

ПОИСК СОБЫТИЙ ПРИЛИВНОГО РАЗРУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЗОРА СРГ/еРОЗИТА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИЕЙ

© 2023 г. Г. А. Хорунжев^{1*}, С. Ю. Сазонов¹, П. С. Медведев¹, М. Р. Гильфанов^{1,2},
К. Е. Атапин³, А. А. Белинский³, О. В. Возякова³, А. В. Додин³, Б. С. Сафонов³,
А. М. Татарников³, И. Ф. Бикмаев⁴, Р. А. Буренин¹, С. Н. Додонов⁵, М. В. Еселевич⁶,
И. А. Зазнобин¹, Р. А. Кривонос¹, Р. И. Уклеин⁵, К. А. Постнов³, Р. А. Сюняев^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

³Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁵Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

⁶Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения АН, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 07.12.2022 г.

После доработки 08.12.2022 г.; принята к публикации 08.12.2022 г.

Четыре завершенных полугодичных обзора неба телескопа еРОЗИТА орбитальной обсерватории СРГ позволяют искать события приливного разрушения (СПР) в ядрах галактик по их переменности в рентгеновском диапазоне. При этом в значительно большем количестве обнаруживаются переменные активные ядра галактик (АЯГ), для отсева которых приходится использовать достаточно строгие критерии. Некоторые СПР могут быть пропущены или ошибочно классифицированы как вероятные АЯГ. Для окончательной идентификации СПР среди внегалактических транзиентов СРГ/еРОЗИТА, необходимо проводить оптическую спектроскопию. Мы рассматриваем набор критериев, по которым можно отличить СПР от АЯГ на основе оптических спектров и фотометрической информации. В частности, предлагается использовать отношение рентгеновской светимости к светимости в линии [OIII] 5007 Å. Для тестирования предложенного метода рассматривается выборка из 15 внегалактических транзиентов СРГ/еРОЗИТА, чей рентгеновский поток изменился более чем в 7 раз между двумя соседними обзорами. Для всех этих объектов были получены спектры на российских оптических телескопах: РТТ-150, АЗТ-ЗЗИК, РС2500, БТА. Нам удалось выявить 5 новых и одно ранее известное СПР, а также классифицировать 7 источников как АЯГ. Природа еще двух транзиентов остается под вопросом. Предложенный метод поможет расставить приоритеты для получения максимально полной и надежной выборки СПР в обзоре СРГ/еРОЗИТА.

Ключевые слова: события приливного разрушения, активные ядра галактик, рентгеновские обзоры, спектроскопия, СРГ, еРОЗИТА.

DOI: 10.31857/S0320010823010035, **EDN:** PKJ0JK

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. нами был начат поиск событий приливного разрушения (СПР) звезд в окрестностях сверхмассивных черных дыр среди рентгеновских транзиентов, обнаруженных телескопом еРОЗИТА (Предель и др., 2021) орбитальной обсерватории СРГ (Сюняев и др., 2021) в ходе

обзора всего неба. В работе Сазонова и др. (2021) была представлена первая выборка таких событий, состоящая из 13 ярчайших (по рентгеновскому потоку) СПР, зарегистрированных в ходе второго сканирования неба обсерваторией СРГ с июня по декабрь 2020 г. На ее основе была впервые оценена функция рентгеновской светимости СПР. В работе Сазонова и др. (2021) предварительный отбор кандидатов в СПР проводился на

*Электронный адрес: horge@iki.rssi.ru

основе информации о рентгеновской и оптической переменности объектов, их протяженности на оптических изображениях и в инфракрасном диапазоне (по данным обзора неба космического телескопа WISE, Райт, 2010), а для окончательного установления их природы использовалась оптическая спектроскопия. Этот метод показал достаточно хорошую эффективность при поиске СПР в спокойных галактиках (без активных ядер).

В декабре 2021 г. обсерватория СРГ завершила четвертый полный обзор неба. Таким образом, любая точка на небе уже наблюдалась четыре раза с интервалами в шесть месяцев. Это позволяет значительно расширить поиск СПР, начатый в работе Сазонова и др. (2021), и многократно увеличить выборку таких событий, обнаруженных с помощью телескопа eРОЗИТА. При этом надо учитывать, что активные ядра галактик (АЯГ) могут демонстрировать в рентгеновском диапазоне сходные с СПР свойства: мягкий спектр с наклоном $\Gamma \approx 2.5-3$ и всплывающий характер кривой блеска с резкими изменениями (на порядок) потока (см., например, Аучеттл и др., 2018; Заблудовф и др., 2021; Медведев и др., ПАЖ, 2023, в печати). Это затрудняет классификацию СПР исключительно по рентгеновским данным, тем более что СПР составляют всего несколько процентов от всех переменных рентгеновских источников СРГ/eРОЗИТА. Например, СПР, которые происходят в галактиках с умеренной активностью сверхмассивной черной дыры (а доля таких галактик в общем населении весьма высока, Хо, 2008), могут не удовлетворять критериям отбора кандидатов в СПР среди источников СРГ/eРОЗИТА, предложенным в статье Сазонова и др. (2021). Поэтому для получения статистически полной выборки рентгеновских СПР важно проверить и уточнить эти критерии. Составление такой выборки, в свою очередь, необходимо для точного измерения рентгеновской функции светимости и других статистических свойств СПР (Хабибуллин и др., 2014).

Кандидаты в СПР и другие сильно переменные рентгеновские источники, зарегистрированные телескопом eРОЗИТА в ходе обзора на Российской половине неба ($0 < l < 180^\circ$), наблюдаются на российских телескопах, участвующих в программе наземной оптической поддержки обзора СРГ: 1.5-м Российско-турецкий телескоп (РТТ-150), 1.6-м телескоп АЗТ-33ИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН, 2.5-м телескоп КГО ГАИШ МГУ (RC2500), 6-м телескоп БТА САО РАН. Основные задачи этой программы: оптическая классификация переменных рентгеновских источников, поиск событий приливного разрушения, АЯГ с переменным оптическим типом (Changing-look AGN) и других уникальных объектов. Аналогичная

работа проводится нами вместе с американскими коллегами на 10-м телескопе им. У.М. Кека (Сазонов и др., 2021).

К настоящему моменту в рамках программы поиска кандидатов в СПР и отождествления сильно переменных источников eРОЗИТА уже проведены наблюдения более чем четырехсот объектов. Чтобы максимально правильно классифицировать объекты на основе полученных спектроскопических данных и имеющейся информации о переменности в разных диапазонах энергий, требуется выработать и протестировать набор критериев, по которым СПР можно отличить от АЯГ и прочих объектов. В данной статье мы приводим небольшую, но представительную выборку внегалактических источников, отобранных по рентгеновской переменности в обзоре СРГ/eРОЗИТА и имеющих некоторые признаки СПР, и на ее основе обсуждаем, как можно отличить СПР от АЯГ с использованием спектральных данных, полученных на российских оптических телескопах.

ОТБОР СИЛЬНО ПЕРЕМЕННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Для целей поиска СПР мы считаем рентгеновский источник СРГ/eРОЗИТА сильно переменным, если его средний рентгеновский поток в каком-то полугодовом обзоре изменился в 7 и более раз по сравнению с измеренным потоком или верхним пределом на поток в предыдущем полугодовом обзоре¹. Типичная чувствительность (она варьируется по небу) полугодового обзора СРГ/eРОЗИТА составляет 5×10^{-14} эрг/с/см² в диапазоне энергий 0.2–2.3 кэВ (Предел и др., 2021). Соответственно, условие изменения потока как минимум в 7 раз означает, что хотя бы в одном из обзоров источник будет ярче 10^{-13} эрг/с/см². Как правило, для таких ярких рентгеновских источников положение на небе определяется с точностью в несколько угловых секунд (Бельведерский и др., 2022).

Далее, в ходе отождествления рассматриваются все объекты на архивных оптических/ИК-изображениях в 98%-области локализации рентгеновского источника с радиусом R_{98} . Чаще всего ярчайший ($i < 20$ зв. вел.) оптический источник внутри R_{98} оказывается ближе всего к центру локализации рентгеновского источника и является истинным оптическим компаньоном. Вероятность случайного попадания таких источников в

¹ Отметим, что в общем случае для классификации объекта как сильно переменного требуется изменение потока, более чем в заданное число раз (например, в 7 или 10 раз) между любыми двумя обзорами неба (Медведев и др., 2022).

круг ошибок R_{98} составляет, как правило, меньше 1%. Поэтому для большинства внегалактических транзиентов СРГ/еРОЗИТА нет проблемы выбора настоящего оптического компаньона, которая возникает для слабых рентгеновских источников вблизи порога детектирования (Бельведерский и др., 2022).

В настоящей работе нас интересуют только внегалактические переменные источники. Поэтому мы сразу исключаем из выборки звезды с помощью астрометрического каталога Gaia (Коллаборация Gaia, Прусти и др., 2016; Браун и др., 2021). Объект считается звездой, если у рентгеновского источника внутри R_{98} все оптические объекты Гайя имеют параллакс или собственное движение, измеренные на уровне значимости выше 5σ . Оставшиеся источники разбиваются на группы в зависимости от характера изменения рентгеновского потока и многоволновых свойств: “кандидаты в СПР”, “кандидаты в поярчавшие АЯГ”, “кандидаты в потухшие АЯГ”. На основе этих списков формируются программы наблюдений на телескопах.

Критерии отбора “кандидатов в СПР” по данным еРОЗИТы аналогичны приведенным в работе Сазонова и др. (2021). Это, в первую очередь, отсутствие детектирования во всех полугодовых обзорах СРГ/еРОЗИТА, предшествующих тому обзору, где источник проявил себя как транзиент. Кроме того, оптический компаньон должен иметь морфологический тип галактики, т.е. должен быть протяженным на оптических изображениях, а инфракрасный компаньон из обзора WISE в каталоге AllWISE (Катри и др., 2021) должен иметь показатель цвета $W1 - W2 \leq 0.8$. В работе (Ассеф и др., 2013) было показано, что цвет $W1 - W2 > 0.8$ практически гарантирует, что объект является квазаром. Наконец, проверяется отсутствие оптических транзиентов в системе ZTF (Беллм и др., 2019; Масци и др., 2019) до начала первого рентгеновского обзора неба СРГ. Первый из этих критериев (по рентгеновской переменности) призван максимально отсеять АЯГ, так как большинство ярких (с максимальными потоками выше 10^{-13} эрг/с/см²) АЯГ детектируются во всех полугодовых обзорах СРГ/еРОЗИТА. Однако при его применении можно пропустить какую-то долю СПР: если СПР впервые проявился как слабый рентгеновский источник в одном обзоре, а в следующем стал еще ярче. С другой стороны, использование достаточно консервативного порога по ИК-цвету позволяет гарантировано отсеять квазары, т.е. АЯГ, в которых излучение, связанное с активностью центральной сверхмассивной черной дыры, преобладает над излучением самой галактики, но при этом не исключает попадание в выборку менее мощных АЯГ —

сейфертовских галактик, у которых часто бывает $W1 - W2 < 0.8$.

Другую категорию исследуемых объектов составляют “кандидаты в поярчавшие АЯГ”, которыми мы считаем не связанные со звездами рентгеновские источники, чей поток вырос в 7 и более раз в каком-либо полугодовом обзоре СРГ по сравнению с предыдущим, и которые при этом не попали в список кандидатов в СПР (см. выше). Таким образом, в данную выборку попадают объекты с ИК-цветом $W1 - W2 > 0.8$, а также объекты, не попавшие в список вероятных СПР из-за детектирования в предыдущем обзоре, “точечности” оптического партнера и проч. Аналогичным образом составляется выборка “кандидатов в потухшие АЯГ”. Это рентгеновские источники, чей поток уменьшился в 10 и более раз по сравнению с предыдущим обзором неба. Для потухших источников используется более строгий критерий, чтобы локализация в рентгене (R_{98}) была точнее, и дробовой шум регистрируемых фотонов был пренебрежимо мал по сравнению с амплитудой падения потока. Ясно, что среди кандидатов в поярчавшие и потухшие АЯГ могут оказаться и СПР.

Как уже отмечалось во Введении, все кандидаты в СПР, в поярчавшие и потухшие АЯГ наблюдаются на оптических телескопах с целью получения их спектров (а также в некоторых случаях — фотометрии), которые требуются для установления природы объектов. Ниже рассматривается подвыборка из 15 сильно переменных рентгеновских источников СРГ/еРОЗИТА, которые были отобраны по разным подпрограммам, и для которых была проведена спектроскопия на российских оптических телескопах.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ВЫБОРКА И ОТБОР ОПТИЧЕСКИХ ПАРТНЕРОВ

Представленные в данной работе рентгеновские источники были открыты в ходе первых четырех полугодовых обзоров неба телескопом СРГ/еРОЗИТА в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ. Процедура первичной обработки и калибровки данных телескопа еРОЗИТА, детектирования и характеристики источников, составления и астрометрической коррекции каталогов, применяемая в научной рабочей группе по каталогу источников телескопа еРОЗИТА российского консорциума еРОЗИТы, описана в работе Гильфанова и др. (2013). Изменение рентгеновского потока между обзорами рассчитывалось относительно усредненного потока в предыдущем обзоре или относительно 3σ верхнего предела на этот поток, что соответствует значению правдоподобия детектирования $\mathcal{L} = 6$. Рентгеновские свойства исследуемой выборки источников представлены в табл. 1.

Таблица 1. Рентгеновские свойства выборки

№	Источник SRGE...	RA град	DEC град	R_{98} угл. сек	$F1$	$F2$	$F3$	$F4$	Дата гг/мм/дд
					$\times 10^{-13}$ эрг/с/см ² (0.3–2.2 кэВ)				
1	J002336.1–014002	5.9004	–1.6672	2.6	9.9 ± 0.9	21.8 ± 1.5	14.6 ± 1.1	<0.3	№ 2, 2020/06/12–13
2	J003427.0+181141	8.6125	18.1947	0.3	<0.20	2.7 ± 0.5	1.5 ± 0.4	1.5 ± 0.4	№ 2, 2020/06/25–26
3	J011943.6–024144	19.9317	–2.6956	7.4	<0.18	<0.23	<0.23	2.0 ± 0.5	№ 4, 2021/07/01–02
4	J015444.7–070012	28.6862	–7.0033	9.7	<0.18	<0.17	<0.22	1.7 ± 0.4	№ 4, 2021/07/09–13
5	J020320.5+233624	30.8354	23.6067	3.3	1.2 ± 0.3	2.6 ± 0.4	7.2 ± 0.8	<0.23	№ 3, 2021/01/18–19
6	J020642.9+333911	31.6787	33.6531	4.4	<0.17	<0.17	3.6 ± 0.5	2.2 ± 0.5	№ 3, 2021/01/23–24
7	J030747.7+401841	46.9487	40.3114	2.3	<0.22	<0.17	<0.20	81.4 ± 2.4	№ 4, 2021/08/16–17
8	J050948.4+695221	77.4517	69.8725	5.4	<0.18	<0.16	<0.20	2.5 ± 0.4	№ 4, 2021/09/21–22
9	J104258.5+550347	160.7437	55.0631	7.7	<0.24	<0.23	1.9 ± 0.5	<0.3	№ 3, 2021/05/09–10
10	J135438.2+703310	208.6592	70.5528	7.1	0.32 ± 0.13	<0.16	2.0 ± 0.5	<0.17	№ 3, 2021/05/12–13
11	J163807.7+240048	249.5321	24.0133	4.4	<0.18	<0.17	1.5 ± 0.3	0.70 ± 0.22	№ 3, 2021/02/16–18
12	J170853.0+641641	257.2208	64.2781	2.7	2.6 ± 0.3	1.31 ± 0.11	<0.05	0.13 ± 0.04	№ 1, 2019/12/21–02
13	J171759.2+500240	259.4967	50.0444	4.4	<0.10	<0.11	<0.09	1.43 ± 0.22	№ 4, 2021/08/29–02
14	J180028.3+482216	270.1179	48.3711	2.5	16.5 ± 0.8	6.7 ± 0.5	0.31 ± 0.12	1.89 ± 0.24	№ 1, 2020/03/30–03
15	J204129.5+214408	310.3729	21.7356	6.5	<0.3	<0.3	21.0 ± 1.8	1.2 ± 0.4	№ 3, 2021/05/11–11

Примечание. RA — прямое восхождение рентгеновского источника, DEC — склонение рентгеновского источника, R_{98} — радиус области локализации рентгеновского источника на уровне достоверности 98%, $F1$, $F2$, $F3$, $F4$ — усредненные рентгеновские потоки в полугодовых обзорах неба в диапазоне 0.3–2.2 кэВ; если источник не детектируется в каком-либо обзоре, то приводится верхний предел на рентгеновский поток со значимостью 3σ . Дата — номер обзора и период сканирования источника для обзора, в котором наблюдался максимальный рентгеновский поток от источника.

Для оценки потока использовалась модель степенного закона с наклоном $\Gamma = 1.8$ и поглощением ($tbabs*power$). При этом колонка поглощения N_H для каждого источника фиксировалась на значении, равном поглощению в Галактике в этом направлении по данным карт HI4PI (Коллаборация HI4PI, 2016). В табл. 1 представлены измеренные потоки, не исправленные за поглощение, и даты обзора, в котором было зафиксировано изменение потока в семь и более раз по сравнению с предыдущим обзором. Рентгеновские потоки затем используются для расчета светимости в диапазоне 0.3–2.2 кэВ. При этом использовались следующие космологические параметры: $H_0 = 70$ км/с и $\Omega_M = 0.3$.

Каталог рентгеновских источников был скорре-

лирован с каталогами оптических источников Слоановского обзора (SDSS, DR12, Алам и др., 2015) и Системы телескопов панорамного обзора и быстрого реагирования (Pan-STARRS DR2 Stacked, Чамберс и др., 2016), а также с инфракрасным каталогом AllWISE (Катри и др., 2022). Поиск вероятных оптических компаньонов проводился внутри радиуса R_{98} 98% круга ошибок, значения которого приведены в табл. 1. Для всех рентгеновских источников оптический партнер определяется однозначно, как видно из представленных на рис. 1 оптических изображений. В табл. 2 представлены фотометрические свойства оптических партнеров в видимом и ИК-диапазонах, а также угловые расстояния между рентгеновскими и оптическими координатами.

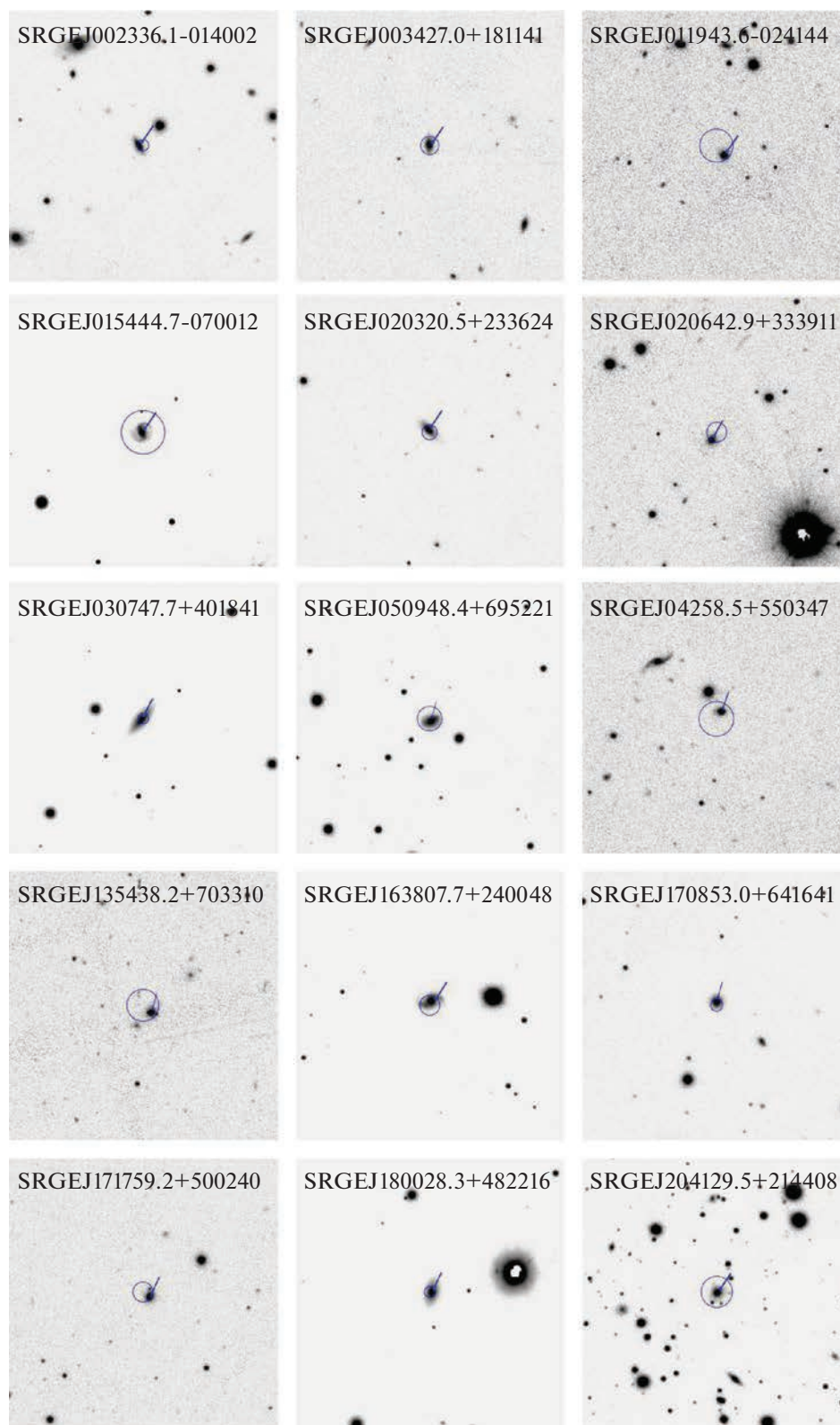


Рис. 1. Оптические изображения исследуемых объектов в фильтре i' Pan-STARRS размером 2×2 угл. мин. Кругок соответствует размеру области 98% ошибки на локализацию рентгеновского источника. Стрелка указывает на положение вероятного оптического компаньона, спектр которого исследуется в данной статье.

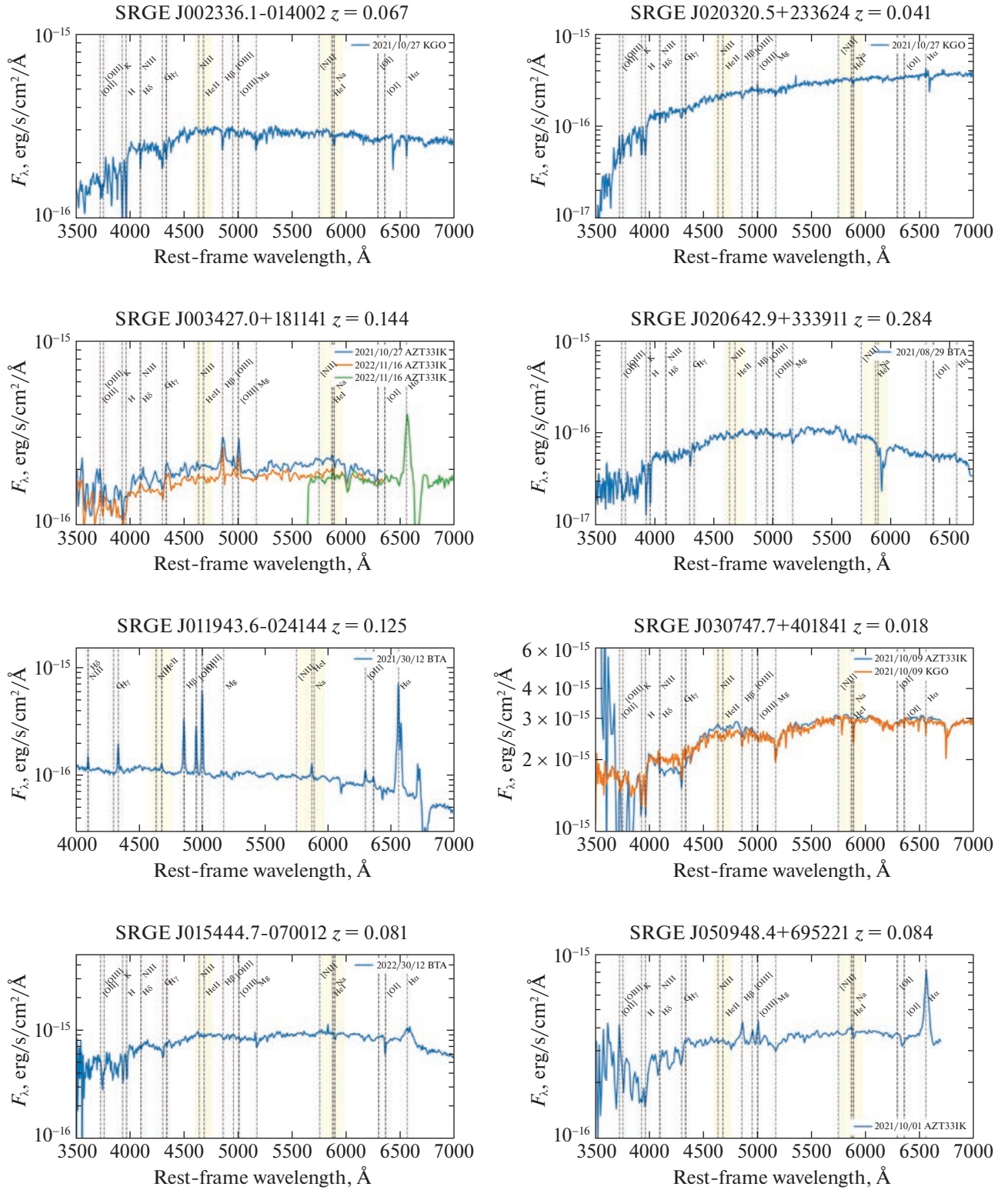


Рис. 2. Спектры источников.

Таблица 2. Фотометрические свойства оптических партнеров

№	Источник	Сер. угл. сек	SR	RAopt град	DECopt град	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>W1</i>	<i>W1–W2</i>	<i>E(B – V)</i>
						зв. вел. (AB)			зв. вел. (Vega)		
1	J002336.1–014002	1.9	ss	5.90099	–1.66729	18.24	17.48	17.12	14.74	0.13 ± 0.07	0.05
2	J003427.0+181141	0.5	ss	8.61259	18.19467	19.12	18.13	17.56	14.44	0.43 ± 0.05	0.10
3	J011943.6–024144	5.4	ss	19.93068	–2.69664	19.27	18.81	18.36	15.31	0.71 ± 0.07	0.04
4	J015444.7–070012	0.8	ss	28.68662	–7.00346	16.93	16.17	15.78	14.30	0.22 ± 0.07	0.02
5	J020320.5+233624	1.0	ss	30.83555	23.60676	18.27	17.44	17.01	14.68	0.03 ± 0.06	0.08
6	J020642.9+333911	4.4	ps	31.67943	33.65194	20.55	18.90	18.35	14.86	0.23 ± 0.06	0.08
7	J030747.7+401841	1.0	ss	46.94927	40.31134	15.81	14.90	14.44	12.12	–0.08 ± 0.03	0.14
8	J050948.4+695221	1.5	ps	77.45126	69.87210	17.98	17.25	16.78	13.89	0.29 ± 0.05	0.14
9	J104258.5+550347	3.7	ss	160.74273	55.06384	19.34	18.59	18.12	15.19	0.54 ± 0.06	0.01
10	J135438.2+703310	5.0	ps	208.65584	70.55185	20.47	18.85	18.10	14.17	0.46 ± 0.04	0.01
11	J163807.7+240048	1.9	ss	249.53207	24.01376	16.98	16.20	15.74	13.41	0.30 ± 0.05	0.08
12	J170853.0+641641	1.6	ss	257.22089	64.27835	18.65	17.75	17.33	14.47	0.12 ± 0.05	0.03
13	J171759.2+500240	3.8	ps	259.49556	50.04377	18.71	18.00	17.63	14.85	0.22 ± 0.05	0.02
14	J180028.3+482216	1.3	ss	270.11729	48.37113	16.65	15.91	15.46	12.81	0.02 ± 0.04	0.04
15	J204129.5+214408	0.5	ps	310.37279	21.73536	18.15	17.27	16.83	14.07	0.12 ± 0.05	0.10

Примечание. Sep — расстояние между координатами рентгеновского и оптического источников в угловых секундах, SR (Survey Reference) — обзор, в котором найден вероятный оптический компаньон: ss — SDSS (Алам и др., 2015), ps — Pan-STARRS (Чамберс и др., 2016), RA_{opt}, DE_{opt} — координаты оптического компаньона, *g*, *r*, *i* — видимые звездные величины в системе AB, *W1* — видимая звездная величина оптического компаньона в каталоге AllWISE (Катри и др., 2012) в фильтре *W1* в системе Vega, *W1–W2* — показатель цвета и его ошибка в системе Vega, *E(B – V)* — величина межзвездного поглощения в Галактике в направлении на источник (Шлегель и др., 1998).

онных линий нет, то это отношение должно быть выше 10, чтобы можно было определить красное смещение по линиям поглощения. Для классификации источника важны области спектра вокруг балмеровских линий водорода H α и H β . В случаях, когда одна из областей оказывается на границе или за пределами рабочего диапазона длин волн, проводятся повторные измерения с другим диспергирующим элементом или на других телескопах, где эта спектральная область хорошо видна.

В табл. 3 представлен журнал наблюдений, в котором приведены даты наблюдений, телескопы и приборы, на которых они проводились, экспозиции и другая техническая информация, а также измеренные красные смещения объектов. Условия,

при которых велись наблюдения: темное время (фаза Луны меньше 0.5), размер турбулентных дисков звезд (seeing) меньше 2.5 угл. сек. Звезды из списка спектрофотометрических стандартов Европейской Южной обсерватории² использовались для перерасчета инструментальных потоков в абсолютные.

Описание телескопов и их приборов

Наблюдения на 1.5-м телескопе РТТ-150 были выполнены на приборе TFOSC, оснащенном

²<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

Таблица 3. Журнал наблюдений

№	Источник SRGE гг/мм/дд	Дата	Телескоп	Решетка	Щель угл. сек	Эксп.	РА, град	z
1	J002336.1–014002	2021/10/27	КГО	TDS	1.5	3×1200	0	0.067
2	J003427.0+181141	2021/10/27	АЗТ-ЗЗИК	600G	2	4×600	0	0.144
		2022/11/16	АЗТ-ЗЗИК	600G	2	6×600	0	0.144
		2022/11/16	АЗТ-ЗЗИК	600R	2	7×600	0	0.144
3	J011943.6–024144	2021/12/30	БТА	940@600	2	3×900	1	0.125
4	J015444.7–070012	2021/12/30	БТА	940@600	2	4×600	0	0.081
5	J020320.5+233624	2021/10/27	КГО	TDS	1	5×1200	0	0.041
6	J020642.9+333911	2021/08/29	БТА	940@600	2	3×900	13	0.284
7	J030747.7+401841	2021/10/09	АЗТ-ЗЗИК	600G	1	3×600	0	0.018
		2021/10/09	КГО	TDS	1	2×1200	71	0.018
8	J050948.4+695221	2021/10/01	АЗТ-ЗЗИК	600G	2		0	0.084
9	J104258.5+550347	2021/11/22	КГО	TDS	1.5	6×1200	31	0.118
10	J135438.2+703310	2021/12/05	КГО	TDS	1	5×1200	133	0.496
		2021/12/30	БТА	1026@735	1	4×900	312	0.496
11	J163807.7+240048	2021/05/11	RTT150	G15	1.8	7×600	90	0.100
12	J170853.0+641641	2021/11/07	БТА	940@600	1.0	4×300	254	0.081
13	J171759.2+500240	2021/10/09	КГО	TDS	1.5	4×1200	78	0.092
14	J180028.3+482216	2021/11/08	RTT150	G15	1.8	10×300	90	0.049
15	J204129.5+214408	2021/06/28	RTT150	G15	1.8	3×300	90	0.110

Примечание. Дата — дата начала ночи, когда был получен спектр объекта, Телескоп — телескоп, на котором был получен спектр, Решетка — диспергирующий элемент, Щель — ширина щели в угловых секундах, Эксп. — число экспозиций и время отдельной экспозиции, РА — позиционный угол в градусах (отсчитывается против часовой стрелки от направления на северный полюс мира), z — спектроскопическое красное смещение.

в 2019 г. новой высокочувствительной матрицей фирмы Andor (модель *DZ936N*) с чипом *BEX2* — *DD³* формата 2048×2048 пикселей размером 13.5 мкм, с охлаждением -80°C . Использовалась гризма № 15 со входной щелью 0.100 мм (1.8 угл. сек), позволяющая регистрировать спектр в диапазоне $\lambda 3800 - 8880 \text{ \AA}$ со спектральным разрешением $FWHM = 12 \text{ \AA}$.

³<https://andor.oxinst.com/products/ikon-xl-and-ikon-large-ccd-series/ikon-1-936>

Спектроскопия источников на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК проводилась с помощью спектрографа АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016). Основные конструктивные элементы спектрографа: ПЗС-матрица Andor Newton 920 с эффективностью около 90% в диапазоне от 4000 до 8500 $\text{\AA}$ и набор диспергирующих элементов (объемно-фазовых голографических решеток) с разрешающей способностью $R = 60$: VPHG600G с рабочим диапазоном 3700–7340 $\text{\AA}$ и разрешени-

ем $FWHM = 4.3 \text{ \AA}$; VPHG600R с рабочим диапазоном $6460\text{--}10\,050 \text{ \AA}$ и разрешением $FWHM = 6.1 \text{ \AA}$. Разрешение приведено для щели шириной 1 угл. сек.

Наблюдения на Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ были выполнены с помощью двухлучевого спектрографа TDS (Transient Double-beam Spectrograph)⁴, установленного на 2.5-м телескопе RC2500. Регистрация спектра производилась в диапазоне $3600\text{--}7500 \text{ \AA}$ с разрешающей силой $1300\text{--}2500$ при ширине щели $1''$. Подробное описание прибора изложено в статье Потанина и др. (2020). Конструктивные улучшения, произведенные после 18 мая 2021 г., описаны в статье Додина и др. (2021). Непосредственно после измерений каждого объекта на спектрографе TDS выполнялись калибровочные измерения звезды-стандарта из списка ЕЮО <https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>.

Спектрограф TDS обладает наилучшим спектральным разрешением и высокой квантовой эффективностью в голубой части спектра. Поэтому этот прибор является наиболее предпочтительным для исследования источников на $z < 0.13$, в спектрах которых линии $H\alpha$ и $[NII]$ ($6586 \text{ \AA}$) не выходят за пределы рабочего диапазона TDS.

Наблюдения на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН проводились с помощью многорежимного редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO-2 (Афанасьев и др., 2011) в режиме спектроскопии с длинной щелью. В качестве детектора применялись ПЗС-матрицы E2V 261-84 и E2V 42-90 (в сентябре 2020 г.), имеющие пиковую квантовую эффективность 95% и позволяющие проводить наблюдения в диапазоне $3600\text{--}10\,000 \text{ \AA}$. Квантовая эффективность ПЗС-матриц на длине волны $9000 \text{ \AA}$ составляет около 50% . Для наблюдений применялись объемные фазовые голографические решетки VPHG940@600 и VPHG1026@735.

В основном наблюдения кандидатов в сильно переменные рентгеновские источники ведутся с гризмой VPHG940@600 с широким рабочим диапазоном $3500\text{--}8500 \text{ \AA}$ обратной дисперсией $1.16 \text{ \AA/пикс}$ и спектральным разрешением $FWHM^5 = 7.0 \text{ \AA}$. Гризма VPHG1026@735 с рабочим диапазоном $5800\text{--}9500 \text{ \AA}$, обратной дисперсией $1.02 \text{ \AA/пикс}$ и $FWHM = 6.1 \text{ \AA}$ применяется в случаях, когда область предполагаемого нахождения линии $H\alpha$ оказывается за пределами

рабочего диапазона гризмы VPHG940@600 или возникает необходимость доснять область вокруг $H\alpha$ с лучшим качеством.

Особенности обработки спектральных данных

Спектры получены в режиме длинной щели. В щель попадает только часть потока протяженной галактики, и в зависимости от ориентации и ширины щели, а также погодных условий может варьироваться наблюдаемое соотношение между потоками в эмиссионных линиях и континууме. Это особенно важно для галактик с линиями эмиссии, связанными со звездообразованием или активностью ядра. Предполагается, что какие-то объекты из выборки потребуют проведения повторных наблюдений для выявления изменений в спектре. Поэтому для воспроизводимости результата мы приводим в табл. 3 ширину щели и позиционный угол. Позиционный угол поворота щели отсчитывается против часовой стрелки от направления на северный полюс мира.

Для измерения светимостей в линии $[OIII] 5007 \text{ \AA}$ требуется калибровка абсолютного потока, поэтому мы нормируем наши спектры на архивные данные фотометрии в фильтре g , взятые из обзоров SDSS и Pan-STARRS. Обзор, данные из которого были использованы для нормировки, указан в столбце “SR” табл. 2. Обсуждаемые объекты имеют протяженную структуру на оптических изображениях. Для измерения потоков протяженных источников из обзора SDSS используется модельная звездная величина (modelMag). Для обзора Pan-STARRS используется звездная величина, измеренная методом Крона (rKronMag). Недостатком нормировки спектра на полный поток излучения от галактики является то, что мы можем переоценить вклад в спектр излучения из ее центральной области, а следовательно, завысить светимость эмиссионных линий АЯГ, в частности $[OIII] 5007 \text{ \AA}$.

Данные, полученные на телескопах РТТ-150, АЗТ-ЗЗИК, БТА, обрабатывались ПО *pyraf*⁶, а также ПО, разработанным в группе оптической поддержки СРГ/еРОЗИТА. Техника обработки спектральных данных спектрографа ТДС 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ подробно описана в статьях Потанина и др. (2020), Додина и др. (2020, 2021). Спектры источников исправлены за поглощение в Галактике, которое приведено в табл. 2. Использовались стандартный закон поглощения $R_V = 3.1$ и кривая модели экстинкции из статьи (Фишпатрик, 2019). Эта модель включена в пакет *astropy* (Коллаборация astrophysics, Прайс-Велан и др., 2022).

⁴<https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/tds/>

⁵Спектральное разрешение для щели шириной 1 угл. сек

⁶<https://pypi.org/project/pyraf>

Характеристики эмиссионных линий

Подгонка параметров моделей эмиссионных линий и континуума осуществлялась с помощью ПО *pyspeckit* (Гинсбург и др., 2022). Форма континуума описывалась многочленом 3–5 степени. Области континуума, над которыми находятся линии эмиссии и области теллурических линий, исключались при подгонке континуума. Формы эмиссионных линий описывались функцией Гаусса.

Для классификации мы используем параметры следующих эмиссионных линий: узкие линии бальмеровской серии водорода $H\alpha$ (6563 Å) и $H\beta$ (4861 Å), узкие линии кислорода [OIII] (4959, 5007 Å), узкие линии азота [NII] (6548 и 6583 Å). Также производится поиск широких бальмеровских линий $H\alpha$, $H\beta$ и широкой линии $HeII$ (4686 Å).

Подгонка линий, сгруппированных вокруг $H\alpha$ и $H\beta$, проводится независимо. При поиске оптимальной модели мы движемся от наиболее простого набора узких линий с независимыми параметрами к более сложным моделям. Параметры широких линий всегда оставляем свободными. Если спектрального разрешения недостаточно, чтобы разделить линии $H\alpha$ и [NII], то требуем, чтобы ширины (σ) узких линий $H\alpha$ и [NII] (6548 Å) были равны ширине линии [NII] (6583 Å), а расстояние между линиями было фиксировано. Если модельный спектр из узких компонент $H\alpha$ и [NII] восстанавливает форму спектра не полностью, то дополнительно вводится широкая компонента $H\alpha$. Если находим широкую бальмеровскую компоненту $H\beta$, то всегда требуем наличие соответствующей узкой компоненты с фиксированной шириной, равной [OIII] (5007 Å). Для спектрографов низкого разрешения наблюдаемая ширина узких линий ограничена приборным разрешением. Амплитуда всех эмиссионных компонент должна быть положительной.

В табл. 5 из Приложения представлены измеренные характеристики эмиссионных линий для нашей выборки.

КРИТЕРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ СПР В ОБЗОРЕ СРГ/еРОЗИТА

События приливного разрушения, вошедшие в первую опубликованную выборку обзора СРГ/еРОЗИТА (Сазонов и др., 2021), имеют красные смещения от $z = 0.036$ до $z = 0.581$ и рентгеновские светимости от $\sim 5 \times 10^{42}$ до $\sim 10^{45}$ эрг s^{-1} (в диапазоне энергий 0.2–6 кэВ в системе покоя источника). На их основе было показано, что функция рентгеновской светимости в максимуме СПР может быть описана степенным

законом ($dN/d \log L_X$) с наклоном -0.6 ± 0.2 . Так как мы затем понизили критерий переменности между отдельными обзорами СРГ/еРОЗИТА с $R > 10$ до $R > 7$ при поиске СПР, то можно ожидать, что мы будем находить как более далекие, так и менее яркие СПР. Это действительно происходит.

С другой стороны, функция рентгеновской светимости АЯГ может быть описана в широком диапазоне (от $\sim 10^{41}$ до $\sim 10^{46}$ эрг/с) двухстепенным законом с характерной светимостью $\sim 10^{43.5} - 10^{44}$ эрг s^{-1} на $z \lesssim 1$ (см., например, Уеда и др., 2014; Сазонов и др., 2015). Таким образом, население АЯГ характеризуется практически тем же диапазоном рентгеновских светимостей, что и население СПР, но при этом гораздо более многочисленно. Причем все АЯГ являются переменными рентгеновскими источниками на масштабах времени больше нескольких дней (а часто и на более коротких), а характер переменности некоторых из них может напоминать вспышечный (Медведев и др., ПАЖ, в печати) и имитировать СПР.

Для того чтобы отличить СПР от сильно переменных АЯГ, можно было бы использовать информацию о рентгеновских спектрах, так как СПР обычно характеризуются мягкими спектрами, а АЯГ — жесткими. Однако этот критерий нельзя считать надежным, так как известны как СПР с жесткими спектрами (особенно на поздних стадиях их эволюции, например, Комосса и др., 2004; Веверс и др., 2021; Сазонов и др., 2021), так и АЯГ с мягкими спектрами (Боллер и др., 1996). Кроме того, так как мы ищем и исследуем слабые (по потоку) рентгеновские транзиенты, то фотонов, зарегистрированных телескопом СРГ/еРОЗИТА, не всегда хватает для получения сильных ограничений на форму спектра. Поэтому мы не используем прямую спектральную рентгеновскую информацию для отбора и отождествления СПР.

Проблема отделения СПР от АЯГ активно обсуждается в литературе. В ряде работ (Заблудовф и др., 2021; ван Вельзен и др., 2021) были описаны критерии, по которым удается эффективно выделять СПР среди транзиентов, открываемых в оптическом и УФ-диапазонах энергий, в первую очередь, в обзоре ZTF. Большинство таких событий являются “оптически-яркими”, с отношением светимостей в оптике и рентгене порядка или больше единицы. В спектрах таких СПР, полученных вблизи максимума кривой блеска, часто обнаруживаются широкие эмиссионные линии и ультрафиолетовый избыток. Ширина эмиссионных линий может превышать 20 000 км/с, что практически никогда не наблюдается у АЯГ. Смещения пиков эмиссионных линий $HeII$ (4686 Å) и HeI (5876 Å), наблюдаемые в СПР спустя десятки дней после

максимума блеска, в большинстве случаев не превышают 5000 км/с (Чарлампоулос и др., 2022). Поэтому на рис. 5 из Приложения, где показаны результаты подгонки профилей спектральных линий, мы выделили область вокруг центров линий He II (4686 Å) и He I (5876 Å), в которой можно было бы ожидать увидеть следы широких эмиссионных линий СПР (Заблудовф и др., 2021; ван Вельзен и др., 2021).

Выделяют 4 класса СПР, отобранных в оптике (ван Вельзен и др., 2021; Хаммерстейн и др., 2022): 1) TDE-H — в оптическом спектре наблюдаются широкие бальмеровские линии, 2) TDE-H+He — есть широкие бальмеровские линии и широкая линия He II, 4686 Å, 3) TDE-He — есть только широкая линия He II, 4) TDE-featureless — присутствует голубой УФ-избыток, но нет широких эмиссионных линий.

В работе Сазонова и др. (2021) было показано, что СРГ/еРОЗИТА открывает в рентгене в основном СПР, которые почти или совсем не проявляют себя в оптике. Обычно в их оптическом спектре прослеживается только излучение звездного населения родительской галактики. Поэтому классификацию СПР следует дополнить 5-м типом — “СПР со спектром родительской галактики” (“TDE-host”).

По всей видимости, эти эмпирические различия в основном отражают истинное разнообразие наблюдаемых и внутренних свойств СПР. Однако существенную роль может играть и оперативность проведения оптических наблюдений. Из-за 6-месячной скважности наблюдений СРГ/еРОЗИТА и того, что СПР обычно затухают в рентгене на характерном масштабе времени порядка нескольких месяцев, СРГ/еРОЗИТА обычно регистрирует СПР уже на стадии спада светимости, а оптический спектр нам обычно удастся снять спустя еще несколько месяцев. Поэтому в полученном оптическом спектре, как правило, будет наблюдаться только родительская галактика, даже если на более яркой (пропущенной) стадии в спектре и были какие-то транзиентные особенности.

С другой стороны, широкие бальмеровские линии в спектрах АЯГ можно ошибочно принять за признак оптически-яркого СПР. Принимая во внимание вышеизложенное, предлагается следующая последовательность действий для распознавания СПР среди внегалактических транзиентов СРГ/еРОЗИТА на основе оптической спектроскопии и фотометрических признаков:

1. Проверить ИК-цвет $W1 - W2$ по данным обзора WISE.

2. Проверить наличие широких и узких эмиссионных линий в спектре.
3. Измерить отношение светимостей в рентгене и в узкой запрещенной линии [OIII] (5007 Å) или получить нижний предел на это отношение.
4. Если в спектре есть набор узких эмиссионных линий $H\beta$, [OIII] (5007 Å), $H\alpha$, [NII] (6583 Å), то использовать диагностическую диаграмму Балдуина—Филлипса—Терлевица (BPT) для классификации АЯГ и галактик со звездообразованием.
5. Если в спектре присутствуют только узкие эмиссионные линии $H\alpha$, [NII] (6583 Å), то использовать вместо диаграммы BPT диаграмму, предложенную в работах (Сид Фернандес и др., 2010, 2011), в которой вместо отношения потоков в линиях [OIII] (5007 Å) и $H\beta$ используется эквивалентная ширина линии $H\alpha$ — так называемая диаграмма WHAN.

Если оказывается, что $W1 - W2 > 0.8$, то такой объект может считаться АЯГ с высокой степенью надежности (Стерн и др., 2012; Ассеф и др., 2013). Как уже отмечалось, мы применяем это критерий еще на стадии предварительного отбора объектов для оптической спектроскопии, причем обратное условие ($W1 - W2 < 0.8$) не позволяет отличить СПР от АЯГ низкой светимости.

В случае обнаружения широких эмиссионных линий водорода и/или гелия явными признаками СПР могут считаться: их очень большая ширина ($\gtrsim 15000$ км/с), отношение потоков в линиях HeII (4686 Å) и $H\alpha$ больше единицы, слабая (по сравнению с другими широкими линиями) эмиссионная линия MgII (2800 Å). Более подробно эти характерные признаки оптически-ярких СПР обсуждаются в уже упомянутых работах (Заблудовф и др., 2021; Хаммерстейн и др., 2022). В данной работе такие объекты не рассматриваются. Если в спектре нет не только широких, но и узких эмиссионных линий, то такой объект следует считать надежным кандидатом в СПР типа TDE-host.

Наличие достаточно мощного излучения в узкой запрещенной линии [OIII] (5007 Å) позволяет связать наблюдаемую активность в рентгене с присутствием АЯГ, т.е. с долговременной (тысячи лет) аккрецией вещества на центральную сверхмассивную черную дыру. Для сейфертовских галактик светимости в рентгене и в линии [OIII] скоррелированы

(Хекман и др., 2005): в среднем $\lg(L_{[\text{OIII}]} / L_{\text{H}\alpha}) = -1.99$ с умеренным разбросом ($\sigma = 0.63$) (Уеда и др., 2015), где $L_{\text{H}\alpha}$ — внутренняя светимость в диапазоне 2–10 кэВ. Рабочий диапазон энергий в обзоре СРГ/еРОЗИТА — 0.3–2.2 кэВ. Так как рентгеновские спектры непоглощенных АЯГ (а именно, такие в основном находит СРГ/еРОЗИТА) обычно характеризуются наклоном (фотонный индекс) около 1.8, то для таких объектов светимость в наблюдаемом диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ (L_X) оказывается примерно равной внутренней светимости в диапазоне 2–10 кэВ, т.е. $L_X / L_{\text{H}\alpha} \approx 1$. Поэтому измеренное значение $L_X / L_{[\text{OIII}]}$ $> 10^3$ будет сильным указанием на то, что мы имеем дело с СПР, а не с АЯГ. Такая диагностика уже использовалась нами ранее в работе Сазонова и др. (2021). Для расчета рентгеновской светимости ниже используется максимальное значение рентгеновского потока среди отдельных обзоров СРГ/еРОЗИТА. В случае отсутствия линии [OIII] (5007 Å) в спектре используется верхний предел 3σ на поток в этой линии.

Однако надо иметь в виду, что если СПР произойдет в галактике с сильным звездообразованием, то отношение $L_X / L_{[\text{OIII}]}$ может оказаться в области значений, характерных для АЯГ. Так, в выборке галактик с эмиссионными линиями из спектроскопического обзора GAMA (Яо и др., 2020), АЯГ (классифицируемые по эмиссионным линиям) имеют светимости $\lg(L_{[\text{OIII}]}) > 41.2$ эрг/с, но на меньших светимостях уже доминируют звездообразующие галактики.

Поэтому, чтобы исключить АЯГ, следует также использовать диаграмму ВРТ (Болдуин и др., 1981). Для этого требуется измерить потоки в узких линиях H β , [OIII] (5007 Å), H α , [NII] (6583 Å). Объекты, попавшие в область галактик со звездообразованием (SF, ниже линии Кауфманн и др., 2003), и АЯГ с областями низкой ионизации (LINER, участок, ограниченный линиями Кюлей и др., 2001, и Шавински и др., 2007) с рентгеновской светимостью выше 10^{42} эрг/с могут рассматриваться как достаточно надежные кандидаты в СПР. Дело в том, что объекты типа LINER (в отсутствие СПР) обычно имеют более низкую рентгеновскую светимость, $\lg(L_{X,0.5-2 \text{ keV}}) = 40.9 \pm 1.2$ (Гонзалес-Мартин и др., 2009). При отсутствии эмиссионных линий H β и [OIII] (5007 Å) вместо диаграммы ВРТ можно использовать диаграмму WHAN, которая тоже позволяет выделять галактики с активным ядром по эквивалентной ширине линии H α (EW H α) и соотношению между потоками в линиях H α , [NII] (6583 Å). Если эмиссионная линия H β

отсутствует в спектре, то мы используем данную диаграмму вместо ВРТ.

Все эти критерии нужно использовать в совокупности для отбора вероятных кандидатов в СПР. Это позволит ранжировать переменные источники, выделив наиболее вероятные кандидаты в СПР и источники, которые требуют дополнительных данных для классификации. В следующем разделе мы покажем, как работают эти критерии на примере нашей выборки.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 4 для исследуемой выборки собрана информация о максимальной рентгеновской светимости в диапазоне 0.3–2.2 кэВ, светимости в линии [OIII] (5007 Å) ($L_{[\text{OIII}]}$), их отношении $L_X / L_{[\text{OIII}]}$ и красном смещении. На рис. 3 показано соотношение между рентгеновской светимостью (L_X) и светимостью в линии [OIII] (5007 Å) ($L_{[\text{OIII}]}$), а также зависимость отношения $L_X / L_{[\text{OIII}]}$ от ИК-цвета $W1-W2$. На рис. 4 для подвыборки объектов с эмиссионными линиями в спектре показаны диаграммы ВРТ и WHAN. Опираясь на эти графики и изложенные выше критерии, мы классифицируем объекты как родительские галактики СПР (TDE-host), АЯГ с широкими оптическими линиями в спектре (BLAGN), АЯГ с узкими линиями в спектре (NLGN) или объекты со спорной классификацией, что отражено в предпоследнем столбце табл. 4. Некоторые важные подробности изложены ниже.

Замечания по отдельным источникам

SRGE J002336.1–014002. Источник был виден уже в первом обзоре неба 2019/12/14–15 СРГ/еРОЗИТА. Достиг максимума во втором обзоре 2020/06/12–13. В четвертом обзоре не детектировался. Не имеет эмиссионных линий в оптическом спектре и характеризуется большим отношением $\lg(L_X / L_{[\text{OIII}]}) > 4.20$. Поэтому, принимая во внимание его исчезновение в четвертом обзоре СРГ/еРОЗИТА, практически нет сомнений, что это СПР. Является типичным представителем объектов типа TDE-host.

SRGE J003427.0+181141. В спектре объекта присутствует широкая линия H α . Кроме того, он характеризуется обычным для АЯГ соотношением $L_X / L_{[\text{OIII}]}$ и попадает в область сейфертовских галактик на диаграмме WHAN. Поэтому его можно надежно отнести к АЯГ первого или промежуточного типа.

Таблица 4. Светимости, красные смещения и классификация источников

№	Источник SRGE	L_X , эрг/сек	$L_{[\text{OIII}]}$, эрг/сек	$\lg(L_X/L_{[\text{OIII}]})$	Класс	z
1	J002336.1–014002	$2.4 \pm 0.2 \times 10^{43}$	$<1.5 \times 10^{39}$	>4.19	TDE-host	0.067
2	J003427.0+181141	$1.5 \pm 0.3 \times 10^{43}$	$6.7 \pm 0.9 \times 10^{40}$	2.35	BLAGN	0.144
3	J011943.6–024144	$6.9 \pm 0.2 \times 10^{42}$	$2.30 \pm 0.02 \times 10^{41}$	1.48	BLAGN/NLAGN	0.125
4	J015444.7–070012	$2.8 \pm 0.5 \times 10^{42}$	$<2.8 \times 10^{40}$	>1.99	BLAGN	0.081
5	J020320.5+233624	$2.8 \pm 0.3 \times 10^{42}$	$5.1 \pm 0.8 \times 10^{38}$	3.74	TDE-host	0.041
6	J020642.9+333911	$9.3 \pm 0.1 \times 10^{43}$	$<1.2 \times 10^{41}$	>2.89	TDE-host	0.284
7	J030747.7+401841	$5.9 \pm 0.2 \times 10^{42}$	$<4.5 \times 10^{38}$	>4.11	TDE-host	0.018
8	J050948.4+695221	$4.5 \pm 0.7 \times 10^{42}$	$4.3 \pm 0.4 \times 10^{40}$	2.01	BLAGN	0.085
9	J104258.5+550347	$6.7 \pm 1.8 \times 10^{42}$	$3.1 \pm 0.1 \times 10^{40}$	2.34	BLAGN	0.118
10	J135438.2+703310	$1.9 \pm 0.5 \times 10^{44}$	$<8.7 \times 10^{40}$	>3.32	TDE-host	0.496
11	J163807.7+240048	$3.7 \pm 0.8 \times 10^{42}$	$1.3 \pm 0.2 \times 10^{41}$	1.47	BLAGN/NLAGN	0.100
12	J170853.0+641641	$4.2 \pm 0.5 \times 10^{42}$	$<6.3 \times 10^{39}$	>2.83	AGN/TDE-host	0.081
13	J171759.2+500240	$3.0 \pm 0.4 \times 10^{42}$	$1.19 \pm 0.08 \times 10^{40}$	2.41	NLAGN	0.092
14	J180028.3+482216	$9.4 \pm 0.4 \times 10^{42}$	$<2.4 \times 10^{40}$	>2.59	AGN/TDE-host	0.049
15	J204129.5+214408	$6.5 \pm 0.6 \times 10^{43}$	$<1.0 \times 10^{41}$	>2.80	TDE-host	0.110

Примечание. L_X — максимальная наблюдаемая светимость в диапазоне 0.3–2.2 кэВ, $L_{[\text{OIII}]}$ — светимость в линии [OIII] (5007 Å) в системе покоя квазара или верхний предел, $\lg(L_X/L_{[\text{OIII}]})$ — десятичный логарифм отношения светимостей, Класс источника: TDE-host — СПР, в оптическом спектре которого видно только излучение родительской галактики, BLAGN — АЯГ с широкими линиями в спектре, NLAGN — АЯГ с узкими линиями в спектре, AGN/TDE-host — источник, класс которого остается неопределенным.

SRGE J011943.6–024144. В спектре объекта есть узкие эмиссионные линии и слабая широкая компонента H β . На диаграмме BPT объект располагается в области композитных галактик, почти на границе с сейфертовскими галактиками. Отношение $L_X/L_{[\text{OIII}]}$ соответствует АЯГ. Принимая во внимание неуверенное детектирование широкой компоненты линии H β и отсутствие широкой компоненты у линии H α , мы не можем однозначно классифицировать этот объект как сейфертовскую галактику 1-го или 2-го типа.

SRGE J01544.7–070012. В оптическом спектре присутствует широкая эмиссионная линия H α . Линии H β и [OIII] не детектируются, поэтому не

удается использовать диаграмму BPT. На диаграмме WHAN объект попадает в область галактик типа LINER, однако узкие линии N[II] и H α выделяются ненадежно на фоне широкой компоненты H α . Измеренный нижний предел на отношение $L_X/L_{[\text{OIII}]}$ согласуется как с АЯГ, так и с СПР. По совокупности фактов мы классифицируем объект как АЯГ первого или промежуточного типа.

SRGE J020320.5+233624. На этом месте в обзоре ZTF был обнаружен оптический транзиент ZTF19abwsmk с максимальной звездной величиной $g = 18.4$ (MJD 766), который детектировался в фильтре g с 2019/09/04 по 2019/11/19. Источник был виден в первом обзоре СРГ/еРОЗИТА

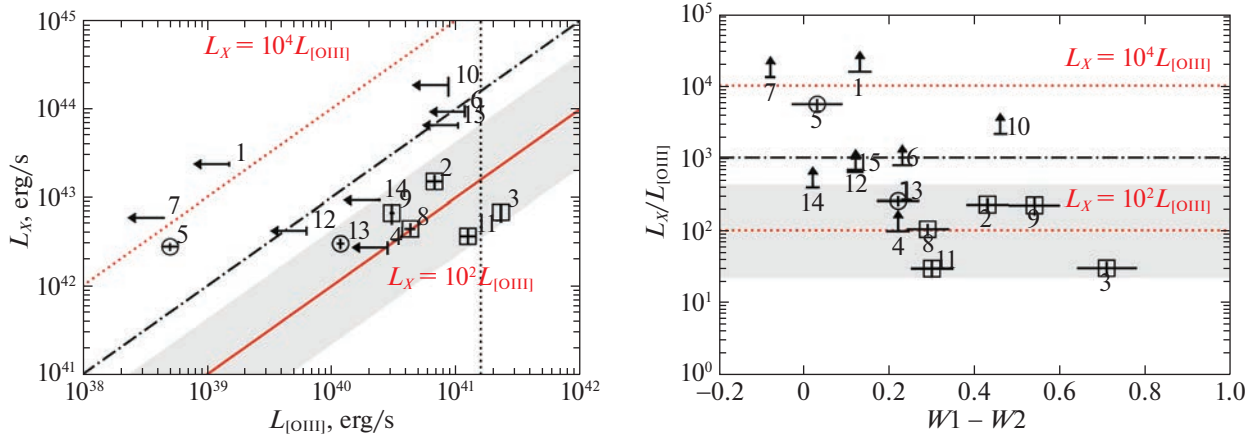


Рис. 3. Слева: Рентгеновская светимость, L_X , рассчитанная через значение максимального потока в обзоре СРГ/еРОЗИТА, и светимость в линии [ОIII] (5007 Å), $L_{\text{[OIII]}}$. Справа: Отношение $L_X/L_{\text{[OIII]}}$ в зависимости от ИК цвета $W1-W2$ (Vega). Кружками отмечены объекты, в спектре которых есть только узкие эмиссионные линии, квадратами — объекты, в спектре которых есть хотя бы одна широкая бальмеровская линия. Для объектов, в спектре которых отсутствует линия [ОIII] (5007 Å), показаны соответствующие верхние пределы. Вертикальной линией $\lg(L_{\text{[OIII]}}/A.2)$ показана эмпирическая граница между АЯГ и звездообразующими галактиками для обзора GAMA (Яо и др., 2020). Серым цветом закрашена область, в которой обычно располагаются АЯГ: в среднем $\lg(L_{\text{[OIII]}}/L_X) = -1.99$, с разбросом $\sigma = 0.63$ (Яо и др., 2015), а черным штрихпунктиром — отношение $L_X/L_{\text{[OIII]}} = 10^3$, которое мы предлагаем использовать для отделения кандидатов в СПР (более высокие значения) от АЯГ.

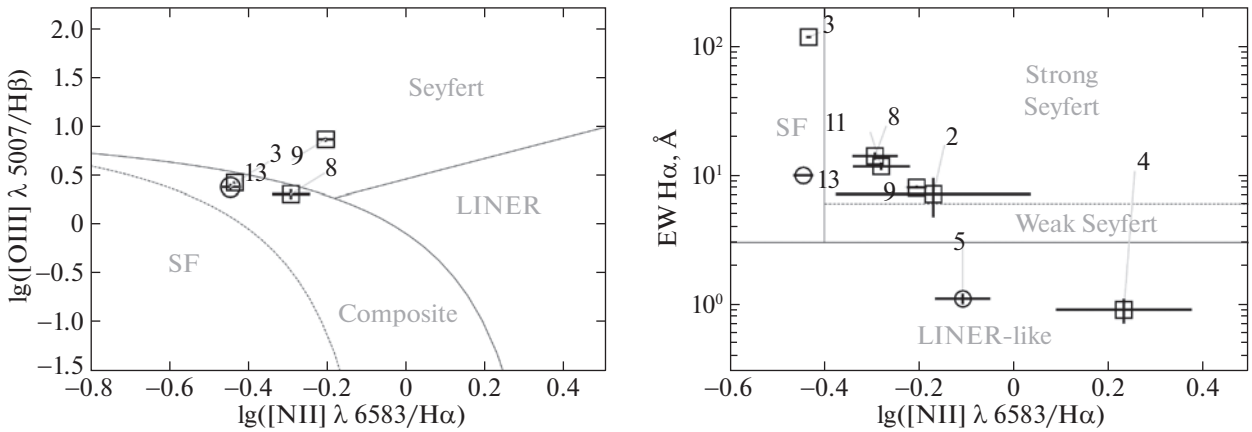


Рис. 4. Диаграммы BPT (слева) и WHAN (справа) для классификации АЯГ и галактик с активным звездообразованием, основанные на соотношениях потоков в узких эмиссионных линиях. Кружками показаны объекты, в спектре которых есть только узкие линии, квадратами — объекты, у которых есть хотя бы одна широкая бальмеровская линия в спектре.

(2020/01/24–25). В последующих двух сканах он становился только ярче в рентгене, а в 4-м обзоре погас. В оптическом спектре есть только узкие эмиссионные линии, причем $H\beta$ не видна. Поэтому для классификации использовалась диаграмма WHAN. На ней объект попадает в область галактик типа LINER. Наблюдаемые в спектрах таких галактик узкие эмиссионные линии могут быть в основном связаны с ионизацией межзвездной среды излучением звезд, а не с активностью ядра (Сид Фернандес и др., 2011). Принимая во внимание высокую рентгеновскую светимость ($\sim 3 \times 10^{42}$ эрг/с

в максимуме) и большое отношение $L_X/L_{\text{[OIII]}} \sim 5000$, можно заключить, что в этой галактике, скорее всего, произошло СПР.

SRGE J030747.7+401841. Этот объект уже был известен ранее как оптический транзист *AT2021ehb/ZTF21aanxhjv* и детально исследовался в работе (Яо и др., 2022), где он был классифицирован как СПР без эмиссионных линий, но с голубым избытком в оптическом спектре (TDE-featureless, см. Хаммерстейн и др., 2022). В той же работе было показано, что с течением времени

оптический спектр постепенно эволюционировал до чистого спектра р-одительской галактики.

В полученном нами оптическом спектре тоже видно только излучение родительской галактики, поэтому мы классифицируем объект как TDE-host. Мы включили этот ранее известный СПР (независимо отобранный нами в рентгеновском обзоре СРГ/еРОЗИТА) в нашу выборку, чтобы продемонстрировать, что детальная классификация СПР существенно зависит от того, на какой фазе эволюции транзиента проводятся оптические наблюдения.

SRGE J163807.7+240048. На этом месте в обзоре ZTF был обнаружен оптический транзиент ZTF18abbpvmе, который наблюдался в период с 2021/01/07 по 2021/02/14. Примерно в то же время (2021/02/16–18) он был обнаружен в ярком рентгеновском состоянии в обзоре СРГ/еРОЗИТА. По всем признакам (расположение на диаграмме WHAN, отношение $L_X/L_{[\text{OIII}]}$, указание на наличие широкой эмиссионной линии $H\alpha$), это АЯГ первого или второго типа.

SRGE J170853.0+641641. Источник детектируется в 1-м и 2-м обзорах СРГ/еРОЗИТА, не регистрируется в 3-м и снова детектируется, на низком уровне, в 4-м. В оптическом спектре нет эмиссионных линий. Нижний предел на отношение $L_X/L_{[\text{OIII}]}$ указывает на то, что это, вероятно, не АЯГ. Однако немонотонный характер спада рентгеновского потока не характерен для СПР. Таким образом, природа этого объекта остается под вопросом.

SRGE J171759.2+500240. В спектре есть только узкие эмиссионные линии. По отношению $L_X/L_{[\text{OIII}]}$ объект можно отнести к АЯГ. На диаграмме ВРТ он располагается в области композитных галактик. По всей видимости, это АЯГ второго типа с низкой светимостью ($L_X \sim 2.5 \times 10^{42}$ эрг/с).

SRGE J180028.3+482216. На этом месте в обзоре ZTF был обнаружен оптический транзиент ZTF18abcgjpn, который проявил себя в период с 2018/07/06 по 2018/09/17. Источник детектируется во всех 4 обзорах СРГ/еРОЗИТА, спустя несколько лет после оптической вспышки, причем рентгеновский поток изменяется немонотонно. Это не похоже на поведение обычных СПР. Однако в оптическом спектре нет никаких эмиссионных линий, характерных для АЯГ, а по нижнему пределу на отношение $L_X/L_{[\text{OIII}]}$ объект может быть как АЯГ, так и СПР. Таким образом, природа этого объекта остается под вопросом.

SRGE J204129.5+214408. Источник был обнаружен как рентгеновский транзиент в третьем

обзоре неба СРГ/еРОЗИТА (2021/05/11–12). За месяц до этого (2021/04/03–07) в этом месте случилась оптическая вспышка ZTF21aatgiaq. В спектре, полученном нами в конце июля 2021 г., не было обнаружено эмиссионных линий. Полученный нижний предел на отношение светимостей $L_X/L_{[\text{OIII}]}$ указывает на то, что это, вероятно, не АЯГ.

Таким образом, мы приходим к выводу, что это СПР. На основе полученного спектра мы приписываем ему тип TDE-host, но обнаружение достаточно яркой оптической вспышки в обзоре ZTF указывает на то, что на более ранней стадии эволюции он мог принадлежать к одному из подклассов оптически-ярких СПР.

Вывод по поводу предварительного отбора кандидатов в СПР. Ряд объектов выборки, которые были выше классифицированы как СПР (TDE-host), были бы пропущены, если бы при предварительном отборе кандидатов в СПР требовалось, чтобы транзиент, обнаруженный в каком-либо из обзоров СРГ/еРОЗИТА, не регистрировался во всех предыдущих обзорах. Именно такой строгий критерий использовался в работе Сазонова и др. (2021) для составления первой выборки СПР из обзора всего неба СРГ. Так, источник SRGE J002336.1–014002, классифицированный здесь как СПР, был обнаружен в 1-м обзоре СРГ/еРОЗИТА, затем стал ярче во 2-м, ослаб в 3-м и ушел под порог детектирования в 4-м. Или, например, источник SRGE J135438.2+703310, также классифицированный как СПР, появился в 1-м обзоре, затух во 2-х, затем снова стал ярким в 3-м и снова ослаб в 4-м. Высокая чувствительность полугодового обзора СРГ/еРОЗИТА позволяет обнаруживать яркие и длящиеся больше полугода СПР уже на раннем этапе роста их рентгеновской кривой блеска и наблюдать остаточное излучение после вспышки (Яо и др., 2022).

Таким образом, для получения максимально полной выборки СПР по данным обзора всего неба СРГ/еРОЗИТА необходимо ослабить критерий, касающийся характера рентгеновской кривой блеска, что и было опробовано в данной работе. Однако это сопряжено с увеличением частоты встречаемости сильно переменных АЯГ среди кандидатов в СПР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты оптического спектроскопического отождествления 15 внегалактических транзиентов из обзора всего неба

СРГ/еРОЗИТА, отобранных по рентгеновской переменности между отдельными полугодовыми сканами неба. Некоторые из этих источников изначально рассматривались нами как кандидаты в СПР, другие же считались вероятными АЯГ. Рассмотрен набор критериев для дифференциации таких транзиентов, основанный на характеристиках эмиссионных линий (или отсутствии таковых) в оптическом спектре и фотометрических признаках. В частности, мы предлагаем использовать отношение рентгеновской светимости к светимости в узкой запрещенной линии [OIII] 5007 Å.

В результате нам удалось выявить 5 новых и одно ранее известное (независимо открытый в оптике) СПР, а также классифицировать 7 источников как сильно переменные АЯГ. Природа еще двух транзиентов остается под вопросом, и важно продолжить их изучение. В первую очередь может помочь продолжение их мониторинга в рентгене, чтобы установить какой характер, кратко- или долговременный, имеет активность центральной черной дыры.

Все новые СПР, представленные в этой работе, можно отнести к оптическому подклассу TDE-host. Это значит, что мы не видим в их оптическом спектре ничего кроме излучения родительской галактики. Указание на то, что в обзоре СРГ/еРОЗИТА регистрируются в основном именно такие СПР, уже было получено в работе Сазонова и др. (2021) на основе первой выборки СПР из этого обзора. Это сильно отличается от ситуации с СПР, открываемыми по их оптической переменности, например в обзоре ZTF, большинство из которых демонстрируют явные признаки кратковременной мощной аккреции вещества на центральную черную дыру галактики в оптическом спектре, такие как голубой избыток в континууме и (очень) широкие эмиссионные линии водорода и гелия.

Хотя нет сомнений, что наблюдаемые различия рентгеновских и оптических выборок СПР в основном отражают истинное разнообразие наблюдательных свойств СПР, оно частично связано и с тем, в каком порядке проводятся рентгеновские и оптические наблюдения. Дело в том, что оптический тип СПР может эволюционировать со временем. Это видно на примере источника SRGE J030747.7+401841 из рассмотренной выборки. Мы классифицировали этот транзиент как TDE-host на основе оптического спектра, полученного спустя несколько месяцев после его открытия в рентгене телескопом СРГ/еРОЗИТА, а в работе (Яо и др., 2022) было показано, что на более ранней стадии в его оптическом спектре присутствовал голубой избыток, т.е. СПР относился к типу TDE-featureless.

Описанный метод поиска и спектроскопического отождествления СПР планируется применить для классификации нескольких сотен сильно переменных источников СРГ/еРОЗИТА, спектры которых уже получены или будут получены российскими телескопами. Это позволит создать уникально большую и статистически полную выборку СПР.

Данное исследование 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 астрофизики 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. Используемые в настоящей работе данные телескопа СРГ/еРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом СРГ/еРОЗИТА, и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом СРГ/еРОЗИТА.

Поиск кандидатов в события приливного разрушения в рентгеновском обзоре всего неба орбитальной обсерватории СРГ и анализ представленных в статье данных телескопа СРГ/еРОЗИТА проводились при поддержке гранта РФ 19-12-00396 (ГХ, СС, РК). Наблюдения объектов на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, обработка и анализ последующих спектральных данных телескопа проводились при поддержке гранта РФ 21-12-00210 (АБ, КП).

Работа И.Ф. Бикмаева частично финансировалась за счет субсидии Минобрнауки РФ № FZSM-2023-0015, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Наблюдения объектов на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Наблюдения на телескопах CAO РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая

ПРИЛОЖЕНИЕ

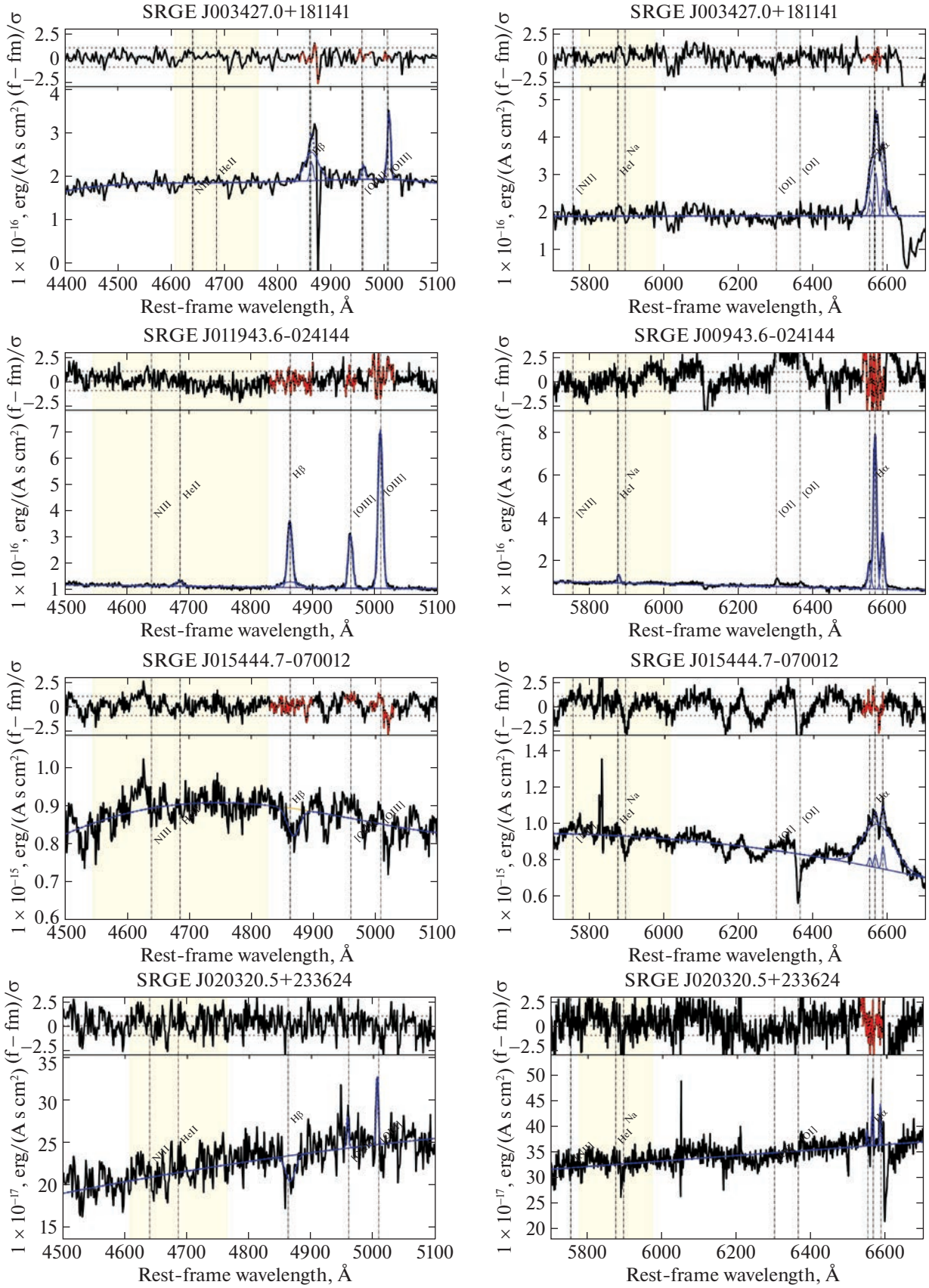


Рис. 5. Подгонка параметров моделей спектральных линий.

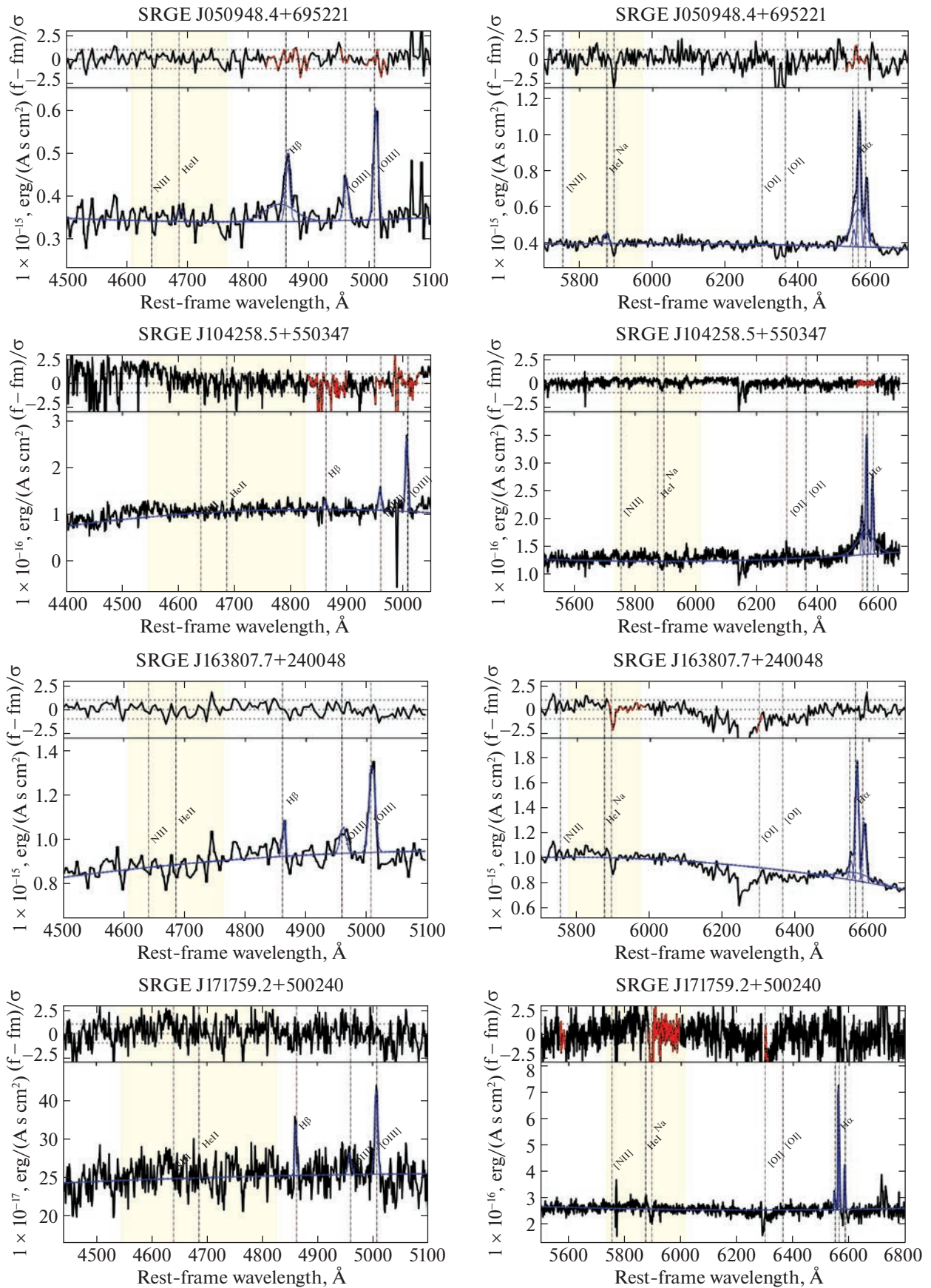


Рис. 5. Окончание.

Таблица 5

Линия	Длина волны, Å	Поток $\times 10^{-15}$ эрг/с/см ²	EW , Å	$FWHM$, км/с
SRGE J003427.0+181141 2021/10/27:				
H β^a Broad	4866	2.88 ± 1.02	-12.9 ± 4.6	1639 ± 355
H β^a	4864	<0.8	>-2.0	—
[OIII]	4962	0.44 ± 0.17	-2.0 ± 0.8	—
[OIII]	5009	1.58 ± 0.21	-7.3 ± 1.0	511 ± 74
SRGE J003427.0+181141 2022/11/16:				
H β^a Broad	4864	2.12 ± 0.75	-11.2 ± 4.0	1873 ± 450
H β^a	4864	<0.6	>-2.0	—
[OIII]	4962	0.26 ± 0.13	-1.4 ± 0.7	—
[OIII]	5010	1.21 ± 0.17	-6.4 ± 0.9	412 ± 62
[NII](6548)	6552	0.49 ± 0.34	-2.6 ± 1.8	—
H α Broad	6571	7.66 ± 1.72	-40.9 ± 9.2	1939 ± 143
H α	6567	1.33 ± 0.45	-7.1 ± 2.4	—
[NII]	6587	0.90 ± 0.30	-4.8 ± 1.6	485 ± 112
SRGE J011943.6–024144:				
HeII	4685	0.26 ± 0.04	-2.3 ± 0.3	814 ± 126
H β Broad	4863	0.68 ± 0.10	-6.4 ± 1.0	1832 ± 216
H β	4862	2.17 ± 0.06	-20.4 ± 0.5	—
[OIII]	4960	1.90 ± 0.06	-18.2 ± 0.6	—
[OIII]	5008	5.62 ± 0.04	-54.6 ± 0.4	520 ± 4
[NII](6548)	6546	1.36 ± 0.03	-19.8 ± 0.4	—
H α	6562	8.07 ± 0.04	-118.5 ± 0.6	—
[NII]	6582	2.98 ± 0.03	-44.2 ± 0.4	478 ± 2
SRGE J015444.7–070012:				
H β Abs	—	—	2.0 ± 0.4	—
[NII](6548)	6550	0.5 ± 0.2	-0.6 ± 0.2	—
H α	6565	0.7 ± 0.2	-0.9 ± 0.2	—
H α Broad	6565	25.1 ± 1.1	-33.5 ± 1.4	4468 ± 132
[NII]	6586	1.2 ± 0.2	-1.6 ± 0.2	410 ± 64
SRGE J020320.5+233624:				
H β Abs	—	—	2.6 ± 0.6	—
[OIII]	5006	0.36 ± 0.05	-1.5 ± 0.2	247 ± 33
[NII](6548)	6548	0.13 ± 0.02	-0.4 ± 0.1	—
H α	6562	0.41 ± 0.04	-1.1 ± 0.1	—
[NII]	6583	0.32 ± 0.03	-0.9 ± 0.1	173 ± 11

Таблица 5. Окончание

Линия	Длина волны, Å	Поток $\times 10^{-15}$ эрг/с/см ²	EW , Å	$FWHM$, км/с
SRGE J050948.4+695221:				
H β Broad	4851	2.55 ± 0.78	-7.4 ± 2	3626 ± 1120
H β	4864	1.21 ± 0.25	-3.5 ± 0.7	—
[OIII]	4959	0.96 ± 0.20	-2.8 ± 0.6	—
[OIII]	5009	2.40 ± 0.24	-6.9 ± 0.6	490 ± 48
HeI(5876)	5873	0.86 ± 0.30	-2.2 ± 0.7	737 ± 261
[NII](6548)	6551	0.87 ± 0.29	-2.3 ± 0.8	—
H α Broad	6563	10.3 ± 1.54	-27.0 ± 4.0	2151 ± 186
H α	6566	5.34 ± 0.32	-14.0 ± 0.9	—
[NII]	6586	2.72 ± 0.25	-7.1 ± 0.6	389 ± 28
SRGE J104258.5+550347:				
H β	4860	0.12 ± 0.03	-1.0 ± 0.3	—
[OIII]	4959	0.23 ± 0.03	-2.1 ± 0.3	—
[OIII]	5006	0.85 ± 0.04	-7.6 ± 0.3	325 ± 15
[NII](6548)	6547	0.26 ± 0.02	-1.9 ± 0.2	—
H α Broad	6560	2.73 ± 0.15	-20.0 ± 1.0	3381 ± 145
H α	6562	1.09 ± 0.02	-8.0 ± 0.2	—
[NII]	6582	0.68 ± 0.03	-5.0 ± 0.2	264 ± 8
SRGE J163807.7+240048 ^b :				
H β	4863	< 2.8	> -2.0	—
[OIII]	4961	1.43 ± 0.64	-1.5 ± 0.7	—
[OIII]	5009	4.93 ± 0.77	-5.3 ± 0.8	652 ± 110
[NII](6548)	6551	1.72 ± 0.55	-2.1 ± 0.7	—
H α Broad	6563	6.70 ± 3.53	-8.1 ± 4.2	4547 ± 1696
H α	6567	9.50 ± 0.62	-11.6 ± 0.8	—
[NII]	6587	4.99 ± 0.61	-6.1 ± 0.7	455 ± 31
SRGE J171759.2+500240:				
H β	4861	0.24 ± 0.04	-1.3 ± 0.2	—
[OIII]	4959	0.14 ± 0.04	-0.8 ± 0.2	—
[OIII]	5007	0.56 ± 0.04	-3.1 ± 0.3	397 ± 38
[NII](6548)	6548	0.27 ± 0.03	-1.5 ± 0.1	—
H α	6562	1.84 ± 0.03	-9.9 ± 0.2	—
[NII]	6584	0.66 ± 0.02	-3.5 ± 0.1	235 ± 4

Примечание. Длина волны — положение пика эмиссионной линии (в системе покоя квазара), EW — эквивалентная ширина линии, $FWHM$ — ширина на полувысоте линии, без учета коррекции на спектральное разрешение инструмента. Прочие замечания: ^a — параметры линии могут искажены из-за наложившейся линии неба, ^b — форма спектра на краях диапазона может быть искажена из-за атмосферной дисперсии.

соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алам и др. (S. Alam, F.D. Albareti, C. Allende Prieto, F. Anders, S.F. Anderson, T. Anderton, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, 12 (2015).
- Асэф и др. (R.J. Assef, D. Stern, C.S. Kochanek, A.W. Blain, M. Brodwin, M.J.I. Brown, et al.), *Astrophys. J.* **772**, 26 (2013).
- Аучеттл и др. (K. Auchettl, E. Ramirez-Ruiz, and J. Guillochon), *Astrophys. J.* **852**, 37 (2018).
- Афанасьев и др. (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Baltic. Astron.* **20**, 363 (2011).
- Афанасьев и др. (V.L. Afanasiev, S.N. Dodonov, V.R. Amirkhanyan, and A.V. Moiseev), *Astrophys. Bull.* **71**, 479 (2016).
- Беллм и др. (E.C. Bellm, S.R. Kulkarni, M.J. Graham, R. Dekany, R. M. Smith, R. Riddle, et al.), *PASP* **131**, 018002 (2019).
- Бельведерский М.И., Мещеряков А.В., Медведев П.С., Гильфанов М.Р., Письма в Астрон. журн. **48**, 119 (2022) [M.I. Belvedersky, A.V. Meshcheryakov, P.S. Medvedev, and M.R. Gilfanov, *Astron. Lett.* **48**, 109 (2022)].
- Болдуин и др. (J.A. Baldwin, M.M. Phillips, and R. Terlevich), *PASP* **93**, 5 (1981).
- Боллер и др. (T. Boller, W.N. Brandt, and H. Fink), *Astron. Astrophys.* **305**, 53 (1996).
- Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021).
- Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., и др., Письма в Астрон. журн. **42**, 333 (2016) [R.A. Burenin, A.L. Amvrosov, M.V. Eselevich, V.M. Grigor'ev, V.A. Aref'ev, V.S. Vorob'ev, et al., *Astron. Lett.* **42**, 295 (2016)].
- Ван Вельзен и др. (S. van Velzen, S. Gezari, E. Hammerstein, N. Roth, S. Frederick, C. Ward, et al.), *Astrophys. J.* **908**, 4 (2021).
- Веверс и др. (T. Wevers, D.R. Pasham, S. van Velzen, J.C.A. Miller-Jones, P. Uttley, K.C. Gendreau, et al.), *Astrophys. J.* **912**, 151 (2021).
- Гильфанов М.Р. и др., Письма в Астрон. журн. **49**, в печати (2023).
- Гинсбург и др. (A. Ginsburg, V. Sokolov, M. de Val-Borro, E. Rosolowsky, J.E. Pineda, B.M. Sipöcz et al.), *Astron. J.* **163**, 291 (2022).
- Гонзалес-Мартин и др. (O. González-Martín J. Masegosa, I. Márquez M. Guainazzi and E. Jiménez-Bailón) *Astron. Astrophys.* **506**, 1107 (2009).
- Додин А.В., Потанин С.А., Шацкий 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)].
- Додин А.В., Шацкий Н.И., Велинский А.А., и др., Письма в Астрон. журн. **47**, 683 (2021) [A.V. Dodin, N.I. Shatsky, A.A. Belinski, K.E. Atapin, M.A. Burlak, S.G. Zheltoukhov, et al., *Astron. Lett.* **47**, 661 (2021)].
- Заблудовф и др. (A. Zabludoff, I. Arcavi, S. La Massa, H.B. Perets, B. Trakhtenbrot, B.A. Zauderer, et al.), *Space Sci. Rev.* **217**, 54 (2021).
- Катри и др. (R.M. Cutri et al.), *VizieR Online Data Catalog*, p. II/311 (2012).
- Катри (R.M. Cutri, E.L. Wright, T. Conrow, J.W. Fowler, P.R.M. Eisenhardt, C. Grillmair, et al.), *VizieR Online Data Catalog*, p. II/328 (2021).
- Кауфманн и др. (G. Kauffmann, T.M. Heckman, C. Tremonti, J. Brinchmann, S. Charlot, S.D.M. White, et al.), *MNRAS* **346** 1055 (2003).
- Коллаборация астропу Прайс-Велан и др. (Astropy Collaboration, A. M. Price-Whelan, P.L. Lim, N. Earl, N. Starkman, L. Bradley, et al.), *Astrophys. J.* **935**, 167 (2022).
- Коллаборация GAIA Прусти и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, A1 (2016).
- Коллаборация HI4PI (HI4PI Collaboration, N. Ben Bekhti L Flöer R Keller J Kerp D Lenz, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A116 (2016).
- Комосса и др. (S. Komossa, J. Halpern, N. Schartel, G. Hasinger, M. Santos-Lleo, and P. Predehl), *Astrophys. J. Lett.* **603**, L17 (2004).
- Кюлей и др. (L.J. Kewley, M.A. Dopita, R.S. Sutherland, C.A. Heisler, and J. Trevena), *Astrophys. J.* **556**, 121 (2001).
- Масци и др. (F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, et al.), *PASP* **131**, 018003 (2019).
- Медведев П.С., Гильфанов М.Р., Сазонов С.Ю., и др., Письма в Астрон. журн. **49**, №1 (2023).
- Потанин С.А., Белинский А.А., Додин В., и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 894 (2020) [S.A. Potanin, A.A. Belinski, V. Dodin, S.G. Zheltoukhov, V.Y. Lander, K.A. Postnov, et al., *Astron. Lett.* **46**, 836 (2020)].
- Предел и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Aref'ev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
- Райт (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
- Сазонов и др. (S. Sazonov, E. Churazov, and R. Krivonos), *MNRAS* **454**, 1202 (2015).
- Сазонов и др. (S. Sazonov, M. Gilfanov, P. Medvedev, Y. Yao, G. Khorunzhev, A. Semena, et al.), *MNRAS* **508**, 3820 (2021).
- Сид Фернандес и др. (R. Cid Fernandes, G. Stasińska, M.S. Schlickmann A. Mateus, N. Vale Asari, W. Schoenell, et al.), *MNRAS* **403**, 1036 (2010).
- Стерн и др. (D. Stern, R.J. Assef, D.J. Benford, Blain, R. Cutri, A. Dey, et al.), *Astrophys. J.* **753**, 30 (2012).

37. Сид Фернандес и др. (R. Cid Fernandes, G. Stasińska, A. Mateus, and N. Vale Asari), *MNRAS* **413**, 1687 (2011).
38. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), arXiv eprints p arXiv:2104.13267 (2021).
39. Уэда и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, and M.G. Watson), *Astrophys. J.* **786**, 104 (2014).
40. Уэда и др. (Y. Ueda, Y. Hashimoto, K. Ichikawa, Y. Ishino, A.Y. Kniazev, P. Väisänen, et al.), *Astrophys. J.* **815**, 1 (2015).
41. Фицпатрик (E.L. Fitzpatrick, D. Massa, K.D. Gordon, R. Bohlin, and G.C. Clayton), *Astrophys. J.* **886**, 108 (2019).
42. Хабибуллин и др. (I. Khabibullin, S. Sazonov, and R. Sunyaev), *MNRAS* **437**, 327 (2014).
43. Хаммерстейн и др. (E. Hammerstein, S. van Velzen, S. Gezari, S.B. Cenko, Y. Yao, C. Ward, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2203.01461 (2022).
44. Хекман и др. (T.M. Heckman, A. Ptak, A. Hornschemeier, and G. Kauffmann), *Astrophys. J.* **634**, 161 (2005).
45. Хо (L.C. Ho), *ARAA* **46**, 475 (2008).
46. Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:1612.05560 (2016).
47. Чарлампулос и др. (P. Charalampopoulos, G. Leloudas, D.B. Malesani, T. Wevers, I. Arcavi, M. Nicholl, et al.), *Astron. Astrophys.* **659**, A34 (2022).
48. Шавински и др. (K. Schawinski, D. Thomas, M. Sarzi, C. Maraston, S. Kaviraj, S.-J. Joo, et al.), *MNRAS* **382**, 1415 (2007).
49. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkbeiner, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
50. Яо, Джарретт и др. (H.F.M. Yao, T.H. Jarrett, M.E. Cluver, L. Marchetti, E.N. Taylor, M.G. Santos, et al.), *Astrophys. J.* **903**, 91 (2020).
51. Яо и др. (Y. Yao, W. Lu, M. Guolo, D.R. Pasham, S. Gezari, M. Gilfanov, et al.), *Astrophys. J.* **937**, 8 (2022).