

УДК 524.7-77

РАДИОСВОЙСТВА ДАЛЕКИХ ГАЛАКТИК НА  $Z \geq 1$ © 2023 М. Л. Хабибуллина<sup>1\*</sup>, А. Г. Михайлов<sup>1</sup>, Ю. В. Сотникова<sup>1</sup>,  
Т. В. Муфахаров<sup>1,2</sup>, М. Г. Мингалиев<sup>1,2,3</sup>, А. А. Кудряшова<sup>1</sup>,  
Н. Н. Бурсов<sup>1</sup>, В. А. Столяров<sup>1,4</sup>, Р. Ю. Удовицкий<sup>1</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия<sup>3</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия<sup>4</sup>Кавендишская лаборатория, Кембриджский университет, Кембридж CB3 0HE, Великобритания

Поступила в редакцию 6 июля 2023 года; после доработки 8 сентября 2023 года; принята к публикации 11 сентября 2023 года

Изучение радиогалактик на больших красных смещениях (HzRG — high-redshift radio galaxies) может пролить свет на эволюцию массивных эллиптических галактик. Квазары являются подавляющим большинством обнаруживаемых радиисточников на больших красных смещениях, в то время как радиогалактик на  $z > 3$  детектируется значительно меньше. В работе представлены радиосвойства 173 источников, оптически отождествленных с радиогалактиками на  $z \geq 1$  со спектральной плотностью потока  $S_{1.4} \geq 20$  мЯн. По литературным данным были построены широкодиапазонные радиоспектры галактик, оценены их радиоперемежность, радиосветимость и радиогромкость. Обнаружено, что почти 60% галактик имеют крутые или ультра крутые радиоспектры; 22% — плоские, инвертированные, растущие и комплексные формы спектров, 18% — спектры с пиком (PS — peaked spectra). Большинство PS в выборке (20/31) имеют спектральные пики на частотах менее 1 ГГц, то есть являются кандидатами в молодые компактные объекты. Медианные значения индексов переменности на частотах 11 и 5 ГГц составляют  $V_{S_{11}} = 0.14$  и  $V_{S_5} = 0.13$ , что, в целом, свидетельствует о слабом или умеренном характере долговременной переменности радиоизлучения галактик. Характерные радиосветимость и радиогромкость составляют  $L_5 = 10^{43}–10^{44}$  эрг с<sup>-1</sup> и  $\lg R = 3–4$  соответственно. Для представленной выборки обнаружен менее заметный вклад радиоизлучения компактного ядра по сравнению с яркими квазарами на  $z \geq 3$ . Разнообразие полученных радиосвойств отображает разные условия формирования источников радиоизлучения в галактиках.

Ключевые слова: галактики: активные ядра галактик, квазары — галактики: активные — галактики: квазары: общие сведения — радиоизлучение с непрерывным спектром

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Галактики с красными смещениями  $z > 1$  и радиосветимостью  $L_{500\text{MHz}}$ , превышающей  $10^{34}$  эрг с<sup>-1</sup>, классифицируются как молодые радиисточники (HzRG, Miley and De Breuck, 2008a). Это редкие объекты с пространственной плотностью около  $10^{-8}$  Мпс<sup>-3</sup> в диапазоне красных смещений  $2 \leq z < 5$ . Их спектральное энергетическое распределение включает излучение пылевой и звездной компонент, а также излучение активного ядра. Исследования первых двух компонент показывают, что HzRG являются одними из самых крупных галактик во Вселенной (Seymour et al., 2007; Bryant et al., 2009; De Breuck et al., 2010) и считаются прародителями массивных

эллиптических галактик, которые мы наблюдаем сегодня (Matthews et al., 1964).

Эти факты позволяют использовать радиогалактики в качестве инструмента для изучения распределений видимой и темной материи, динамики структуры Вселенной и истории ее формирования. Одним из важнейших параметров галактик, определяемых из наблюдений, является их возраст, который не может превышать возраста всей Вселенной (Verkhodanov et al., 1999, 2000; 2001). Важной особенностью радиогалактик является то, что мы наблюдаем их практически с эпохи формирования, то есть их радиисточники настолько мощны, что в современных радиообзорах каталогизированы практически все объекты этого типа (Verkhodanov and Parijskij, 2008). Такие объекты могут служить хорошими зондами для изучения формирования скоплений галактик. Поэтому по-

\*E-mail: rita@sao.ru

строение полных выборок радиогалактик в широком диапазоне красных смещений остается важной задачей наблюдательной космологии.

Для поиска HzRG часто используется, пока являющаяся спорной, зависимость спектрального индекса от красного смещения (« $\alpha - z$ »), когда радиоисточники с более крутыми спектрами оказывают преимущественно связанными с источниками с более высоким красным смещением (Tielens et al., 1979; De Breuck et al., 2000; Miley and De Breuck, 2008a). Одним из механизмов, объясняющих эту связь, является увеличение обратных комптоновских (IC — inverse Compton) потерь на больших красных смещениях из-за более высокой плотности энергии космического микроволнового фона (СМВ — cosmic microwave background) (например, Klamer et al., 2006 или Ghisellini et al., 2014). Недавно в результате моделирования большого числа источников в широком диапазоне красных смещений с помощью программы Broadband Radio Astronomy ToolS<sup>1)</sup> (Harwood et al., 2013, 2015), Morabito and Harwood (2018) было установлено, что потери IC действительно могут быть основным фактором, определяющим связь « $\alpha - z$ ». Есть две причины, которые могут привести к такой зависимости: один связан с ошибками наблюдений, а другой — со средой, окружающей галактику. Более плотная среда на больших красных смещениях будет удерживать радиоизлучение в более ограниченном пространстве и приведет к увеличению поверхностной яркости предшествующего радиоизлучения, исходящего от популяции электронов низких энергий. Если на больших красных смещениях радиогалактики предпочтительно находятся в более плотной среде, то эти эффекты могут привести к наблюдаемой зависимости. Другой эффект, связанный с увеличением плотности окружающей среды, может быть вызван ускорением электронов в радиопятне (hotspot) или вблизи него.

Хотя пока еще нет единого мнения о природе корреляции « $\alpha - z$ », сам факт существования этой эмпирической зависимости важен для исследований. Примером объекта, отобранного таким образом, является радиогалактика TN J0924–2201 — рекордсмен по красному смещению на  $z = 5.19$  со спектральным индексом<sup>2)</sup>  $\alpha = -1.63$  на частотах 0.365–1.4 ГГц (van Breugel et al., 1999). Другой пример — объект RC J0311+0507, исследовавшийся в программе «Большое трио» (Korylov et al., 2006). Его красное смещение  $z = 4.514$ , он имеет рекордную радиосветимость для радиогалактик с

$z > 4$ , а его спектральный индекс  $\alpha = -1.31$  на частотах 0.365–4.85 ГГц.

Пикообразная форма спектра внегалактических радиоисточников, характеризующаяся крутыми оптически тонкими спектрами и пиком на спектре в гигагерцовой области, считается индикатором молодых радиоисточников из-за их малых размеров. Такие радиоисточники подразделяются на компактные источники с крутым спектром (CSS — compact steep-spectrum), источники с пиком на частотах около 1 ГГц (GPS — gigahertz peaked-spectrum) и источники с высокочастотным пиком (HFP — high-frequency peaked). Источники CSS имеют пик в спектре на частотах менее 500 МГц в системе отсчета наблюдателя и линейные размеры (LS) 1–20 кпк (O’Dea, 1998). Источники GPS и HFP имеют  $LS < 1$  кпк с  $0.5 \leq \nu_{\text{peak,obs}} \leq 5$  ГГц и  $\nu_{\text{peak,obs}} > 5$  ГГц соответственно (Dallacasa et al., 2000). Обнаруженная антикорреляция между частотой пика в системе отсчета источника и прогнозируемым линейным размером для источников GPS и CSS подтверждает предположения об их эволюционной связи (Fanti et al., 1990; O’Dea and Baum, 1997). Компактные источники PS с наблюдаемой частотой пика ниже 1 ГГц также называют источниками мегагерцового пикового спектра (MPS — megahertz peaked-spectrum) (Falcke et al., 2004; Coppejans et al., 2015, 2016a, 2016b). Предполагается, что они представляют собой комбинацию относительно близких источников CSS/GPS и более далеких HFP, частота пиков которых смещена в сторону низких частот из-за космологического красного смещения.

Изучение природы PS-источников может помочь понять особенности эволюции активных ядер галактик (АЯГ). В ряде работ показано, что пик в спектре квазаров с большими красными смещениями формируется в основном за счет доминирующего вклада радиоизлучения от яркого компактного ядра (Snellen et al., 1998; Sotnikova et al., 2021). Многие известные далекие АЯГ на  $z > 5$  являются блазарами и имеют пик в спектре (например, Romani et al., 2004; Frey et al., 2010; Liu et al., 2016; Coppejans et al., 2017; Spingola et al., 2020; Mufakharov et al., 2021). Такая форма спектра преобладает на больших красных смещениях, где легко обнаружить яркие блазары с джетами. Однако увеличение спектрального индекса с ростом красного смещения пока не обнаружено (Ker et al., 2012; Singh et al., 2014; Smolčić et al., 2014). Одна из причин — плохая статистика по далеким радиоисточникам. В то же время не следует исключать, что АЯГ могут эволюционировать по-разному и такая корреляция естественна.

Для изучения природы HzRG и их эволюции важно получить большую выборку таких объектов. В настоящее время базы данных и

<sup>1)</sup><http://www.askanastronomer.co.uk/brats/>

<sup>2)</sup>Определяется в предположении степенной зависимости между спектральной плотностью потока  $S_\nu$  на частоте  $\nu$  и спектральным индексом  $\alpha$ :  $S_\nu \sim \nu^\alpha$ .

методы определения позволяют автоматизировать поиск и отождествление далеких радиогалактик. Каталог HzRGs может быть использован не только для космологических исследований, но и для статистического анализа свойств в различных диапазонах спектра (Verkhodanov and Trushkin, 2000; Trushkin, 2003; Verkhodanov et al., 2003; Balayan and Verkhodanov, 2004), для поиска и анализа свойств радиогалактик (Verkhodanov, 1994; Parijskij et al., 1999; Verkhodanov et al., 1999, 2008; Verkhodanov and Verkhodanova, 1999; Solovyov and Verkhodanov, 2014a,b), а также для моделирования радиоастрономических обзоров на различных телескопах (Gorokhov and Verkhodanov, 1994; Khabibullina et al., 2008; Majorova, 2008).

Такой каталог радиогалактик с красными смещениями  $z \geq 0.3$  был ранее построен Khabibullina and Verkhodanov (2009a,b,c). Каталог содержит 2442 источника с красными смещениями, фотометрическими звездными величинами и спектральными плотностями потоков; размеры радиоисточников, координаты и спектральные индексы радиоисточников были рассчитаны по результатам кросс-идентификации с радиокаталогами системы поддержки астрофизических каталогов CATS<sup>3</sup>) database (Verkhodanov et al., 1997, 2005).

В данной работе представлена выборка из 173 ярких радиогалактик со спектральной плотностью потока больше, чем 20 мЯн на частоте 1.4 ГГц (здесь и далее частота обозначается строчным символом), со спектроскопическими красными смещениями  $z \geq 1$ , взятых из NED<sup>4</sup>), SDSS<sup>5</sup>) (Lyke et al., 2020), CATS и VizieR Information System<sup>6</sup>) (Ochsenbein et al., 2000). Представлены радиосвойства источников, классификация радиоспектров, параметры радиопеременности на временных масштабах до 30 лет, оценки радиогромкости и радиосветимости. Предложены новые кандидаты в MPS, GPS и HFP и оценена доля среди мощных радиогалактик на больших красных смещениях. Проанализированы некоторые инфракрасные свойства АЯГ.

## 2. ВЫБОРКА

Для построения первичного списка использовалась база данных NED, из которой отбирались объекты со следующими параметрами: красное смещение  $z \geq 1$ , спектральная плотность потока

на частоте 1.4 ГГц  $S_{1.4} \geq 20$  мЯн, классифицированные как галактики. Первоначальный список содержал 9000 объектов, в том числе и не подходящих по заданным критериям. Поэтому следующий этап заключался в очистке исходной выборки от ошибочных источников. Для этого из начального списка были удалены следующие объекты:

- 1) объекты, не имеющие спектроскопические красные смещения;
- 2) объекты, не имеющие морфологического типа «радиогалактика»;
- 3) объекты без NVSS-наблюдений.

Был проведен анализ обширного перечня литературных данных, включая оптические, инфракрасные и радиообзоры, представленные в базе данных NED, информационной системе VizieR и CATS. Для работы с базой данных NED, а также с коллекцией каталогов VizieR использовался модуль `astroquery` написанный на языке Python (Ginsburg et al., 2019). Он позволяет осуществлять пакетный поиск в различных базах данных с использованием общего API<sup>7</sup>). В дополнение к радиокаталогам было проведено сопоставление с каталогом WISE (Wright et al., 2010) (см. детали в разделе 6.2). Общее количество использованных каталогов превышает 170, подавляющее большинство измерений представлено 21 радиокаталогом, которые можно найти в таблице 1, куда включены эпохи, частоты наблюдений и соответствующие ссылки на литературу. Данные охватывают временной период в несколько десятков лет, а основные данные представлены обзором неба NVSS (NRAO VLA Sky Survey, Condon et al., 1998), FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-cm Survey, Becker et al. 1994), WENSS (Westerbork Northern Sky Survey, Rengelink et al., 1997), GB6 (Green Bank 6-cm Survey, Gregory et al., 1996), ATCA20 (Australia Telescope 20 GHz Survey, Murphy et al., 2010), GLEAM (GaLactic and Extragalactic All-sky Murchison Widefield Array) на частоте 72–231 МГц (2013–2014; Hurley-Walker et al., 2017), TGSS (TIFR Giant Metrewave Radio Telescope Sky Survey) на частоте 150 МГц (Intema et al., 2017), измерения VLA (Healey et al., 2007) и другие. Самые ранние данные относятся к 1974 году и представлены Техасским обзором радиоисточников, охватывающим область склонений  $-35^\circ 5' < \delta < 71^\circ 5'$  на частоте 365 МГц (TXS, Douglas et al., 1996; Gregory et al., 1996). Многочастотные квазиодновременные наблюдения на радиотелескопе PATAH-600 представлены несколькими каталогами на шести частотах из работ Bursov et al. (1996), Kovalev et al. (1999),

<sup>3</sup>)Astronomical CATalogs support System, (<http://cats.sao.ru>).

<sup>4</sup>)NASA/IPAC Extragalactic Database (<http://ned.ipac.caltech.edu>).

<sup>5</sup>)<http://www.sdss.org>

<sup>6</sup>)<https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

<sup>7</sup>)<https://astroquery.readthedocs.io>

Таблица 1. Основные каталоги, используемые в работе

Каталог/Инструмент*	Эпоха	Частота, ГГц	Ссылка
TXS	1974–1983	0.365	[1]
GBMO	1979–1996	2.5, 8.2	[2]
RCSP	1980–1981	3.9	[3]
GB6	1986–1987	4.8	[4]
PKS90	1989	8.4	[5]
WENSS	1991	0.325, 0.609	[6]
FIRST	1993–1994	1.4	[7]
NVSS	1993–1996	1.4	[8]
JVAS	1995–1997	8.4	[9]
PMNmi	1995–1996	0.96, 2.3, 3.9, 7.7, 11.2	[10]
SRCKi	1995–1996	0.96, 2.3, 3.9, 7.7, 11.2, 21.7	[11]
KOV97	1997	0.96, 2.3, 3.9, 7.7, 11.2, 21.7	[12]
VLSS	1998	0.074	[13]
NCPMi	1999	2.3, 3.9, 7.7, 11.2, 21.7	[14]
GPSra	2006–2010	1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7	[15]
ATCA	2007	1.4	[16]
CGR15	2008–2009	15	[17]
BiMin	2005–2014	1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7	[18]
GPSSt	2006–2017	1.1, 2.3, 4.8, 7.7/8.2, 11.2, 21.7	[19]
TGSS	2010–2012	0.15	[20]
GLEAM	2013–2015	0.072–0.231	[21]
VLASS	2016–2019	2–4	[22]
RATAN-600	2017–2020	1.2, 2.3, 4.7, 8.2, 11.2, 22.3	[23]

\* Указаны идентификаторы по данным системы CATS. Ссылки: [1] — Douglas et al. (1996); [2] — Lazio et al. (2001); [3] — Bursov et al. (1996); [4] — Gregory et al. (1996); [5] — Wright et al. (1991); [6] — Rengelink et al. (1997); [7] — Becker et al. (1994); [8] — Condon et al. (1998); [9] — Wrobel et al. (1998); [10] — Mingaliev et al. (1998); [11] — Kiikov et al. (2002); [12] — Kovalev et al. (1999); [13] — Cohen et al. (2007); [14] — Mingaliev et al. (2001); [15] — Mingaliev et al. (2012); [16] — White et al. (2012); [17] — Richards et al. (2011); [18] — Mingaliev et al. (2017); [19] — Sotnikova et al. (2019); [20] — Intema et al. (2017); [21] — Hurley-Walker et al. (2017); [22] — Lacy et al. (2020); [23] — Sotnikova et al. (2021).

Kiikov et al. (2002), Mingaliev et al. (1998, 2001, 2012, 2017), Sotnikova et al. (2019, 2021).

Выборка включает в себя дополнительные объ-  
екты, найденные в литературе:

- NVSS J142047+120547 (Gabányi et al., 2021);
- NVSS J160608+312447 (Healey et al., 2008);
- RC J0311+0507 (Parijskij et al., 2014)  
или NVSS J031147+050802;
- MRC 0251–273 (Miley and De Breuck, 2008a)  
или NVSS J025316–270913;
- MRC 2025–218 (Miley and De Breuck, 2008a)  
или NVSS J202759–214057;

- MRC 2104–242 (Miley and De Breuck, 2008a)  
или NVSS J210658–240504.

Согласно ранним исследованиям Sbarrato et al. (2015), NVSS J142047+120547 был классифицирован как блазар с релятивистским джетом, но Gabányi et al. (2021) на основании наблюдений пришли к выводу, что это, скорее всего, молодая радиогалактика. Для NVSS J160608+312447 в NED нет информации о методе определения красного смещения, но, как видно из работы Healey et al. (2008), оно было определено спектроскопически в обзоре CGRaBS (Candidate Gamma-Ray Blazar Survey), поэтому этот объект также был включен в итоговый список.

**Таблица 2.** Параметры галактик в выборке: название источника, красное смещение  $z$ , спектральная плотность потока на частоте 1.4 ГГц  $S_{1.4}$  в Ян из базы данных NVSS, тип оптического объекта и литературный источник, из которого была взята оптическая классификация; данные о красных смещениях — из базы данных NED, SDSS и публикаций других авторов. Показан фрагмент таблицы; полная версия доступна как Дополнительный материал

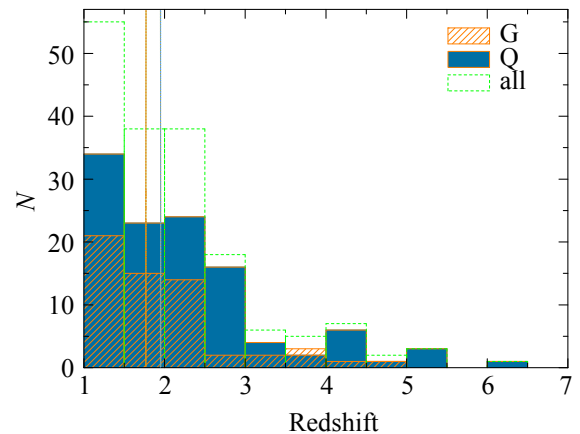
NVSS (J2000)	$z$	$S_{1.4}$ , Ян	Тип	Ссылка
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
003005+295706	5.199	$0.017 \pm 0.001$	G, QSO	SDSSdr13 <sup>a</sup>
003205–041417	3.161	$0.042 \pm 0.002$	G, QSO	[1]
003818+122731	1.395	$1.034 \pm 0.031$	G, BL Lac	[2]
010152–283119	1.694	$0.661 \pm 0.020$	G, QSO	[3]
011322+133505	2.661	$0.033 \pm 0.001$	G, QSO	SDSSdr13
011651–205206	1.415	$4.091 \pm 0.123$	G	[4]
011747+011407	3.696	$0.028 \pm 0.001$	G, QSO	[1]
012229+192339	1.595	$0.449 \pm 0.014$	G	[5]
012529+005407	1.711	$0.070 \pm 0.002$	G, QSO	[1]
013028–261000	2.347	$1.464 \pm 0.049$	G	[6]

<sup>a</sup> [http://www.sdss.org/dr13/data\\_access/bulk/](http://www.sdss.org/dr13/data_access/bulk/). Ссылки: [1] — Pâris et al. (2018); [2] — D’Abrusco et al. (2019); [3] — Souhay et al. (2015); [4] — Seymour et al. (2007); [5] — Stern et al. (1999); [6] — Sadler et al. (2019).

В результате была составлена выборка, которая содержит 173 объекта. Среди них: 105 (61% от выборки) QSOs и QSO-кандидаты, два объекта BL Lacs, три BZQs, три блазара, 59 радиогалактик и один объект смешанного типа (таблица 2). Для дальнейшего анализа рассматриваются две подвыборки, одна из которых содержит объекты, классифицированные как галактики с квазарами в центре (114 источников, обозначенных как «Q»), а остальные 59 объектов обозначены как «G». Спектральная плотность потока для объектов варьируется от 0.02 до 9.8 Ян на частоте 1.4 ГГц с медианным значением 0.12 Ян.

Красные смещения галактик лежат в диапазоне от 1 до 6.01 с медианными значениями 1.78 для источников типа G и 1.96 для типа Q (рис. 1). Объект с наибольшим красным смещением в нашей выборке — J1225+4140, который классифицируется и как галактика, и как квазар, поэтому при анализе в данной работе он рассматривается как источник Q-типа. Его фотометрическое красное смещение  $z = 0.59 \pm 0.05$ , что сильно противоречит спектроскопическому красному смещению, оцененному в SDSS DR13<sup>8)</sup> как  $z = 6.008 \pm 0.001$ . Его радиоспектр хорошо аппроксимируется прямой линией в диапазоне от 150 МГц до 3 ГГц с наклоном  $\alpha = -0.7$ . Для него в 2022–2023 гг. на РАТАН-600 была впервые оценена спектральная плотность потока на частотах выше 3 ГГц и получены значения

<sup>8)</sup> [http://www.sdss.org/dr13/data\\_access/bulk/](http://www.sdss.org/dr13/data_access/bulk/)



**Рис. 1.** Распределение красных смещений для выборки. Синим цветом отмечено распределения для объектов типа G, оранжевым — для типа Q, зеленым — общее распределение красных смещений. Медианные значения для объектов типа G и Q отмечены синей и оранжевыми линиями соответственно.

$19 \pm 3$  мЯн на частоте 4.7 ГГц и  $21 \pm 5$  мЯн на 11.2 ГГц, которые хорошо согласуются с крутой формой его спектра на частотах 0.15–3 ГГц.

На диаграмме «спектральная плотность потока на 1.4 ГГц–красное смещение» (рис. 2) представлена верхняя граница потока, которая дает максимальные светимости наблюдаемых радиогалактик на разных красных смещениях. Как предполагалось в работе Khabibullina and Verkhodanov (2009a), это может быть связано

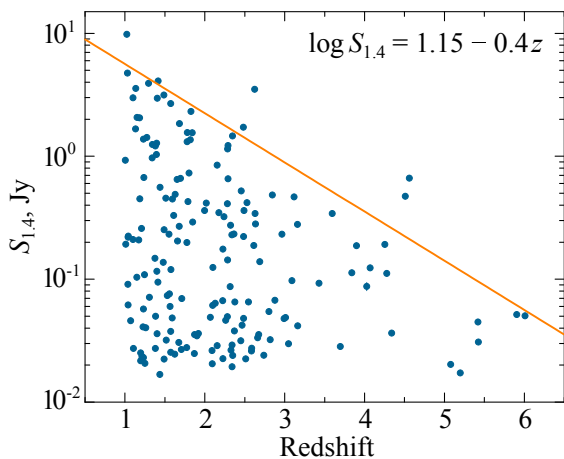


Рис. 2. Спектральная плотность потока в Ян на частоте 1.4 ГГц в зависимости от красного смещения. Регрессионная аппроксимация построена для максимальных потоков внутри интервалов с шагом красного смещения  $\Delta z = 0.5$ .

с динамикой космологического расширения. В настоящей работе, вслед за упомянутыми авторами, была построена линейная регрессия по максимальным значениям распределения в бинах  $\Delta z = 0.5$ . Регрессионная зависимость задается формулой  $\lg S_{1.4} = p + rz$ , где  $S_{1.4}$  — спектральная плотность потока на частоте 1.4 ГГц,  $p = 1.15$  — постоянный коэффициент и  $r = -0.4$  — наклон прямой. Такая регрессия хорошо согласуется с полученной ранее в работе Khabibullina and Verkhodanov (2009a). Следует отметить особо мощные радиогалактики, потоки которых более чем в два раза превышают значение границы регрессии. Это NVSS J043236+413829 (3C 119,  $z = 1.023$ ) (Kellermann, 1964), NVSS J074533+101112 (PKS 0742+10,  $z = 2.624$ ) (Labiano et al., 2007), NVSS J160608+312447 (WISEA J160608.53+312446.5,  $z = 4.56$ ) (Gendre and Wall, 2008) и NVSS J031147+050802 (RC J0311+0507,  $z = 4.510$ ) (Gower et al., 1967).

### 3. РАДИОСВОЙСТВА

#### 3.1. Радиоспектры и классификация

Широкодиапазонные радиоспектры галактик (см. рис. 3 и Дополнительные материалы) были построены по результатам поиска измерений в базе данных CATS (в пределах идентификационного поля размером  $30'' \times 30''$ ), NED и информационной системе VizieR. Для удаления случайных радиобъектов поля в заданном боксе использовалась методика анализа данных, аналогичная описанной Verkhodanov et al. (2000a; 2009). Суть метода заключается в совместном анализе данных в координатном и спектральном пространствах для выделения вероятных отождествлений конкретных

Таблица 3. Спектральные типы в выборке

Тип	Критерий	$N$	%
Peaked	$\alpha_{\text{low}} > 0, \alpha_{\text{high}} < 0$	31	17.9
Flat	$-0.5 \leq \alpha \leq 0$	28	16.2
Inverted	$\alpha > 0$	3	1.7
Upturn	$\alpha_{\text{low}} < 0, \alpha_{\text{high}} > 0$	6	3.5
Steep	$-1.1 < \alpha < -0.5$	81	46.8
Ultra-steep	$\alpha \leq -1.1$	23	13.3
Complex	Сложная форма	1	0.6

источников на различных радиочастотах. Для этого была использована программа `spg` пакета обработки данных радиоконтинуума FADPS, реализованного на радиотелескопе РТАН-600 (Verkhodanov, 1997).

Классификация спектральных типов выполнена на основе общих критериев (например, Sadler et al., 2006; Tucci et al., 2008), приведенных в таблице 3. Для инвертированных спектров и спектров с пиком (PS) спектральные индексы  $\alpha_{\text{low}}$  и  $\alpha_{\text{high}}$  рассчитывались на частотах ниже или выше точки, в которой наклон спектра меняет знак с положительного на отрицательный или наоборот. Для части спектров низкочастотный спектральный индекс совпадает с высокочастотным.

На рис. 4 показано распределение низкочастотных и высокочастотных спектральных индексов для двух типов источников. Наблюдается различие в распределениях высокочастотных спектральных индексов, где квазары демонстрируют более плоские спектральные формы, что подтверждает их оптическую классификацию. Для всей выборки медианные значения составляют  $\alpha_{\text{low}} = -0.63$  и  $\alpha_{\text{high}} = -0.83$ . Для подвыборки с галактиками (G) медианные спектральные индексы составляют  $\alpha_{\text{low}} = -0.77$ ,  $\alpha_{\text{high}} = -1.08$ , а для подвыборки Q —  $\alpha_{\text{low}} = -0.56$ ,  $\alpha_{\text{high}} = -0.69$  (таблица 4). Двухцветная диаграмма на рис. 5а представляет распределение спектральных индексов источников. Размеры точек пропорциональны значению спектральной плотности потока на 1.4 ГГц.

Диаграмма « $\alpha - z$ » (рис. 5b) показывает зависимость низкочастотных (кружки) и высокочастотных (треугольники) спектральных индексов от красного смещения в диапазоне от 1 до 6. Синие и оранжевые символы представляют медианы спектральных индексов для диапазонов красных смещений от 1.0 до 2.5 (шаг — 0.1 по  $z$ ) и от 2.5 до 6 (шаг — 0.5). Распределения  $\alpha_{\text{high}}$  на красных смещениях от 1 до 3 и от 3 до 6 существенно различаются (по уровню 0.05, согласно тесту Колмогорова–Смирнова), что также связано с

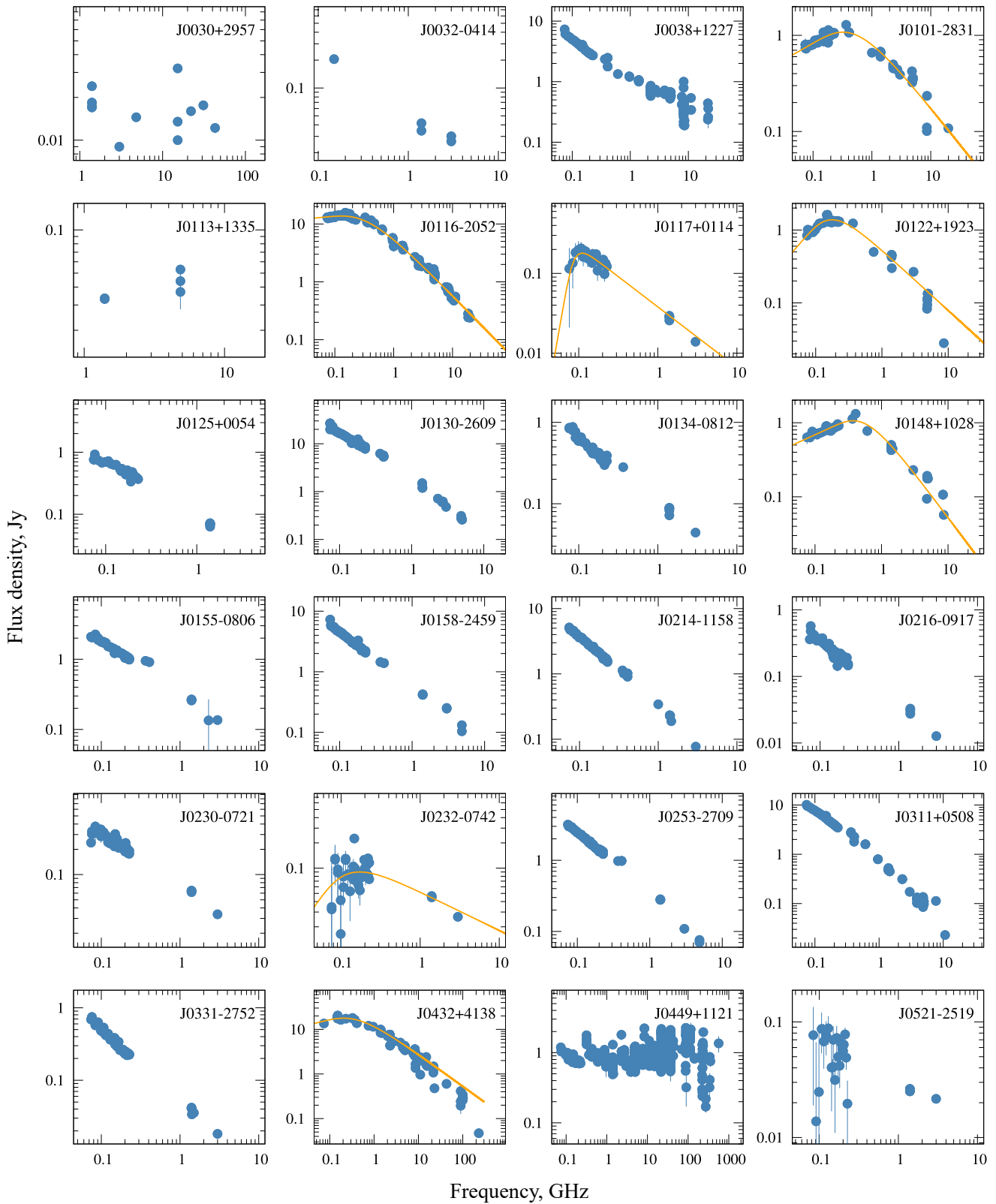
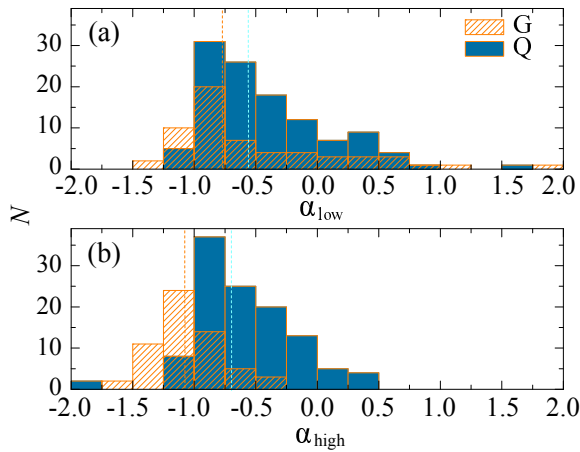


Рис. 3. Радиоспектры галактик. Показан фрагмент рисунка; полная версия доступна как Дополнительный материал.

**Таблица 4.** Медианные и средние значения спектральных индексов  $\alpha_{\text{low}}$  и  $\alpha_{\text{high}}$  для источников типов G и Q. В скобках приведены стандартные отклонения от среднего значения. В столбцах (5) and (8) приведены коэффициенты корреляции Пирсона для отношения « $\alpha - z$ »

Тип	N	$\alpha_{\text{low}}$		$\alpha_{\text{low}} - z$	$\alpha_{\text{high}}$		$\alpha_{\text{high}} - z$
		Median	Mean	$r$ ( $p$ -value)	Median	Mean	$r$ ( $p$ -value)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
G	59	-0.77	-0.52 (0.66)	-0.41 (0.001)	-1.08	-1.05 (0.26)	-0.25 (0.06)
Q	114	-0.56	-0.41 (0.50)	0.22 (0.02)	-0.69	-0.59 (0.39)	0.02 (0.58)



**Рис. 4.** Распределения низкочастотных (а) и высокочастотных (б) спектральных индексов для источников типов G и Q. Медианы отмечены вертикальными пунктирными линиями.

недостатком галактик на  $z > 3$ . Корреляция между красным смещением и низкочастотным и высокочастотным индексами не была обнаружена, однако  $\alpha_{\text{low}}$  и  $z$  коррелируют при исследовании подвыборки галактик:  $r = -0.41$  ( $p$ -value = 0.001). Другие значения корреляций « $\alpha - z$ » приведены в таблице 4.

Была проверена связь « $\alpha_{5-10} - z$ » для радиоспектров, пересчитанных в систему отсчета источника с использованием поправки  $(1 + z)$  (рис. 6). Спектральный индекс оценивался в диапазоне частот 5–10 ГГц. Ни для всей выборки, ни для подвыборки Q-источников корреляция обнаружена не была. Но для источников G-типа обнаружена значимая антикорреляция (по статистике Пирсона  $r = -0.32$ ,  $p$ -value < 0.01).

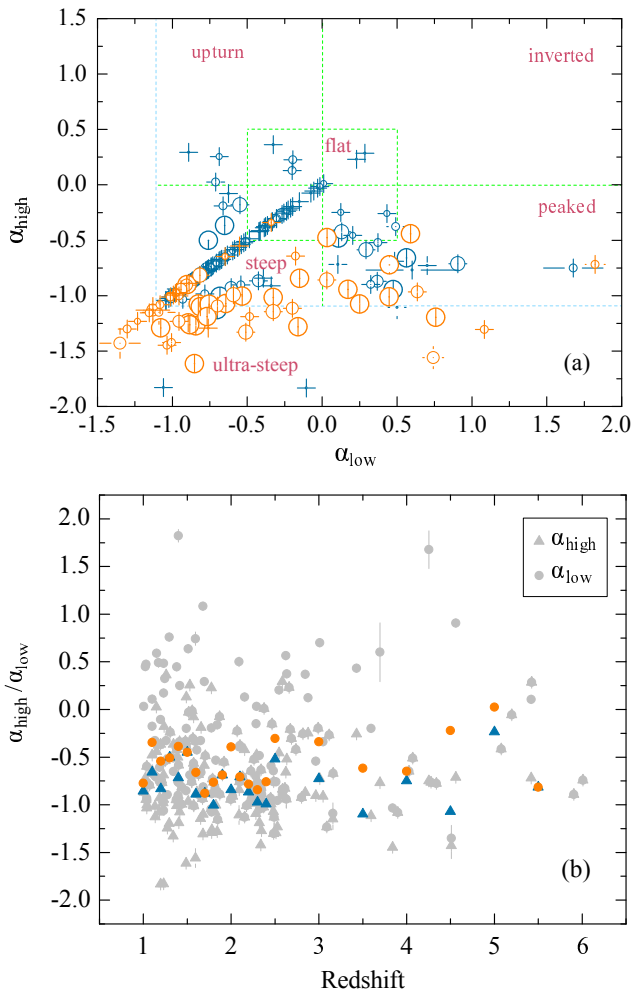
### 3.2. Средние спектры

Для изучения популяции далеких галактик были рассмотрены континуальные радиоспектры, усредненные по объектам, находящимся в узких интервалах красных смещений  $\Delta z = 0.1$ . Спектр каждого радиоисточника предварительно пересчитывался в его систему отсчета с помощью поправки

**Таблица 5.** Частота спектрального пика и спектральные индексы на частотах 5 и 11 ГГц для средних спектров галактик из данной работы (верхняя часть) и для средних спектров квазаров из Sotnikova et al. (2021) (нижняя часть)

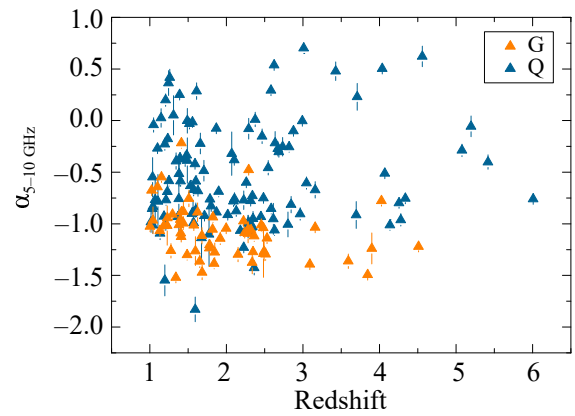
$z$	$\nu_{\text{peak}}$ , ГГц	$\alpha_5$	$\alpha_{11}$
1.0–1.1	–	-0.84	-0.91
1.1–1.2	–	-0.66	-0.79
1.2–1.3	0.10	-0.63	-0.76
1.3–1.4	–	-0.67	-0.69
1.4–1.5	–	-0.68	-0.73
1.5–1.6	–	-0.60	-0.68
1.6–1.7	–	-0.93	-1.06
1.7–1.8	–	-0.78	-0.79
1.8–1.9	–	-0.90	-0.98
1.9–2.0	–	-0.76	-0.78
2.0–2.1	0.37	-0.68	-0.88
2.1–2.2	–	-0.72	-0.79
2.2–2.3	–	-0.88	-0.95
2.3–2.4	–	-0.95	-1.03
2.4–2.5	–	-0.91	-0.96
2.5–2.6	–	-0.63	-0.64
2.6–2.7	0.44	-0.36	-0.47
3.0–3.1	0.73	-0.46	-0.65
$\geq 3.1$	–	-0.60	-0.65
3.0–3.1	0.52	-0.21	-0.28
3.1–3.2	1.50	-0.19	-0.32
3.2–3.3	0.65	-0.26	-0.35
3.3–3.4	–	-0.36	-0.37
3.4–3.5	1.61	-0.23	-0.39
3.5–3.6	5.35	+0.03	-0.30
3.6–3.7	2.43	-0.12	-0.26
3.7–3.8	4.78	-0.01	-0.14
3.0–3.8	1.60	-0.18	-0.30





**Рис. 5.** Панель (а): цветовая диаграмма для спектральных индексов объектов выборки. Квадратом показана область плоских спектров, зеленой линией — область источников с крутыми спектрами. Размер точки пропорционален значению спектральной плотности потока на 1.4 ГГц. Оранжевым цветом показаны галактики, синим — квазары. Панель (б) — зависимость низкочастотного  $\alpha_{low}$  и высокочастотного  $\alpha_{high}$  спектральных индексов от красного смещения. Цветными символами обозначены медианные спектральные индексы для диапазонов красных смещений  $z$  от 1.0 до 2.5 (с шагом 0.1) и для  $z$  от 2.5 до 6 (с шагом 0.5).

$(1+z)$ . Подробное описание метода усреднения спектра приведено в работах Verkhodanov et al. (2018) и Sotnikova et al. (2021). В результате получено 18 средних спектров в диапазоне  $z = 1.0-3.1$  и средний радиоспектр для 21 галактики на  $z > 3.1$  (рис. 7). Число галактик в каждом бине варьируется от 3 до 12, поэтому трудно сделать вывод о космологической эволюции средних спектров. Отметим лишь некоторые их характерные особенности. Во-первых, все средние спектры имеют выпуклую форму с уменьшением спектральной плотности потока с ростом частоты. Абсолютное значение спектрального индекса увеличивается с ростом ча-



**Рис. 6.** График зависимости  $\alpha$  от  $z$  для радиоспектров в системе отсчета источников для типов G и Q отдельно.

стоты (см. таблицу 5)<sup>9</sup>. Однако кривизна спектра невелика, только четыре спектра имеют пики на частотах выше 100 МГц. Во-вторых, спектральные индексы на частотах 5 ГГц и 11 ГГц изменяются примерно от  $-0.6$  до  $-1.0$ , что означает наличие оптически тонкого излучения. Таким образом, заметных особенностей спектральной компоненты, связанной с ярким компактным радиоядром, не обнаруживается.

### 3.3. Радиосветимость

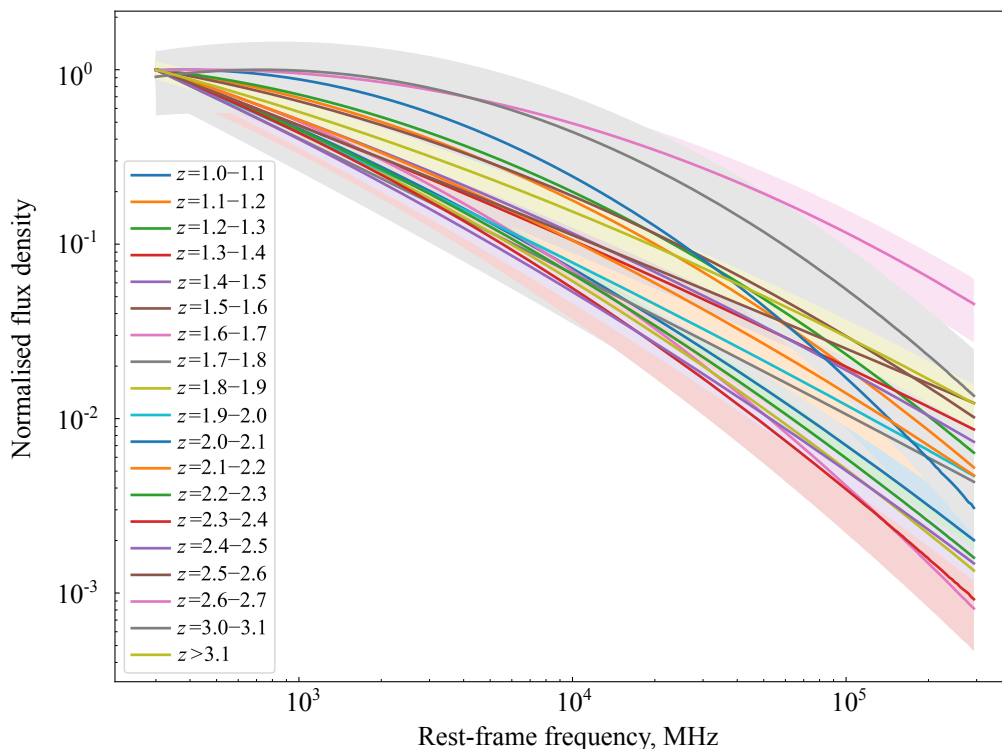
Радиосветимость на частоте 5 ГГц была рассчитана по общепринятой формуле:

$$L_\nu = 4\pi D_L^2 \nu S_\nu (1+z)^{-\alpha-1}, \quad (1)$$

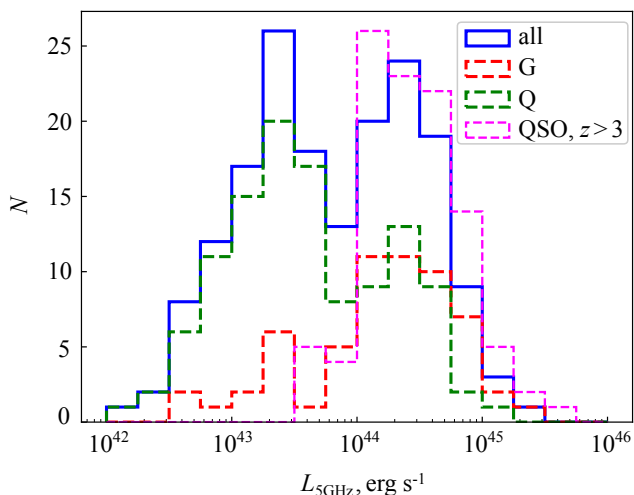
где  $\nu$  — частота,  $S_\nu$  — измеренная спектральная плотность потока,  $z$  — красное смещение,  $\alpha$  — спектральный индекс и  $D_L$  — фотометрическое расстояние. Для расчета фотометрического расстояния была использована  $\Lambda$ CDM космологическая модель, где  $H_0 = 67.74 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.3089$  и  $\Omega_\Lambda = 0.6911$  (Ade et al., 2016).

На рис. 8 представлено распределение объектов выборки по светимости: медианное и среднее значение составляют  $6.63 \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$  и  $1.84 \times 10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$  соответственно. Наибольшей светимостью  $L_5 \approx 2.17 \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$  обладает источник NVSS J031147+050802 на  $z = 4.51$ . Отметим бимодальный характер распределения светимости: оно представляет собой суперпозицию двух гауссовых распределений. Этот факт может быть связан с неоднородностью выборки. Как видно на рис. 8, распределения радиосветимостей двух подвыборок, G и Q, отличаются друг от друга.

<sup>9</sup>Средние спектры аппроксимировались параболами, а затем рассчитывался спектральный индекс как производная на заданной частоте.



**Рис. 7.** Средние спектры источников, нормированные на максимальную спектральную плотность потока. Цветными линиями обозначены диапазоны красных смещений  $z = 1.0-3.1$ , а соответствующими полосками представлены интервалы неопределенности в  $3\sigma$ .



**Рис. 8.** Распределения радиосветимости объектов подвыборок на частоте 5 ГГц. Распределение радиосветимости далеких квазаров на  $z > 3$  (Sotnikova et al., 2021) отмечено пурпурным цветом.

Бимодальность общего распределения радиосветимости обусловлена бимодальностью распределения светимости в группе Q и примерно равным вкладом группы G. Группа G имеет пик в распределении при той же светимости, что и второй

пик в группе Q (см. также таблицу 6). Бимодальное распределение светимости в группе Q может означать, что некоторые объекты этой группы не обладают ярко выраженными свойствами квазаров и неправильно классифицированы.

На рис. 9а представлена диаграмма зависимости светимости на частоте 5 ГГц от красного смещения. Пустая нижняя область объясняется эффектом селекции (минимальный уровень плотности потока на частоте 1.4 ГГц ограничен 20 мЯн).

#### 3.4. Радиогромкость

Наиболее распространено определение радиогромкости согласно Kellermann et al. (1989):

$$R = \frac{S_{5 \text{ ГГц}}}{S_{4400 \text{ \AA}}} \quad (2)$$

Здесь  $S_{5 \text{ ГГц}}$  — спектральная плотность потока в системе источника на частоте 5 ГГц и  $S_{4400 \text{ \AA}}$  — плотность оптического потока в системе источника на длине волны 4400 Å, соответствующей фильтрам B или g.

Многие авторы при оценке спектральной плотности потока в системе источника на основе наблюдаемых плотностей потока в радио- и оптическом диапазонах используют одни и те же спектральные индексы для объектов всей выборки.

Таблица 6. Статистические параметры радиосветимости и радиогромкости для различных подвыборок

Подвыборка	$\lg L_5$ , эрг $\text{с}^{-1}$			$\lg R_1$			$\lg R_2$		
	Среднее	$\sigma$	Медиана	Среднее	$\sigma$	Медиана	Среднее	$\sigma$	Медиана
all (173)	43.81	0.69	43.82	4.06	0.92	3.92	3.48	0.81	3.41
G (59)	44.19	0.62	44.26	4.78	0.91	5.00	4.09	0.70	4.23
Q (114)	43.62	0.63	43.51	3.70	0.69	3.63	3.19	0.70	3.18
QSO, $z > 3$ (102)	44.45	0.38	44.37	3.56	0.69	3.49	—	—	—

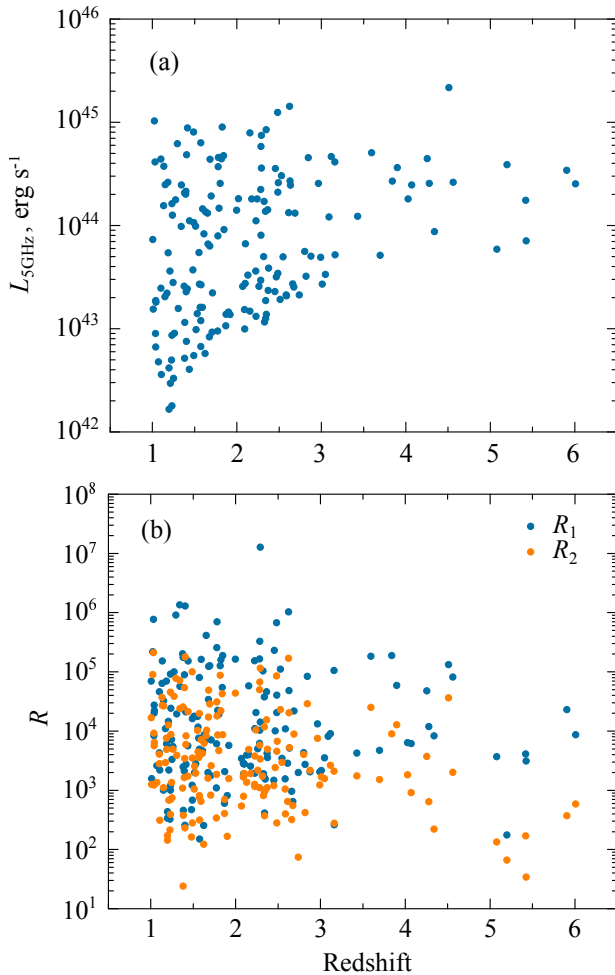


Рис. 9. Светимость на частоте 5 ГГц и радиогромкость в зависимости от красного смещения, панели (a) и (b) соответственно. Оранжевые и синие кружки соответствуют значениям радиогромкости  $R_1$  и  $R_2$ , рассчитанным двумя различными способами.

Такое предположение часто вызвано недостатком информации о спектральном распределении энергии. Например, в работе Sotnikova et al. (2021) на основе широкополосных радиоизмерений оценена радиогромкость для 102 квазаров на красных смещениях  $z \geq 3$ , но при этом для всех источников использовалось одинаковое значение оптического

спектрального индекса. В настоящей работе радиогромкость рассчитана двумя способами:

- 1) аналогично Sotnikova et al. (2021) — таким образом можно сравнить радиогромкость объектов выборки, представленной в данной работе, и для 102 далеких квазаров;
- 2) оптический спектральный индекс был рассчитан для каждого источника на основе фотометрических данных на 9134 Å ( $z$ -фильтр SDSS) и 3.4 мкм ( $W1$ -полоса WISE) — поскольку источники имеют красные смещения больше 1, свет, излучаемый на длине волны 4400 Å, принимается в области между  $z$  и  $W1$ , поэтому второй подход является более точным.

На рис. 9b показано распределение величин радиогромкости  $R_1$  и  $R_2$ , полученных двумя способами, в зависимости от красного смещения. Соответствующие гистограммы приведены на рис. 10. В распределении радиогромкости, рассчитанной с помощью второго подхода (рис. 10b), значение  $\lg R$  колеблется от 1.38 до 5.33, медиана составляет 3.41. Две подвыборки (G и Q) имеют различное распределение радиогромкости, причем в группе G радиогромкость выше (см. также таблицу 6).

#### 4. ПЕРЕМЕННОСТЬ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Для оценки переменности спектральной плотности потока рассчитывались индексы переменности  $V_S$  и модуляционные индексы  $M$  (Aller et al., 1992; Kraus et al., 2003) на временном масштабе до 30 лет. Для этого использовались литературные измерения спектральных плотностей потоков на частотах в пределах 10% от центральных частот 5 и 11 ГГц. Например, на  $\nu = 5$  ГГц использовались измерения в пределах 4.5–5.5 ГГц. Медианные значения числа измерений на 5 и 11 ГГц во всей выборке очень малы,  $N_{\text{obs}} = 5$ . Индексы переменности и модуляции на 5 ГГц и число наблюдательных эпох  $N_{\text{obs}}$  представлены в столбцах (8)–(10) таблицы 7.

Число наблюдательных эпох  $N_{\text{obs}}$  — один из параметров, влияющих на уровень обнаруженной переменности, так как при малом числе измерений легче пропустить всплески радиоизлучения

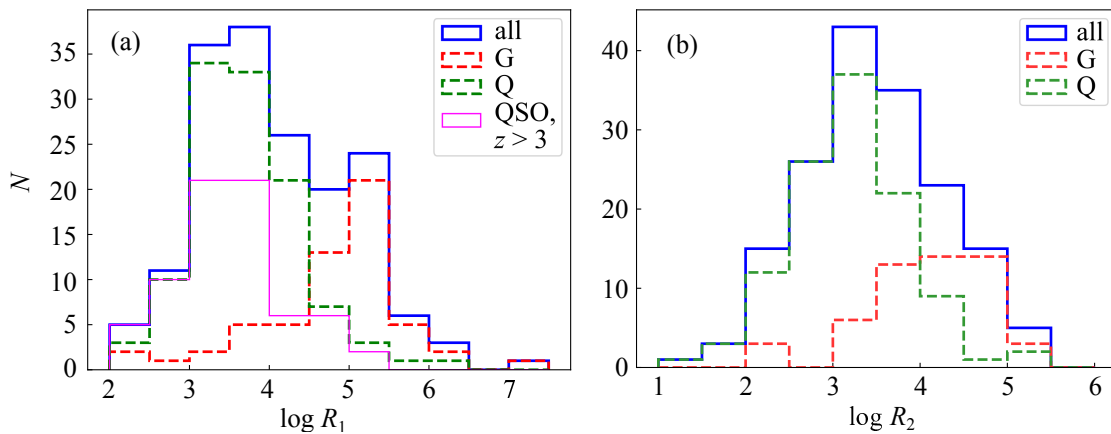


Рис. 10. Распределение радиогромкости: (a) — результаты, полученные с помощью первого подхода, (b) — с помощью второго. Распределение радиогромкости далеких квазаров на  $z > 3$  (Sotnikova et al., 2021) показано пурпурным цветом.

Таблица 7. Параметры выборки: имя источника на эпоху J2000.0, радиосветимость на частоте 5 ГГц  $L_5$ , логарифм радиогромкости  $R$ , рассчитанный двумя способами, спектральные индексы  $\alpha_{\text{low}}$  и  $\alpha_{\text{high}}$ , тип радиоспектра, индексы модуляции  $M$  и переменности  $V$  на частоте 5 ГГц, количество наблюдений  $N_{\text{obs}}$  и наблюдаемая частота пика в спектре  $\nu_{\text{peak,obs}}$ . Приведен фрагмент таблицы; полная версия доступна как Дополнительный материал

Имя J2000.0	$\log L_5$ , эрг с <sup>-1</sup>	$\log R_1$	$\log R_2$	$\alpha_{\text{low}}$	$\alpha_{\text{high}}$	Sp тип	$M_5$	$V_5$	$N_{\text{obs}}$	$\nu_{\text{peak,obs}}$ , ГГц
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J0030+2957	$44.59^{+0.01}_{-0.01}$	$2.25^{+0.01}_{-0.01}$	$1.82^{+0.37}_{-}$	$-0.06 \pm 0.10$	$-0.06 \pm 0.10$	flat	—	—	—	—
J0032-0414	$43.72^{+0.05}_{-0.06}$	$2.42^{+0.05}_{-0.06}$	$2.44^{+0.17}_{-0.28}$	$-0.67 \pm 0.08$	$-0.67 \pm 0.08$	steep	—	—	—	—
J0038+1227	$44.3^{+0.04}_{-0.05}$	$3.33^{+0.04}_{-0.05}$	$3.22^{+0.08}_{-0.11}$	$-0.76 \pm 0.08$	$-0.50 \pm 0.01$	steep	0.09	0.05	9	—
J0101-2831	$44.29^{+0.05}_{-0.05}$	$5.1^{+0.1}_{-0.12}$	$4.46^{+0.09}_{-0.12}$	$+0.29 \pm 0.02$	$-0.59 \pm 0.05$	peaked	0.08	0.11	6	0.37
J0113+1335	$43.43^{+0.04}_{-0.05}$	$2.98^{+0.06}_{-0.05}$	$2.51^{+0.1}_{-0.13}$	$+0.23 \pm 0.13$	$+0.23 \pm 0.13$	inverted	0.15	0.07	3	—
J0116-2052	$44.94^{+0.02}_{-0.02}$	$3.44^{+0.07}_{-0.09}$	$3.92^{+0.04}_{-0.05}$	$+0.25 \pm 0.30$	$-1.08 \pm 0.10$	peaked	0.09	0.18	14	0.13
J0117+0114	$43.71^{+0.19}_{-0.35}$	$3.67^{+0.21}_{-0.42}$	$3.18^{+0.31}_{-}$	$+0.60 \pm 3.08$	$-0.77 \pm 0.04$	peaked	—	—	—	0.11
J0122+1923	$44.16^{+0.08}_{-0.1}$	$5.21^{+0.2}_{-0.38}$	$3.85^{+0.34}_{-}$	$+0.74 \pm 0.70$	$-1.56 \pm 1.00$	peaked	0.17	0.24	6	0.17
J0125+0054	$43.35^{+0.04}_{-0.04}$	$3.85^{+0.06}_{-0.07}$	$3.41^{+0.16}_{-0.24}$	$-0.88 \pm 0.02$	$-0.88 \pm 0.02$	steep	—	—	—	—
J0130-2610	$44.93^{+0.03}_{-0.04}$	—	—	$-0.84 \pm 0.02$	$-1.27 \pm 0.05$	ultra-steep	0.08	0.06	3	—

(Tornikoski et al., 2000). В данной работе была обнаружена значимая корреляция (рис. 11) между  $N_{\text{obs}}$  и индексом переменности на 5 ГГц (коэффициент Спирмена  $\rho = 0.43$ ,  $p\text{-value} < 0.005$ ). Наблюдения неоднородны и различаются по временным масштабам, что повлияло на полученный показатель переменности.

В таблице 8 приведена статистика показателей переменности  $V_5$  и  $M$ . Отрицательные индексы переменности исключены из вычислений. Средние индексы переменности и модуляции варьируются в диапазоне 0.11–0.16 на 5 ГГц и 0.14–0.18 на 11 ГГц (рис. 12, таблица 8). Медианные значения  $V_{S_5}$  для галактик и квазаров равны 0.12 и 0.15 соответственно (рис. 13), однако распределения индекса

Таблица 8. Медианное, среднее, максимальное и минимальное значения индексов переменности  $V_5$  и модуляции  $M$  для частот 5 и 11 ГГц, соответственно

Параметр	$N$	Медиана	Среднее	Минимум	Максимум
$V_{S_5}$	85	0.13	$0.16 \pm 0.11$	0.006	0.46
$M_5$	103	0.11	$0.12 \pm 0.07$	0.002	0.33
$V_{S_{11}}$	21	0.14	$0.18 \pm 0.14$	0.02	0.47
$M_{11}$	24	0.17	$0.16 \pm 0.10$	0.001	0.40

переменности и индекса модуляции для них существенно не отличаются (на уровне 0.05, согласно тесту Колмогорова–Смирнова). Наибольшая пе-

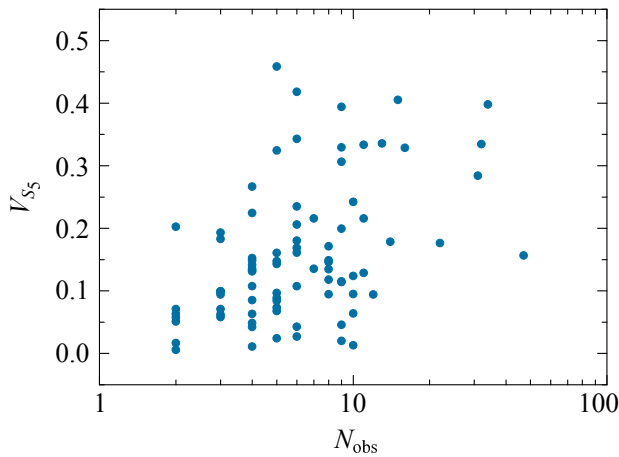


Рис. 11. Соотношение между индексом переменности  $V_{S_5}$  и числом измерений  $N_{\text{obs}}$ .

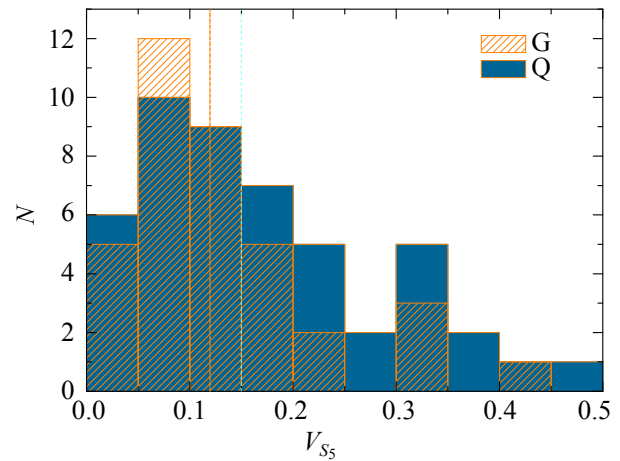


Рис. 13. Распределения индекса переменности  $V_{S_5}$  для галактик и квазаров; медианные значения равны 0.12 и 0.15 соответственно (штриховые оранжевая и голубая линии).

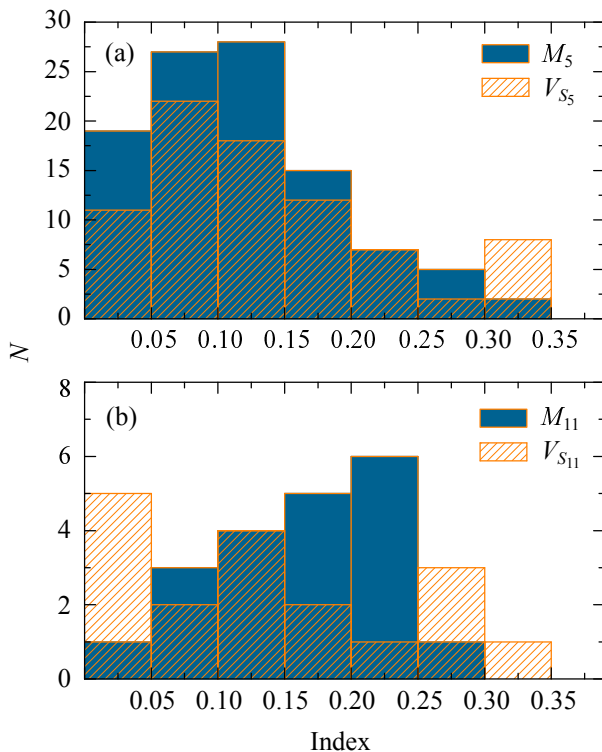


Рис. 12. Распределения индексов модуляции  $M$  и переменности  $V_S$  на 5 и 11 ГГц.

ременность получена для галактик с минимумом в спектре, комплексными, инвертированными и с пиком в спектре (таблица 9).

Для большинства источников характерен довольно низкий индекс переменности, менее 0.25 (рис. 14). Недостаточная статистика на красных смещениях  $z > 3$  не позволяет обнаружить отличия в уровне переменности в разные космологические эпохи.

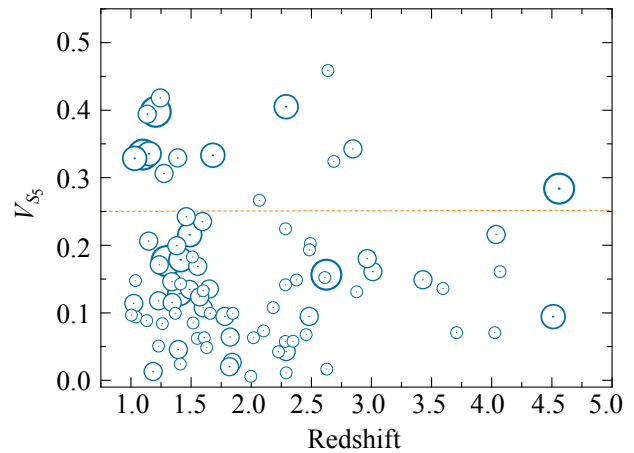


Рис. 14. Соотношение между индексом переменности  $V_{S_5}$  и красным смещением. Размеры кружков пропорциональны  $N_{\text{obs}}$  и соответствуют 5, 10, 20 и большему числу наблюдений.

## 5. PS-ГАЛАКТИКИ

В выборке обнаружена 31 PS-галактика (18%). Среди них 13 радиоисточников ранее были известны как GPS (таблица 10, колонка 10). Все они — яркие радиоисточники со спектральной плотностью потока более 1 Ян в гигагерцовом диапазоне. Для классификации источников как HFP/GPS/MPS обычно используются общепринятые критерии: наблюдаемая частота спектрального пика  $\nu_{\text{obs,peak}}$  менее 1 ГГц для MPS- и CSS-источников, от 1 до 5 ГГц — для GPS и более 5 ГГц — для HFP; спектральные индексы оптически толстой  $\alpha_{\text{thick}}$  и тонкой  $\alpha_{\text{thin}}$  областей излучения близки к +0.5 и -0.7 соответственно (для PS-источников они совпадают с  $\alpha_{\text{low}}$  и  $\alpha_{\text{high}}$ ); радиоперменность не превышает 25% на долго-

**Таблица 9.** Медианные и средние значения  $M_5$  для источников различных спектральных типов (в скобках приведены стандартные отклонения)

Тип спектра	$N$	Медиана	Среднее
flat	15	0.10	0.11 (0.08)
peaked	25	0.14	0.15 (0.07)
steep, ultra-steep	54	0.09	0.10 (0.06)
upturn, complex, inverted	9	0.18	0.17 (0.09)

временной шкале, так как эти объекты считаются наименее переменными (O’Dea et al., 1990, 1991; de Vries et al., 1997; O’Dea, 1998; Edwards and Tingay, 2004; O’Dea and Saikia, 2021). Для MPS и CSS источников выявлены разные линейные размеры, до 1 кпс и около 20 кпс соответственно. Они также локализованы на разных красных смещениях: MPS — на более высоких  $z > 1$  (Corpejans et al., 2016a), а CSS объекты — на близких космологических расстояниях.

В выборке среди PS-галактик обнаружены два кандидата в HFR-галактики, девять GPS-кандидатов и 20 MPS-кандидатов. Индекс переменности, оцененный для 24 PS-галактик, варьируется от 0.05 до 0.46. Для восьми из них уровень переменности выше 0.25 на 5 ГГц.

Проекция линейных размеров PS-галактик приведены в колонке (8) таблицы 10. Данные для двух источников, J1606+3124 и J2227–2705, взяты из литературы. Линейные размеры 20 источников оценены с использованием доступных радиокарт на 7.6 и 8.7 ГГц в базе данных *Astrogeo*<sup>10)</sup>, так как они доступны для большинства источников. Линейные размеры лежат в диапазоне от 0.022 до 0.8 кпк с медианным значением 0.073 кпк, за исключением J2227–2705, размер которого оценен на основе VLA-карты с меньшим угловым разрешением. Линейные размеры девяти источников не удалось оценить.

Обнаружено одиннадцать новых MPS, пять новых GPS и два новых HFR-кандидата. Объекты компактные, однако радиоспектры большинства новых PS-галактик недостаточно определены из-за скудности измерений на частотах выше нескольких ГГц, где ожидается большая переменность АЯГ в сравнении с МГц-диапазоном. Учитывая, что анализируются данные разных телескопов с различными угловыми разрешениями и систематическими ошибками, необходимы многочастотные и долговременные измерения радиогалактик для надежной классификации их радиоспектров.

<sup>10)</sup><http://astrogeo.org>

Обнаружено, что в выборке почти нет HFR-галактик. Даже с учетом источников с растущими спектрами, которые могут быть HFR-кандидатами с пиком на высоких частотах, доля кандидатов в HFR составляет всего 6% (таблица 3). Одной из возможных причин отсутствия HFR в выборке ярких радиогалактик может быть использованный в работе метод отбора. Относительно низкая частота селекции (1.4 ГГц) могла привести к отсутствию источников с растущим спектром, имеющих спектральную плотность потока менее 20 мЯн на МГц частотах.

Спектры PS-галактик были аппроксимированы функцией, описывающей синхротронное излучение с самопоглощением электронов со степенным распределением энергии в однородном магнитном поле (Pacholczyk, 1970; Türler et al., 1999):

$$S_\nu = S_{\text{peak}} \left( \frac{\nu}{\nu_{\text{peak}}} \right)^{\alpha_{\text{thick}}} \times \frac{1 - \exp(-\tau_m (\nu/\nu_{\text{peak}})^{\alpha_{\text{thin}} - \alpha_{\text{thick}}})}{1 - \exp(-\tau_m)}, \quad (3)$$

где  $\tau_m \approx \frac{3}{2} \left( \sqrt{1 - \frac{8\alpha_{\text{thin}}}{3\alpha_{\text{thick}}}} - 1 \right)$ ;  $\nu_{\text{peak}}$  — частота пика в спектре;  $S_{\text{peak}}$  — максимальная спектральная плотность потока на частоте пика;  $\alpha_{\text{thin}}$  и  $\alpha_{\text{thick}}$  — спектральные индексы оптически тонкой и толстой частей спектра;  $\tau_m$  — оптическая толщина на частоте пика. Параметры аппроксимации спектров с пиком приведены в таблице 10 (колонки (3)–(6)). Большинство спектров хорошо описываются спектральными индексами  $\alpha_{\text{thick}} = 0.25 \div 0.75$  и  $\alpha_{\text{thin}} = -0.40 \div -1.20$ . Три источника (J0745+1011, J1521+0430, J1606+3124) имеют спектральную «upturn» компоненту на частотах ниже 1 ГГц. Оптически тонкие области спектров предполагают дополнительное поглощение для J0122+1923 выше 9 ГГц и для J2227–2705 выше 2 ГГц.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассчитанные для выборки радиопараметры приведены в таблице 7: радиосветимость на 5 ГГц, логарифм радиогромкости, вычисленной двумя способами, спектральные индексы  $\alpha_{\text{low}}$  и  $\alpha_{\text{high}}$ , тип радиоспектра и частота пика в наблюдаемом спектре. Ниже обсуждается дихотомия типов источников в выборке, свойства в среднем ИК-диапазоне и классификация, PS-галактики и характеристики переменности.

**Таблица 10.** Список PS-галактик. Колонки: (1) — имя источника, (2) — спектральные типы в соответствии с частотой пика, (3)–(4) — спектральные индексы  $\alpha_{\text{thick}}$  и  $\alpha_{\text{thin}}$ , (5) — частота пика в спектре, рассчитанная в системе отсчета наблюдателя  $\nu_{\text{peak}}$ , (6) — пиковая спектральная плотность потока  $S_{\text{peak}}$ , (7) — индекс переменности  $V_{S_5}$ , (8) — спроецированные линейные размеры на оси RA и Dec, (9) — частота, на которой был посчитан линейный размер, (10) — литературный источник

Имя	Сп. тип	$\alpha_{\text{thin}}$	$\alpha_{\text{thick}}$	$\nu_{\text{peak}}$ , ГГц	$S_{\text{peak}}$ , Ян	$V_{S_5}$	LS, кпк	Частота, ГГц	Ссылка
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
J0101–2831	MPS	$-0.77 \pm 0.05$	$+0.35 \pm 0.04$	$0.27 \pm 0.01$	$1.07 \pm 0.02$	0.11	$0.022 \times 0.052$	8.7	[1], [4]
J0116–2052	MPS	$-1.04 \pm 0.04$	$+0.10 \pm 0.04$	$0.08 \pm 0.01$	$13.36 \pm 0.09$	0.18	$0.358 \times 0.152$	8.7	[1], [4],[5]
J0117+0114	MPS	$-0.76 \pm 0.10$	$+5.61 \pm 0.28$	$0.11 \pm 0.01$	$0.18 \pm 0.01$				
J0122+1923	MPS	$-0.83 \pm 0.08$	$+1.05 \pm 0.28$	$0.17 \pm 0.01$	$1.38 \pm 0.03$	0.24	$0.133 \times 0.800$	8.7	[1], [4]
J0148+1028	MPS	$-1.20 \pm 0.11$	$+0.41 \pm 0.06$	$0.32 \pm 0.02$	$1.05 \pm 0.03$	0.34	$0.130 \times 0.152$	8.7	[1], [4]
J0232–0742	MPS	$-0.46 \pm 0.37$	$+1.37 \pm 2.48$	$0.17 \pm 0.06$	$0.09 \pm 0.01$				
J0432+4138	MPS	$-0.72 \pm 0.02$	$+0.25 \pm 0.06$	$0.16 \pm 0.02$	$17.62 \pm 0.24$	0.11	$0.340 \times 0.059$	8.7	[1], [6]
J0745+1011	GPS	$-0.99 \pm 0.03$	$+0.44 \pm 0.02$	$2.31 \pm 0.04$	$4.17 \pm 0.02$	0.16	$0.039 \times 0.075$	7.6	[7]
J0837–1951	MPS	$-1.11 \pm 0.04$	$+0.66 \pm 0.04$	$0.34 \pm 0.01$	$11.15 \pm 0.13$	0.33	$0.160 \times 0.320$	7.6	[1], [4]
J0904+4727	GPS	$-0.57 \pm 0.56$	$+0.72 \pm 0.64$	$1.68 \pm 0.54$	$0.22 \pm 0.02$	0.22	$0.073 \times 0.073$	4.8	[1]
J0909+4753	MPS	$-0.53 \pm 0.16$	$+0.56 \pm 0.37$	$0.53 \pm 0.07$	$0.31 \pm 0.02$	0.46	$0.058 \times 0.054$	8.7	[1]
J1002+0158	MPS	-2.60	+0.33	1.42	0.03				
J1109+3744	MPS	$-0.53 \pm 0.07$	$+0.71 \pm 0.45$	$0.50 \pm 0.06$	$1.45 \pm 0.06$	0.41	$0.086 \times 0.138$	7.6	[1]
J1126+3345	MPS	$-1.30 \pm 0.08$	$+0.26 \pm 0.05$	$0.24 \pm 0.01$	$3.57 \pm 0.06$	0.12	$0.025 \times 0.071$	7.6	[1]
J1129+5025	MPS	$-0.89 \pm 0.08$	$+0.52 \pm 0.43$	$0.06 \pm 0.01$	$7.23 \pm 0.18$	0.10	$0.061 \times 0.168$	7.6	[1]
J1133+2936	MPS	$-0.75 \pm 0.04$	$+5.49 \pm 0.08$	$0.09 \pm 0.01$	$1.30 \pm 0.03$				
J1232+6644	GPS	$-0.68 \pm 0.13$	$+6.42 \pm 0.55$	$0.51 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.03$	0.05			
J1438+0150	MPS	$-0.8 \pm 0.09$	$+7.73 \pm 0.01$	$0.09 \pm 0.01$	$0.83 \pm 0.03$				
J1459+4442	HFP	$-0.77 \pm 0.21$	$+0.35 \pm 0.06$	$7.58 \pm 0.55$	$0.21 \pm 0.01$	0.15	$0.058 \times 0.042$	8.7	[1]
J1521+0430	GPS	$-1.47 \pm 0.08$	$+0.50 \pm 0.04$	$0.84 \pm 0.03$	$4.77 \pm 0.11$	0.18	$0.047 \times 0.076$	8.7	[1], [8]
J1541+3840	GPS	$-0.82 \pm 0.18$	$+0.35 \pm 0.18$	$0.74 \pm 0.09$	$0.07 \pm 0.01$				
J1545+4130	GPS	$-0.17 \pm 0.03$	$+3.11 \pm 1.66$	$0.37 \pm 0.11$	$0.09 \pm 0.01$	0.13	$0.041 \times 0.100$	7.6	[1]
J1550+4536	GPS	$-1.97 \pm 0.39$	$+0.35 \pm 0.06$	$5.21 \pm 0.63$	$0.07 \pm 0.01$	0.16	$0.032 \times 0.062$	7.6	[1]
J1602+3326	GPS	$-0.64 \pm 0.05$	$+0.20 \pm 0.05$	$0.70 \pm 0.06$	$2.79 \pm 0.06$	0.33	$0.114 \times 0.033$	7.6	[1], [8]
J1606+3124	GPS	$-0.84 \pm 0.09$	$+0.33 \pm 0.10$	$2.43 \pm 0.16$	$0.73 \pm 0.02$	0.31	0.056	8.4	[2], [8]
J1640+1220	MPS	$-0.69 \pm 0.07$	$+0.01 \pm 0.09$	$0.07 \pm 0.42$	$4.05 \pm 2.28$	0.34	$0.090 \times 0.073$	7.6	[1], [9]
J2037–0010	MPS	$-0.98 \pm 0.22$	$+0.93 \pm 0.24$	$0.38 \pm 0.04$	$0.92 \pm 0.09$	0.18			
J2058+0542	MPS	$-0.97 \pm 0.02$	$+0.73 \pm 0.05$	$0.2 \pm 0.01$	$2.89 \pm 0.04$	0.20	$0.126 \times 0.337$	7.6	[1], [9]
J2227–2705	MPS	$-0.96 \pm 0.07$	$+1.09 \pm 0.17$	$0.17 \pm 0.01$	$1.42 \pm 0.01$		3.3	4.8/8.4 <sup>a</sup>	[3], [4]
J2250+7129	MPS	$-1.13 \pm 0.06$	$+0.12 \pm 0.05$	$0.05 \pm 0.01$	$13.93 \pm 0.49$	0.03	$0.100 \times 0.173$	7.6	[1], [10]
J2307+1450	HFP	$-3.42 \pm 1.37$	$+0.40 \pm 0.10$	$7.24 \pm 1.46$	$0.22 \pm 0.01$	0.42	$0.025 \times 0.061$	7.6	[1]

<sup>a</sup> данные VLA. Ссылки на определение размеров галактик: [1] — Astrogeo database, [2] — An et al. (2022), [3] — Nesvadba et al. (2017); ссылки на классификацию GPS: [4] — Callingham et al. (2017), [5] — Randall et al. (2011), [6] — O’Dea (1998), [7] — Spoelstra et al. (1985), [8] — O’Dea et al. (1991), [9] — Snellen et al. (2002), [10] — Sanghera et al. (1995).

### 6.1. Сравнение далеких радиогалактик и квазаров

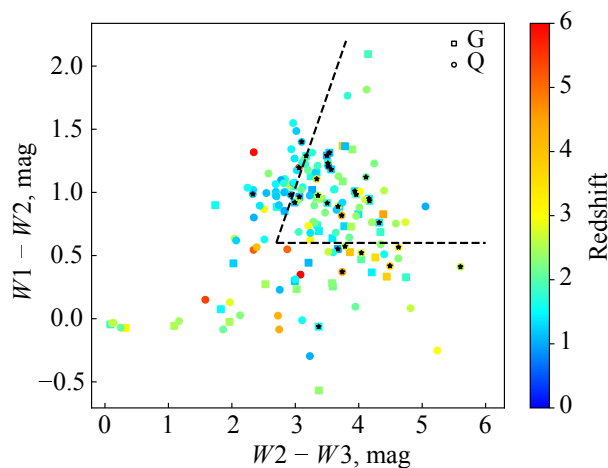
В работе Sotnikova et al. (2021) авторы исследовали радиосвойства 102 квазаров на красных смещениях  $z \geq 3$ . В ней параметры квазаров сравнены с аналогичными параметрами далеких радиогалактик. Объекты в двух выборках имеют разные распределения по спектральному типу: среди квазаров на  $z \geq 3$  преобладают источники с пиковым и плоским радиоспектромами (70% выборки) и только 15% источников имеют крутой спектр. В то же время галактики из нашей выборки имеют в основном крутые и ультракрутые спектры (60% выборки) и 33% имеют пиковый или плоский спектры. Эти отличия говорят о доминирующем вкладе компактного яркого радиоядра в суммарный спектр квазаров, тогда как для галактик радиоядро выражено меньше. Средние радиоспектры квазаров и галактик также демонстрируют разное спектральное поведение источников в обеих выборках. Во-первых, существуют различия в спектральных индексах: галактики обладают крутыми спектральными индексами, тогда как квазары — плоскими (таблица 5). Во-вторых, средние спектры квазаров показывают наличие пиков, находящихся в диапазоне от 0.5 до 5.4 ГГц (таблица 5), тогда как в средних спектрах галактик пик не проявляется за исключением четырех случаев.

На рис. 8 показаны распределения радиосветимости для далеких галактик и квазаров. Статистические свойства данных распределений представлены в таблице 6. Получено, что далекие квазары обладают распределением радиосветимости, аналогичным подвыборке G (и группе с высокой светимостью в подвыборке Q). Этот факт можно объяснить эффектом селекции: на больших красных смещениях более яркие квазары легче детектировать.

Рисунок 10а показывает, что распределения радиогромкости для далеких квазаров и Q-подвыборки схожи (см. также таблицу 6). Это ожидаемый результат, если далекие квазары и Q подвыборка представляют один и тот же тип источников с непрерывным распределением радиосвойств. В то же время далекие квазары имеют меньшую радиогромкость относительно группы G. Связано это с тем, что квазары обычно ярче радиогалактик в оптическом диапазоне.

### 6.2. Цветовая диаграмма WISE

Для всех источников выборки был проведен поиск аналогов в среднем ИК-диапазоне по каталогу всего неба Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE, Wright et al, 2010). Сопоставлены положения источников с каталогом WISE с радиусом поиска  $20''$ . Для каждого источника, имеющего



**Рис. 15.** Цветовая диаграмма WISE для исследуемой выборки. Точки показаны цветом в соответствии со значениями красных смещений источников. В области, выделенной пунктирными линиями, располагаются далекие объекты из Krogager et al. (2018); Stern et al. (2005). Черными звездочками выделены MPS-объекты.

несколько совпадений в каталоге WISE, расположенных в указанной области, выбирался объект, ближайший по координатам.

На рис. 15 показана цветовая диаграмма WISE для выборки (« $W1 - W2$ » — « $W2 - W3$ », где  $W1$ ,  $W2$  и  $W3$  величины WISE на рабочих длинах волн 3.4, 4.6, и 12 мкм). Подвыборки G и Q отмечены квадратами и кружками соответственно. Точки показаны цветом в соответствии со значениями красных смещений источников.

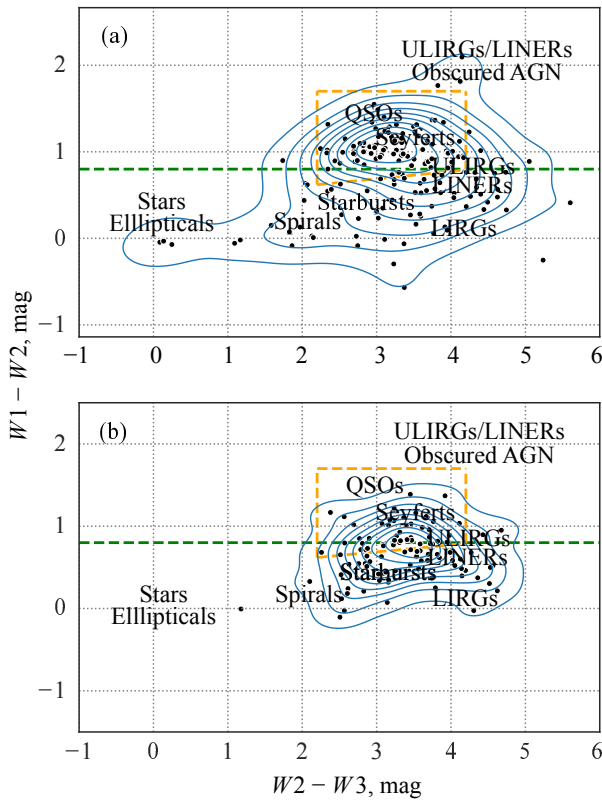
Как и ожидалось, подвыборка Q является слабой ( $W1 > 15$  mag) и имеет цвет  $W1 - W2$ , смещенный в красную часть спектра. Популяция G имеет средний цвет  $W1 - W2$ , равный 0.8 mag.

В статье Krogager et al. (2018) на рис. 2 приведена цветовая диаграмма WISE-радиоисточников, которые были идентифицированы как квазары в спектроскопическом каталоге SDSS. Для выделения близких квазаров авторы использовали следующие фотометрические условия:

$$W1 - W2 < 1.3 (W2 - W3) - 3.04 \text{ и } W1 - W2 > 0.6.$$

Эта же область изображена на рис. 15 (пунктирная черная линия показывает область цветового пространства, где могут быть обнаружены объекты с высокими красными смещениями). Как и ожидалось (Lacy et al., 2004; Stern et al., 2005; Krogager et al., 2018), здесь доминирует подвыборка Q на  $z > 2$  (73% от всего количества объектов в этой области). В этой же области относительно много объектов с меньшими красными смещениями ( $1 < z < 2$ ), что, скорее всего, связано с неполнотой выборки. Тот факт, что почти все объекты MPS находятся в выделенной области, подтверждает, что эти галактики являются далекими.





**Рис. 16.** Цветовая диаграмма WISE: (a) для объектов нашей выборки, (b) для ярких квазаров на  $z \geq 3$  (Sotnikova et al. (2021)). Зеленая штриховая линия ( $W1 - W2 = 0.8$ ) — порог, выше которого ожидается QSO (Stern et al., 2012). Оранжевая пунктирная линия — область АЯГ, согласно Jarrett et al. (2011).

На рис. 16 показаны цветовые диаграммы WISE для нашей выборки и для выборки ярких квазаров  $z \geq 3$  из Sotnikova et al. (2021). Подписи указывают на области с различными типами объектов. Сравнивая две панели рис. 16, отметим более широкое разнообразие ИК-свойств для галактик из нашей выборки. Несмотря на то, что две выборки неполные и разные, очевидно, что собранный список галактик неоднороден и содержит различные типы АЯГ.

При этом неизбежно выпадение некоторого количества объектов из их области. Оранжевой линией отмечена область АЯГ, включающая QSO и сейфертовские галактики WISE (Jarrett et al., 2011):  $W2 - W3 > 2.2$  и  $W2 - W3 < 4.2$ ,  $W1 - W2 > 0.1(W2 - W3) + 0.38$  и  $W1 - W2 < 1.7$ .

Пятьдесят четыре процента наших объектов, включая большинство MPS, находятся внутри этой области. Большинство изученных объектов расположены в области QSO WISE над  $W1 - W2 = 0.8$  mag (Stern et al., 2012) (рис. 16а).

### 6.3. PS-источники на больших красных смещениях

В нашей выборке была обнаружена 31 галактика с пиком в радиоспектре (18% от всей выборки), что составляет значительно меньшую долю, чем в выборке ярких квазаров на  $z \geq 3$  в работе Sotnikova et al. (2021), где было найдено 46% таких источников. Тем не менее, эта доля больше, чем в некоторых смешанных выборках галактик и квазаров. Например, в работе O’Dea (1990) авторы идентифицировали около 10% выборки как PS. Незначительная доля, не более 10%, радиоисточников показывает спектр с максимумом в полной по спектральной плотности потока 1 Ян выборке (Ade et al., 2011), большинство из них блазары. В выборке из Mingaliev et al. (2013) обнаружено всего несколько процентов источников, имеющих пиковый радиоспектр на длительном масштабе времени. Среди 5890 радиоисточников из полной по спектральной плотности потока 40 мЯн выборки обзора AT20G 21% объектов имеют спектр с максимумом (Murphy et al., 2010).

Также установлено, что большинство PS-галактик в исследуемой выборке являются кандидатами в MPS-источники (20 из 31 источника). Их значения красного смещения и малые угловые размеры соответствуют общепринятым критериям свойств MPS-источников, что позволяет рассматривать все 20 галактик с  $\nu_{\text{peak,obs}} < 1$  ГГц как кандидаты в MPS. Медианное значение их красного смещения равно 1.6. Для надежной классификации всех типов PS-источников в выборке требуются одновременные многочастотные радиоизмерения для определения частоты максимума в их спектре, предпочтительно за несколько разных эпох, и долговременный мониторинг на нескольких частотах, чтобы оценить переменность их радиоизлучения.

Обнаруженные PS-квазары находятся на больших красных смещениях, чем квазары с другими типами спектров. Так, для 18 далеких PS-квазаров медианное значение красного смещения  $\langle z \rangle = 2.74$ , а для остальных 96 квазаров  $\langle z \rangle = 1.83$ . Это подтверждает обоснованность метода поиска молодых и далеких АЯГ среди MPS источников (см., например, Correjans et al., 2015). Однако этот метод не подходит для поиска далеких галактик.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформирована выборка 173 радиоярких HzRGs ( $S_{1.4} \geq 20$  мЯн) на красных смещениях  $z \geq 1$  для исследования их радиосвойств. Используя доступные литературные данные в широком диапазоне частот (74 МГц–22 ГГц) на временном масштабе до 30 лет, были построены радиоспектры и проведена

их классификация. У большинства галактик (60% выборки) обнаружены крутые и ультракрутые радиоспектры. Спектральные индексы, рассчитанные на высоких и низких частотах, варьируются в пределах от  $-0.6$  до  $-1$ , с медианными значениями  $\alpha_{\text{low}} = -0.77$  для галактик, не идентифицированных с квазарами, и  $\alpha_{\text{low}} = -0.56$  — для галактик с квазарами (раздел 3.1). Медианное значение спектрального индекса для всей выборки  $\alpha_{\text{low}} = -0.63$  хорошо согласуется с результатами предыдущих работ (например, Mauch et al., 2013; Ramasawmy et al., 2021). В сравнении со значениями спектральных индексов для радиисточников третьего Кембриджского (3С) каталога (Kellermann et al., 1969), где значение  $\alpha_{0.75-5} = -0.85$  было получено для галактик и значение  $\alpha_{0.75-5} = -0.79$  для квазаров, в данной работе была получена схожая крутизна радиоспектра для галактик и более плоский радиоспектр для квазаров на низких частотах  $\alpha_{\text{low}}$  (0.10–7.4 ГГц).

Порядка 18% из всей выборки (31 из 173 источников) были классифицированы как PS с преобладанием среди них типа MPS (20/31). Большинство из них находится в соответствующей области АЯГ на больших красных смещениях на цветовой диаграмме WISE.

При рассмотрении всей выборки подтверждения эволюции радиоспектра с красным смещением, то есть корреляции « $\alpha - z$ », при которой у более далеких галактик наблюдается укрупнение радиоспектра, найдено не было. Подозревая влияние наличия значительного числа квазаров в исследуемой выборке, упомянутая корреляция была проверена для 59 галактик, не идентифицированных с квазарами или блазарами. В таком случае, действительно, обнаруживается антикорреляция красного смещения  $z$  со спектральным индексом  $\alpha_{\text{low}}$ , а также со спектральным индексом  $\alpha_{5-10}$ , рассчитанным с  $k$ -поправкой на частотах 5–10 ГГц в системе отчета источника, как это было найдено в ряде предыдущих работ (например, Miley and De Breuck, 2008a; Afonso et al., 2011).

Значения спектральных индексов, полученные на частоте 1–10 ГГц в системе отчета наблюдателя, свидетельствуют об оптически тонкой среде излучения на частотах 2–30 ГГц в системе отчета источника для большинства объектов выборки. Шестнадцать процентов объектов выборки характеризуются плоским радиоспектром компактного ядра квазаров. Наблюдается систематическое уплощение радиоспектра на низких частотах (5 ГГц) относительно высоких частот (11 ГГц). Предположительно, это объясняется механизмом синхротронного самопоглощения, модель которого достаточно хорошо описывает форму радиоспектра большинства PS-галактик выборки (раздел 5).

Анализ модуляционного индекса и индекса переменности показал, что медианное значение переменности на частоте 11 ГГц выше, чем на частоте 5 ГГц. Так как радиоспектр большинства объектов (78%) имеет свойство становиться круче на высоких частотах (то есть спектральная плотность потока быстрее падает с ростом частоты), предполагается, что это приводит к эффекту селекции, когда на высоких частотах преимущественно детектируются более переменные источники. Медианные значения переменности спектральной плотности потока равны  $V_{S_{11}} = 0.14$  и  $V_{S_5} = 0.13$ , что свидетельствует о слабой и умеренной переменности исследованных радиогалактик. Для нескольких блазаров получена высокая переменность радиоизлучения, вплоть до 50%, но у большинства объектов выборки отмечается умеренная переменность порядка 20%, что является типичным значением для галактик с АЯГ и квазарами на небольших красных смещениях (Fan et al., 2007). Данная работа показала, что переменность ярких радиогалактик на больших красных смещениях, вплоть до  $z = 5$ , значительно не отличается от переменности радиогалактик на  $z < 1$  (имеющих характерные значения 10–20%). Такая переменность, по видимому, вызвана схожими физическими условиями в центрах галактик, откуда исходит радиоизлучение, а именно, процессами вокруг массивного центрального объекта, то есть излучением релятивистского джета, и последствием его распространения в межзвездной среде. Для АЯГ подобная умеренная переменность на масштабах десятков лет предположительно происходит в самом радиоядре (например, Marscher et al., 2008). Для детального исследования процессов и локализации источника радиоизлучения в каждом конкретном случае необходим анализ одновременных измерений на нескольких частотах и эволюции радиоспектра.

При использовании базы астрономических данных NED оказалось, что в выборку далеких и радиогромких радиогалактик попадают объекты самых разных типов: от различных классов блазаров до АЯГ и квазаров. Выявлено, что большая часть радиогалактик выборки идентифицируется с квазарами (114 из 173 источников). Разнообразие полученных характеристик объектов (типы радиоспектров, значения радиосветимости, амплитуды переменности, распределение объектов на WISE-диаграмме) подтверждает многообразие условий формирования радиоизлучения в радиогалактиках.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Часть наблюдательных данных получена на научном оборудовании УНУ РАТАН-600 САО РАН.

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты». В исследовании использовалась база данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) и база данных радиоастрономических каталогов CATS, доступная на сайте САО РАН.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Дополнительные материалы, представленные онлайн, включают полные версии рисунка 3, таблиц 2 и 7.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, id. A14 (2011).
2. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A13 (2016).
3. J. Afonso, L. Bizzocchi, E. Ibar, et al., *Astrophys. J.* **743** (2), article id. 122 (2011).
4. M. F. Aller, H. D. Aller, and P. A. Hughes, *Astrophys. J.* **399**, 16 (1992).
5. T. An, A. Wang, Y. Zhang, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **511** (3), 4572 (2022).
6. A. K. Aniyani and K. Thorat, *Astrophys. J. Suppl.* **230** (2), article id. 20 (2017).
7. S. K. Balayan and O. V. Verkhodanov, *Astrophysics* **47** (4), 505 (2004).
8. R. H. Becker, R. L. White, and D. J. Helfand, *ASP Conf. Ser.* **61**, 165 (1994).
9. J. J. Bryant, H. M. Johnston, J. W. Broderick, et al., *Astron. and Astrophys.* **395**, 1099 (2009).
10. N. N. Bursov, N. M. Lipovka, N. S. Soboleva, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **42**, 5 (1996).
11. J. R. Callingham, R. D. Ekers, B. M. Gaensler, et al., *Astrophys. J.* **836** (2), article id. 174 (2017).
12. K. C. Chambers, G. K. Miley, W. J. M. van Breugel, and J. S. Huang, *Astrophys. J. Suppl.* **106**, 215 (1996).
13. Z.-F. Chen, W.-R. Huang, T.-T. Pang, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **235** (1), article id. 11 (2018).
14. Z.-F. Chen, S.-X. Yi, T.-T. Pang, et al., *Astron. and Astrophys.* **244** (2), article id. 36 (2019).
15. J. H. Y. Ching, E. M. Sadler, S. M. Croom, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (2), 1306 (2017).
16. A. S. Cohen, W. M. Lane, W. D. Cotton, et al., *Astron. J.* **134** (3), 1245 (2007).
17. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115** (5), 1693 (1998).
18. E. A. Cooke, N. A. Hatch, A. Rettura, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452** (3), 2318 (2015).
19. R. Coppejans, D. Cseh, S. van Velzen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 2455 (2016a).
20. R. Coppejans, D. Cseh, W. L. Williams, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450** (2), 1477 (2015).
21. R. Coppejans, S. Frey, D. Cseh, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463**, 3260 (2016b).
22. R. Coppejans, S. van Velzen, H. T. Intema, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467** (2), 2039 (2017).
23. R. D'Abrusco, N. Álvarez Crespo, F. Massaro, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **242** (1), article id. 4 (2019).
24. D. Dallacasa, C. Stanghellini, M. Centonza, and R. Fanti, *Astron. and Astrophys.* **363**, 887 (2000).
25. A. L. R. Danielson, A. M. Swinbank, I. Smail, et al., *Astrophys. J.* **840** (2), article id. 78 (2017).
26. C. De Breuck, N. Seymour, D. Stern, et al., *Astrophys. J.* **725**, 36 (2010).
27. C. De Breuck, W. van Breugel, H. J. A. Röttgering, and G. Miley, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 303 (2000).
28. W. H. de Vries, P. D. Barthel, and C. P. O'Dea, *Astron. and Astrophys.* **321**, 105 (1997).
29. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozayan, et al., *Astron. J.* **111**, 1945 (1996).
30. P. G. Edwards and S. J. Tingay, *Astron. and Astrophys.* **424**, 91 (2004).
31. H. Falcke, E. Körding, and N. M. Nagar, *New Astronomy Reviews* **48** (11-12), 1157 (2004).
32. J. H. Fan, Y. Liu, Y. H. Yuan, et al., *Astron. and Astrophys.* **462** (2), 547 (2007).
33. R. Fanti, C. Fanti, R. T. Schilizzi, et al., *Astron. and Astrophys.* **231**, 333 (1990).
34. S. Frey, Z. Paragi, L. I. Gurvits, et al., *Astron. and Astrophys.* **524**, id. A83 (2010).
35. K. É. Gabányi, S. Frey, T. An, et al. *Astronomische Nachrichten* **342**, 1092 (2021).
36. M. A. Gendre and J. V. Wall, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **390** (2), 819 (2008).
37. Z. Ghaffari, M. Haas, M. Chiaberge, et al., *Astron. and Astrophys.* **653**, id. 28 (2021).
38. G. Ghisellini, A. Celotti, F. Tavecchio, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **438**, 2694 (2014).
39. A. Ginsburg, B. M. Sipőcz, C. E. Brasseur, et al., *Astron. J.* **157** (3), article id. 98 (2019).
40. V. L. Gorokhov and O. V. Verkhodanov, *Astronomy Letters* **20**, 671 (1994).
41. J. F. R. Gower, P. F. Scott, and D. Wills, *Memoirs of the Royal Astronomical Society* **71**, 49 (1967).
42. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
43. N. Gupta and D. J. Saikia, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **370** (2), 738 (2006).

44. J. J. Harwood, M. J. Hardcastle, and J. H. Croston, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454** (4), 3403 (2015).
45. J. J. Harwood, M. J. Hardcastle, J. H. Croston, and J. L. Goodger, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (4), 3353 (2013).
46. S. E. Healey, R. W. Romani, G. Cotter, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **175** (1), 97 (2008).
47. S. E. Healey, R. W. Romani, G. B. Taylor, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **171** (1), 61 (2007).
48. E. Hodges-Kluck, E. Gallo, G. Ghisellini, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **505** (1), 1543 (2021).
49. N. Hurley-Walker, J. R. Callingham, P. J. Hancock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 1146 (2017).
50. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A78 (2017).
51. T. H. Jarrett, M. Cohen, F. Masci, et al., *Astron. J.* **735** (2), article id. 112 (2011).
52. A. Jimenez-Gallardo, F. Massaro, M. A. Prieto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **250** (1), id. 7 (2020).
53. K. I. Kellermann, *Astrophys. J.* **140**, 969 (1964).
54. K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, and P. J. S. Williams, *Astrophys. J.* **157**, 1 (1969).
55. K. I. Kellermann, R. Sramek, M. Schmidt, et al., *Astron. J.* **98**, 1195 (1989).
56. L. M. Ker, P. N. Best, E. E. Rigby, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **420** (3), 2644 (2012).
57. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **64** (2), 123 (2009a).
58. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **64** (3), 276 (2009b).
59. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **64** (4), 340 (2009c).
60. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Y. N. Parijskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **63**, 95 (2008).
61. S. O. Kiiikov, M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, and M. S. Stupalov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 5 (2002).
62. I. J. Klammer, R. D. Ekers, J. J. Bryant, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **371** (2), 852 (2006).
63. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Y. N. Pariiskii, et al., *Astronomy Letters* **32** (7), 433 (2006).
64. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
65. A. Kraus, T. P. Krichbaum, R. Wegner, et al., *Astron. and Astrophys.* **401**, 161 (2003).
66. M. Krezinger, K. Perger, K. É. Gabányi, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **260** (2), id. 49 (2022).
67. J. K. Krogager, N. Gupta, P. Noterdaeme, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **235** (1), article id. 10 (2018).
68. A. Labiano, P. D. Barthel, C. P. O'Dea, et al., *Astron. and Astrophys.* **463** (1), 97 (2007).
69. M. Lacy, S. A. Baum, C. J. Chandler, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **132** (1009), id. 035001 (2020).
70. M. Lacy, L. J. Storrie-Lombardi, A. Sajina, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154** (1), 166 (2004).
71. M. Langejahn, M. Kadler, J. Wilms, et al., *Astron. and Astrophys.* **637**, id. 55 (2020).
72. G. B. Lansbury, D. Stern, J. Aird, et al., *Astrophys. J.* **836** (1), article id. 99 (2017).
73. A. Lawrence, A. G. Bruce, C. MacLeod, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463** (1), 296 (2016).
74. T. J. W. Lazio, E. B. Waltman, F. D. Ghigo, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **136** (2), 265 (2001).
75. M. Liao and M. Gu, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **491** (1), 92 (2020).
76. I. Liodakis, V. Pavlidou, T. Hovatta, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467** (4), 4565 (2017).
77. Y. Liu, D. R. Jiang, M. Gu, and L. I. Gurvits, *Astronomische Nachrichten* **337** (1-2), 101 (2016).
78. B. W. Lyke, A. N. Higley, J. N. McLane, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **250** (1), id. 8 (2020).
79. Z. Ma, H. Xu, J. Zhu, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **240** (2), article id. 34 (2019).
80. E. K. Majorova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **63**, 56 (2008).
81. Z. Malkin, *Astrophys. J. Suppl.* **239** (2), article id. 20 (2018).
82. A. P. Marscher, S. G. Jorstad, F. D. D'Arcangelo, et al., *Nature* **452** (7190), 966 (2008).
83. T. A. Matthews, W. W. Morgan, and M. Schmidt, *Astrophys. J.* **140**, 35 (1964).
84. T. Mauch, H.-R. Klöckner, S. Rawlings, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (1), 650 (2013).
85. G. Miley and C. De Breuck, *Astron. and Astrophys.* **15**, 67 (2008a).
86. G. Miley and C. De Breuck, *Astron. and Astrophys.* **15** (2), 67 (2008b).
87. M. Mingaliev, Y. Sotnikova, T. Mufakharov, et al., *Astronomische Nachrichten* **338**, 700 (2017).
88. M. G. Mingaliev, A. M. Botashev, and V. A. Stolyarov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **46**, 28 (1998).
89. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 262 (2013).
90. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Tornaiainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, A25 (2012).
91. M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, R. D. Davies, et al., *Astron. and Astrophys.* **370**, 78 (2001).
92. L. K. Morabito and J. J. Harwood, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **480** (2), 2726 (2018).
93. T. Mufakharov, A. Mikhailov, Y. Sotnikova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503** (3), 4662 (2021).
94. T. Murphy, E. M. Sadler, R. D. Ekers, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402** (4), 2403 (2010).
95. N. P. H. Nesvadba, C. De Breuck, M. D. Lehnert, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, id. 123 (2017).
96. G. Noirot, D. Stern, S. Mei, et al., *Astrophys. J.* **859** (1), article id. 38 (2018).
97. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 23 (2000).
98. C. P. O'Dea, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **245**, 20P (1990).
99. C. P. O'Dea, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 493 (1998).

100. C. P. O'Dea and S. A. Baum, *Astron. J.* **113**, 148 (1997).
101. C. P. O'Dea, S. A. Baum, and G. B. Morris, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **82**, 261 (1990).
102. C. P. O'Dea, S. A. Baum, and C. Stanghellini, *Astrophys. J.* **380**, 66 (1991).
103. C. P. O'Dea and D. J. Saikia, *Astron. and Astrophys.* **29** (1), 3 (2021).
104. A. G. Pacholczyk, *Radio Astrophysics. Nonthermal Processes in Galactic and Extragalactic Sources* (Freeman, San Francisco, 1970).
105. Y. N. Parijskij, W. M. Goss, O. V. Verkhodanov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **48**, 5 (1999).
106. Y. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2314 (2014).
107. I. Pâris, P. Petitjean, É. Aubourg, et al., *Astron. and Astrophys.* **563**, id. A54 (2014).
108. I. Pâris, P. Petitjean, É. Aubourg, et al., *Astron. and Astrophys.* **613**, id. A51 (2018).
109. G. Paturel, C. Petit, P. Prugniel, et al., *Astron. and Astrophys.* **412**, 45 (2003).
110. H. A. Peña-Herazo, F. Massaro, M. Gu, et al., *Astron. J.* **161** (4), id. 196 (2021).
111. P. Podigachoski, P. Barthel, M. Haas, et al., *Astrophys. J.* **806** (1), article id. L11 (2015).
112. J. Ramasawmy, J. E. Geach, M. J. Hardcastle, et al., *Astron. and Astrophys.* **648**, id. A14 (2021).
113. K. E. Randall, A. M. Hopkins, R. P. Norris, and P. G. Edwards, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **416** (2), 1135 (2011).
114. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 259 (1997).
115. G. T. Richards, R. P. Deo, M. Lacy, et al., *Astron. J.* **137** (4), 3884 (2009).
116. G. T. Richards, A. D. Myers, C. M. Peters, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219** (2), article id. 39 (2015).
117. J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, V. Pavlidou, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **194**, article id. 29 (2011).
118. R. W. Romani, D. Sowards-Emmerd, L. Greenhill, and P. Michelson, *Astrophys. J.* **610** (1), L9 (2004).
119. E. M. Sadler, R. Chhetri, J. Morgan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (1), 1354 (2019).
120. E. M. Sadler, R. Ricci, R. D. Ekers, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **371**, 898 (2006).
121. H. S. Sanghera, D. J. Saikia, E. Luedke, et al., *Astron. and Astrophys.* **295**, 629 (1995).
122. T. Sbarrato, G. Ghisellini, G. Tagliaferri, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446** (3), 2483 (2015).
123. R. O. Sexton, N. J. Secrest, M. C. Johnson, and B. N. Dorland, *Astrophys. J. Suppl.* **260** (2), id. 33 (2017).
124. N. Seymour, D. Stern, C. De Breuck, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **171**, 353 (2007).
125. V. Singh, A. Beelen, Y. Wadadekar, et al., *Astron. and Astrophys.* **569**, id. A52 (2014).
126. V. Smolčić, P. Ciliegì, V. Jelić, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **443** (3), 2590 (2014).
127. I. A. G. Snellen, M. D. Lehnert, M. N. Bremer, and R. T. Schilizzi, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **337**, 981 (2002).
128. I. A. G. Snellen, R. T. Schilizzi, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **131**, 435 (1998).
129. D. I. Solov'yov and O. V. Verkhodanov, *Astronomy Letters* **40**, 606 (2014a).
130. D. I. Solov'yov and O. V. Verkhodanov, *Astronomy Reports* **58**, 506 (2014b).
131. Y. Sotnikova, A. Mikhailov, T. Mufakharov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (2), 2798 (2021).
132. Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, E. K. Majorova, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 348 (2019).
133. J. Souchay, A. H. Andrei, C. Barache, et al., *Astron. and Astrophys.* **537**, id. A99 (2012).
134. J. Souchay, A. H. Andrei, C. Barache, et al., *Astron. and Astrophys.* **583**, id. A75 (2015).
135. C. Spingola, D. Dallacasa, S. Belladitta, et al., *Astron. and Astrophys.* **643**, id. L12 (2020).
136. H. Spinrad, S. Djorgovski, J. Marr, and L. Aguilar, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **97**, 932 (1985).
137. T. A. T. Spoelstra, A. R. Patnaik, and Gopal-Krishna, *Astron. and Astrophys.* **152**, 38 (1985).
138. D. Stern, R. J. Assef, D. J. Benford, et al., *Astrophys. J.* **753** (1), article id. 30 (2012).
139. D. Stern, A. Dey, H. Spinrad, et al., *Astron. J.* **171** (3), 1122 (1999).
140. D. Stern, P. Eisenhardt, V. Gorjian, et al., *Astrophys. J.* **631** (1), 163 (2005).
141. C. Tan, R. Xue, L.-M. Du, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **248** (2), 27 (2001).
142. A. G. G. M. Tielens, G. K. Miley, and A. G. Willis, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **35**, 153 (1979).
143. M. Tornikoski, M. Lainela, and E. Valtaoja, *Astron. J.* **120**, 2278 (2000).
144. S. A. Trushkin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **55**, 90 (2003).
145. M. Tucci, J. A. Rubiño-Martín, R. Rebolo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **386**, 1729 (2008).
146. M. Türler, T. J. L. Courvoisier, and S. Paltani, *Astron. and Astrophys.* **349**, 45 (1999).
147. W. van Breugel, C. De Breuck, S. A. Stanford, et al., *Astrophys. J.* **518** (2), L61 (1999).
148. O. V. Verkhodanov, *Astronomy Reports* **38**, 307 (1994).
149. O. V. Verkhodanov, in *Proc. 27th Radio Astronomical Conf. on Problems of Modern Radio Astronomy (Institute of Applied Astronomy of RAS, St.-Petersburg, 1997)*, Vol. 1, p. 322 [in Russian].
150. O. V. Verkhodanov, H. Andernach, and N. V. Verkhodanova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **29**, 53 (2000a).
151. O. V. Verkhodanov, V. H. Chavushyan, R. Mújica, et al., *Astronomy Reports* **47** (2), 119 (2003).
152. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh, et al., in *Proc. Intern. Conf. on Problems of Practical Cosmology, St. Petersburg, Russia, 2008*, Ed. by Yu. Baryshev I. N. Taganov and P. Teerikorpi (Russian Geographical Society, St. Petersburg, 2008), p. 247 (2008).

153. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, Y. N. Parijskij, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **48**, 41 (1999).
154. O. V. Verkhodanov, D. D. Kozlova, and Y. V. Sotnikova, *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 393 (2018).
155. O. V. Verkhodanov, A. I. Opylov, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomical and Astrophysical Transactions* **19**, 663 (2000b).
156. O. V. Verkhodanov and Y. Parijskij, *Radio galaxies and cosmology* (FizMatLit, Moscow, 2009) [in Russian].
157. O. V. Verkhodanov, Y. N. Parijskij, N. S. Soboleva, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **52**, 3 (2001).
158. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **50**, 115 (2000).
159. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
160. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, and V. N. Chernenkov, *Baltic Astronomy* **6**, 275 (1997).
161. O. V. Verkhodanov and N. V. Verkhodanova, *Astronomy Reports* **483**, 417 (1999).
162. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, and H. Andernach, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **64** (1), 72 (2009).
163. M. P. Véron-Cetty and P. Véron, *Astron. and Astrophys.* **412**, 399 (2003).
164. G. J. White, B. Hatsukade, C. Pearson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427** (3), 1830 (2012).
165. A. E. Wright, R. M. Wark, E. Troup, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **251**, 330 (1991).
166. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140** (6), 1868 (2010).
167. J. M. Wrobel, A. R. Patnaik, I. W. A. Browne, and P. N. Wilkinson, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **30**, 1308.
168. D. Wylezalek, J. Vernet, C. De Breuck, et al., *Astrophys. J.* **786** (1), article id. 17 (2014).
169. S. Yao, X.-B. Wu, Y. L. Ai, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **240** (1), article id. 6 (2019).
170. M. Zhou and M. Gu, *Astrophys. J.* **893** (1), id. 39 (2020).

### Radio Properties of High-Redshift Galaxies at $z \geq 1$

M. L. Khabibullina<sup>1</sup>, A. G. Mikhailov<sup>1</sup>, Yu. V. Sotnikova<sup>1</sup>, T. V. Mufakharov<sup>1,2</sup>, M. G. Mingaliev<sup>1,2,3</sup>,  
A. A. Kudryashova<sup>1</sup>, N. N. Bursov<sup>1</sup>, V. A. Stolyarov<sup>1,4</sup>, and R. Y. Udovitskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

<sup>3</sup>Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

<sup>4</sup>Astrophysics Group, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge, CB3 0HE, UK

Study of high-redshift radio galaxies (HzRGs) can shed light on the active galactic nuclei (AGNs) evolution in massive elliptical galaxies. The vast majority of observed high-redshift AGNs are quasars, and there are very few radio galaxies at redshifts  $z > 3$ . We present the radio properties of 173 sources optically identified with radio galaxies at  $z \geq 1$  with flux densities  $S_{1.4} \geq 20$  mJy. Literature data were collected for compilation of broadband radio spectra, estimation of radio variability, radio luminosity, and radio loudness. Almost 60% of the galaxies have steep or ultra-steep radio spectra; 22% have flat, inverted, upturn, and complex spectral shapes, and 18% have peaked spectra (PS). The majority of the PS sources in the sample (20/31) are megahertz-peaked spectrum source candidates, i.e. possibly very young and compact radio galaxies. The median values of the variability indices at 11 and 5 GHz are  $V_{S_{11}} = 0.14$  and  $V_{S_5} = 0.13$ , which generally indicates a weak or moderate character of the long-term variability of the studied galaxies. The typical radio luminosity and radio loudness are  $L_5 = 10^{43} - 10^{44}$  erg s<sup>-1</sup> and  $\log R = 3 - 4$  respectively. We have found less prominent features of the bright compact radio cores in our sample compared to high-redshift quasars at  $z \geq 3$ . The variety of the obtained radio properties shows the different conditions for the formation of radio emission sources in galaxies.

Keywords: *galaxies: active—galaxies: high-redshift—quasars: general—radio continuum: galaxies*