопа еРОЗИТА на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/еРОЗИТА изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (МРЕ) 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. Использованные в настоящей работе данные телескопа еРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом еРОЗИТА, и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа СРГ/ еРОЗИТА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аболфати и др. (B. Abolfathi, D. Aguado, G. Aguilar, P. Allende, A. Almeida, T. Ananna, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **235**, 42 (2018).
- 2. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 559 (2017) [R.A. Burenin, Astron. Lett. **43**, 507 (2017)].
- 3. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Зазнобин И.А., Хорунжев Г.А., Еселевич М.В. и др., Письма в Астрон. журн. **44**, 297 (2018) [R.A. Burenin et al., Astron. Lett. **44**, 297 (2018)].
- 4. ван Доккум (P.G. van Dokkum), PASP 113, 1420 (2001).
- 5. Даи и др. (Y.S. Dai, M. Elvis, J. Bergeron, G. Fazio, et al.), Astrophys. J. **791**, 113 (2014).
- 6. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, et al.), Astron. J. **157**, 168 (2019).
- 7. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, and M. Brusa), Astron. Astrophys. **558**, A89 (2013).
- 8. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, G. Huetsi, and R. Sunyaev), Astron. Astrophys. **558**, A90 (2013).
- 9. Корнилов и др. (V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, N. Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, et al.), PASP **126**, 482 (2014).
- 10. Лэнг и др. (D. Lang, D. Hogg, and D. Schlegel), Astron. J. **151**, 36 (2016).
- 11. Мещеряков и др. (А. Мещеряков, В. Глазкова, С. Герасимов, И. Машечкин), Письма в Астрон. журн. **44**, 801 (2018). [A. Mescheryakov, et al., Astron. Lett. **44**, 735 (2018)].
- 12. Мещеряков (А. Мещеряков), in preparation (2020).
- 13. Павлинский (М.Н. Павлинский), in preparation (2020).
- 14. Парк и др. (D. Park, J. Woo, K. Denney, and J. Shin), Astrophys. J. **770**, 87 (2013).
- 15. Потанин и др. (S. Potanin, N. Shatsky, et al.), in preparation (2020).
- 16. Предэль (P. Predehl), in preparation (2020).

- 17. Райт (E.L. Wright), PASP 118, 1711 (2006).
- 18. Ричардс и др. (G.T. Richards, M. Lacy, L. Storrie-Lombardi, P. Hall, S. Gallagher, D. Hines, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **166**, 470 (2006).
- 19. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), Astron. Astrophys. **582**, A29 (2015); arXiv:1407.6663.
- 20. Сюняев и др. (R. Sunyaev, et al.), готовится к печати (2020).
- 21. Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, А.В. Мещеряков, Р.А. Буренин, А.Р. Ляпин, П.С. Медведев,

- С.Ю. Сазонов и др.), Письма в Астрон. журн. **46**, 155 (2020) [G.A. Khorunzhev et al., Astron. Lett. **46**, N3 (2020)].
- 22. Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, et al.), arXiv e-prints arXiv:1612.05560, (2016).
- 23. Чилингарян и др. (I. Chilingarian, I. Zolotukhin, I. Katkov, and A.-L. Melchior), Astrophys. J. Suppl. Ser. 228, 14 (2017).
- 24. Чилингарян, Золотухин (I. Chilingarian and I. Zolotukhin), MNRAS **419**, 1727 (2012).