

УДК 524.7

РАДИОСВОЙСТВА ГАЛАКТИК FR0 ПО МНОГОЧАСТОТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА РАТАН-600

© 2021 г. А. Г. Михайлов^{1,*}, Ю. В. Сотникова^{1,**}

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

*E-mail: mag10629@yandex.ru

**E-mail: lacerta999@gmail.com

Поступила в редакцию 05.10.2020 г.

После доработки 30.11.2020 г.

Принята к публикации 16.12.2020 г.

Исследования последних лет показали, что среди популяции радиогромких активных ядер галактик в ближней Вселенной численно доминируют компактные радиоисточники класса FR0. В данной работе представлены результаты наблюдений выборки 33 радиогалактик FR0 на РАТАН-600 в первом полугодии 2020 г. Впервые измерены квазиодновременные спектры объектов данного класса в столь широком диапазоне частот: 2.25–22.3 ГГц. Радиосветимость объектов выборки на частоте 4.7 ГГц варьируется в пределах $10^{38.8-40.6}$ эрг/с со средним значением $10^{39.7}$ эрг/с. Полученные данные подтверждают дефицит протяженного радиоизлучения: среднее значение параметра доминирования радиоядра ($\log R \approx -0.10$) существенно превосходит значения, характерные для радиогалактик FRI. Квазиодновременные спектры плоские, а в диапазоне 4.7–8.2 ГГц средний спектральный индекс близок к нулю. Спектры 44% объектов с 3 и более квазиодновременными точками обладают максимумом (peaked-форма спектра). Привлечение дополнительных данных каталогов позволило выделить 3 новых кандидата в источники с максимумом спектра в гигагерцовом диапазоне. Найдена статистически значимая корреляция между мощностью джета парсековых масштабов и болометрической светимостью аккреционного диска: $\log \frac{L_j}{L_{\text{Edd}}} = (0.52 \pm 0.15) \log \frac{L_{\text{bol}}}{L_{\text{Edd}}} - (0.69 \pm 0.51)$. В целом спектры исследованных объектов плоские и обладают сложной структурой, что говорит о большой степени непрозрачности в радиодиапазоне и вкладе в результирующий спектр нескольких компонент.

DOI: 10.31857/S0004629921040022

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиогалактики FR0 представляют собой класс активных ядер галактик (АЯГ) с радиосветимостями порядка $10^{38}-10^{40}$ эрг/с на частоте 1.4 ГГц [1–5]. Они характеризуются компактностью (размер радиоизлучающей области менее 5 кпк) и преобладанием радиоядра: в сравнении с радиогалактиками FRI параметр доминирования радиоядра больше в ~ 30 раз [6, 7]. FR0 располагаются преимущественно в ярких красных галактиках ранних типов с массами сверхмассивных черных дыр (СМЧД) $10^8-10^9 M_{\odot}$ и спектроскопически классифицируются как галактики с эмиссионными линиями низкого возбуждения (low-excitation galaxies, LEG), что делает их схожими с радиогалактиками FRI. Согласно оценкам численной плотности, галактики FR0 являются самыми многочисленными из радиогромких объектов в ближней Вселенной. Их количество по

сравнению с радиогалактиками FRI примерно в 5 раз больше [5]. Исследование крупномасштабного окружения FR0 и FRI радиогалактик показало, что средняя плотность галактик вокруг FR0 в 2 раза ниже, чем вокруг галактик FRI [8]. Большинство FR0 входят в группы, содержащие менее 15 галактик. Наряду с дефицитом протяженного радиоизлучения это второе существенное различие между FR0 и FRI галактиками, однако свойства их родительских галактик схожи.

После выделения в отдельный класс объектов было проведено первое исследование выборки из 7 FR0 галактик с угловым разрешением вплоть до $\sim 0.2''$ на частотах 1.4, 4.5, 7.5 ГГц [3, 4]. В результате была выявлена компактная неразрешенная (либо частично разрешенная) структура объектов на масштабах 1–3 кпк, отмечены основные свойства родительских галактик. В дальнейшем, на основе NVSS, FIRST и SDSS обзоров был составлен каталог из 108 объектов FR0 [5].

Выборка 18 источников из каталога FR0CAT была исследована на трех частотах (1.5, 4.5, 7.5 ГГц) с угловым разрешением до $\sim 0.3''$ [7]. В работе [7] установлено, что большинство объектов остаются неразрешенными, только у четырех объектов было выявлено слабое протяженное радиоизлучение. Спектры большинства объектов в диапазоне 1.5–4.5 ГГц оказались плоскими со значением спектрального индекса $-0.2 < \alpha < 0.4$, тогда как 6 источников демонстрировали крутые спектры с $-1 < \alpha < -0.5$ (спектральный индекс α определяется из соотношения $S \sim \nu^\alpha$). В работе [7] отмечено, что радиогалактики FR0 схожи с объектами FRI по многим свойствам, за исключением практически полного отсутствия протяженных радиоизлучающих структур.

Исследование рентгеновских свойств выборки из 19 радиогалактик FR0 [9] показало, что объекты FRI и FR0 схожи по своим свойствам в рентгеновском диапазоне. Однако было выявлено отличие рентгеновских свойств между галактиками FR0 и другими классами компактных радиоисточников, обладающих спектром с максимумом в области 1–5 ГГц и < 400 МГц (Gigahertz-Peaked Spectrum и Compact-Steep Spectrum, GPS и CSS).

Выборка из 14 FR0 галактик была исследована на парсековых масштабах путем анализа архива радиоинтерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) [6]. Были выявлены следующие структуры: компактное радиодро, радиодро и двусторонний джет, радиодро и односторонний джет. Для некоторых объектов данные за несколько эпох наблюдений позволили оценить скорость движения джета, лежащую в диапазоне от $0.23c$ до $0.49c$, что означает их умеренно релятивистский характер. Радиосвойства рассмотренной выборки галактик FR0, полученные из анализа VLBI наблюдений, делают их схожими с GPS/CSS-источниками.

Несмотря на успехи последних лет, природа радиогалактик FR0 и их связь с другими классами радиоисточников остается малоизученной. Необходимы систематические исследования в широком диапазоне частот, которые к настоящему времени отсутствуют. В данной работе представлены результаты наблюдений радиогалактик FR0 на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 1.25–22.3 ГГц.

2. ВЫБОРКА И НАБЛЮДЕНИЯ

В выборку включены 34 объекта из каталога FR0CAT [5] со спектральной плотностью потока (далее, для краткости – плотность потока) $S > 30$ мЯн на частоте 1.4 ГГц согласно обзору

NVSS [10]. Координаты объектов: склонение от -8° до $+47^\circ$, прямое восхождение от 01^h до 17^h . Красное смещение всех источников $z < 0.05$. Основные параметры объектов приведены в табл. 1.

Наблюдения по программе исследования радиосвойств галактик FR0 проведены в транзитной моде [11] на Северном секторе РАТАН-600 (при горизонтальном прохождении источника в меридиане через неподвижную диаграмму направленности телескопа благодаря суточному вращению Земли) в течение нескольких суток в феврале, апреле и мае 2020 г. Параметры радиотелескопа и радиометров континуума вторичного зеркала № 1 приведены в [12]. Из 34 объектов выборки проведены наблюдения 33. Для максимального охвата выборки наблюдения объектов чередовались, однако некоторые удалось наблюдать ежедневно в рамках выделенного наблюдательно-го времени. Результаты измерений плотностей потоков приведены в табл. 2. Для ряда источников квазиодновременные спектры получены дважды. Под квазиодновременным мы подразумеваем спектр, полученный в результате осреднения всех записей прохождения источника на временном масштабе 7–10 сут. Квазиодновременные спектры дополнены данными из базы CATS [13, 14] и приведены на рис. 1.

Обработка наблюдательных данных проведена в автоматизированной системе обработки [15] с использованием штатного пакета FADPS [16]. Большинство источников (70%) детектированы на трех и более частотах, четыре объекта детектированы на пяти частотах. На 1–2 частотах детектированы 10 объектов (30%).

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Радиосветимость и параметр доминирования радиодро

На частоте 4.7 ГГц детектированы все наблюдавшиеся объекты. Интегральная радиосветимость на данной частоте вычислена согласно формуле:

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

где ν – частота, S_ν – плотность потока, z – красное смещение, α – спектральный индекс, D_L – фотометрическое расстояние, L_ν – спектральная светимость на частоте ν (на единичный интервал частот).

На рис. 2 приведена гистограмма распределения радиосветимости. Радиосветимость распределена по нормальному закону в диапазоне $10^{38.8-40.6}$ эрг/с. Среднее и медианное значения практически совпадают и равны $10^{39.7}$ эрг/с. Та-

Таблица 1. Выборка

Объект	RA	Dec	z	$\log vL_v$	$\log R$	Тип спектра
J0115+00	01:15:15.75	00:12:47.1	0.045	39.98	-0.128	steep
J0151-08	01:51:27.13	-08:30:19.6	0.018	38.77		
J0807+14	08:07:16.85	14:57:03.0	0.029	39.38	0.017	peaked
J0906+41	09:06:52.78	41:24:29.0	0.027	39.85	0.296	peaked
J0907+32	09:07:34.82	32:57:22.6	0.049	39.75	-0.373	flat*
J0909+19	09:09:37.48	19:28:07.2	0.028	40.15	0.332	peaked
J0910+18	09:10:39.99	18:41:47.3	0.028	39.53	-0.304	steep
J0930+34	09:30:03.48	34:13:24.6	0.042	39.64	-0.245	steep*
J0933+10	09:33:46.11	10:09:09.3	0.011	38.79	-0.145	steep
J0943+36	09:43:19.16	36:14:52.1	0.022	40.20	0.648	peaked
J1025+10	10:25:44.21	10:22:31.4	0.046	40.46	0.109	steep
J1037+43	10:37:19.33	43:35:15.4	0.025	39.73	-0.290	upturn
J1040+09	10:40:28.33	09:10:57.0	0.019	39.10	-0.406	steep
J1048+04	10:48:11.89	04:59:53.8	0.034	39.59	-0.202	peaked
J1057+40	10:57:31.13	40:56:46.4	0.025	39.06	-0.540	steep*
J1111+28	11:11:13.15	28:41:47.4	0.029	39.91	0.424	inverted
J1116+29	11:16:22.71	29:15:07.7	0.045	40.10	-0.127	peaked
J1142+26	11:42:32.85	26:29:20.7	0.030	39.64	0.073	peaked
J1148+37	11:48:04.58	37:26:37.7	0.042	39.79	-0.068	steep
J1205+20	12:05:51.52	20:31:18.3	0.024	39.55	-0.136	peaked
J1230+47	12:30:11.81	47:00:22.9	0.039	39.94	-0.405	upturn
J1243+03	12:43:18.82	03:33:00.4	0.048	39.76	-0.601	steep*
J1246+11	12:46:33.72	11:53:47.1	0.047	39.61		steep*
J1250+00	12:50:27.39	00:13:45.7	0.047	40.08	0.009	inverted
J1308+43	13:08:37.91	43:44:15.7	0.036	39.71	-0.263	upturn
J1334+13	13:34:55.99	13:44:32.3	0.023	38.98		
J1336+03	13:36:21.17	03:19:52.1	0.023	39.19		steep*
J1350+33	13:50:36.01	33:42:18.4	0.014	39.26	-0.016	peaked
J1559+44	15:59:53.99	44:42:32.2	0.042	39.64	-0.466	flat*
J1604+17	16:04:26.53	17:44:33.2	0.041	40.33	0.120	peaked
J1606+18	16:06:16.06	18:14:59.3	0.037	40.57	-0.017	steep
J1625+40	16:25:49.97	40:29:20.9	0.029	40.48	-0.005	inverted
J1703+24	17:03:58.51	24:10:40.0	0.031	39.25		steep*

ким образом, радиогалактики FR0 характеризуются умеренной энергетикой в радиодиапазоне.

Относительный вклад излучения радиоядра можно охарактеризовать параметром $R = S_{8.2}/S_{1.4}$, т.е. отношением плотности потока на 8.2 ГГц к

плотности потока на частоте обзора NVSS [10]. Распределение $\log R$ приведено на рис. 3, среднее и медиана равны ≈ -0.10 и ≈ -0.13 соответственно. Полученные значения подтверждают дефицит протяженного радиоизлучения галактик FR0 от-

Таблица 2. Плотности потоков по наблюдениям на РАТАН-600

Объект	JD	$S_{22.3}$	$S_{11.2}$	$S_{8.2}$	$S_{4.7}$	$S_{2.25}$
J0115+00	2458907		16 ± 4		44 ± 10	
	2458972		27 ± 10	32 ± 10	36 ± 5	
J0151-08	2458906				16 ± 3	
J0807+14	2458906		15 ± 4	33 ± 10	23 ± 4	
	2458983		25 ± 10		27 ± 4	
J0906+41	2458903	91 ± 10	101 ± 10	98 ± 10	78 ± 10	
	2458965		119 ± 10	113 ± 10	90 ± 10	
J0907+32	2458975			20 ± 4	20 ± 3	
J0909+19	2458907	63 ± 10	83 ± 10	126 ± 10	160 ± 10	115 ± 10
	2458969		115 ± 10	172 ± 10	157 ± 10	
J0910+18	2458980		17 ± 4	25 ± 5	38 ± 5	84 ± 10
J0930+34	2458975			19 ± 4	21 ± 4	
J0933+10	2458905		21 ± 5	45 ± 10	48 ± 10	
	2458974		33 ± 10	38 ± 10	44 ± 10	
J0943+36	2458907	192 ± 20	294 ± 30	332 ± 20	278 ± 20	233 ± 20
	2458978	167 ± 20	299 ± 30	337 ± 30	295 ± 20	176 ± 10
J1025+10	2458906	70 ± 10	71 ± 10	99 ± 10	116 ± 10	169 ± 10
J1037+43	2458906		67 ± 10	63 ± 10	69 ± 10	
	2458969		69 ± 10	72 ± 10	81 ± 10	
J1040+09	2458975		25 ± 10	27 ± 5	31 ± 5	
J1048+04	2458982		30 ± 10	31 ± 10	29 ± 4	
J1057+40	2458907			13 ± 3	16 ± 3	
J1111+28	2458906	144 ± 20	118 ± 10	104 ± 10	77 ± 10	
	2458968		135 ± 10	121 ± 10	92 ± 10	
J1116+29	2458904		42 ± 10	60 ± 10	49 ± 10	
	2458979		47 ± 10	50 ± 10	57 ± 10	
J1142+26	2458905		25 ± 10	50 ± 10	42 ± 10	
J1148+37	2458904		23 ± 10	26 ± 5	30 ± 4	
J1205+20	2458906		43 ± 10	72 ± 10	54 ± 10	
	2458975		62 ± 10	60 ± 10	55 ± 10	
J1230+47	2458906		44 ± 10	37 ± 10	49 ± 10	
J1243+03	2458975			16 ± 3	21 ± 4	
J1246+11	2458904		15 ± 4		23 ± 4	
	2458967				8 ± 2	
J1250+00	2458905		67 ± 10	63 ± 10	47 ± 10	
	2458980		49 ± 10	48 ± 10	46 ± 10	
J1308+43	2458906		32 ± 10	32 ± 10	34 ± 5	
J1334+13	2458905					
	2458975				16 ± 3	
J1336+03	2458904		19 ± 5		26 ± 4	
J1350+33	2458905		90 ± 10	98 ± 10	82 ± 10	
J1559+44	2458976			21 ± 4	21 ± 4	
J1604+17	2458906	55 ± 10	101 ± 10	112 ± 10	110 ± 10	
	2458969	138 ± 20	137 ± 10	148 ± 10	108 ± 10	
J1606+18	2458906	131 ± 20	169 ± 20	207 ± 20	230 ± 10	263 ± 20
	2458972	160 ± 20	178 ± 20	223 ± 20	241 ± 10	219 ± 10
J1625+40	2458906		40 ± 10	33 ± 10	31 ± 5	
	2458980		30 ± 10	31 ± 10	32 ± 5	
J1703+24	2458906		11 ± 3		16 ± 3	

Примечание. Плотность потока приведена в мЯн.

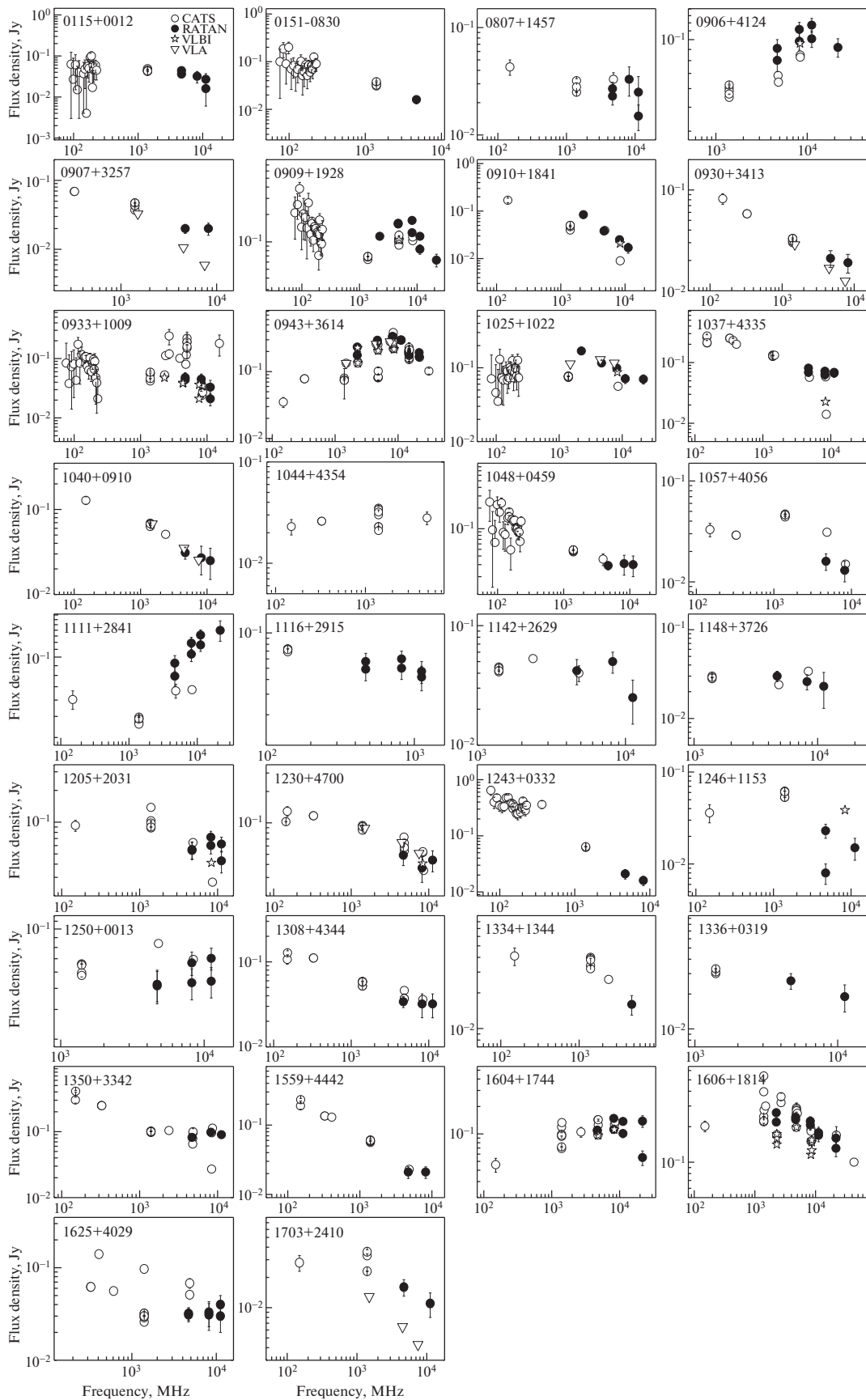


Рис. 1. Континуальные радиоспектры выборки FR0 радиогалактик.

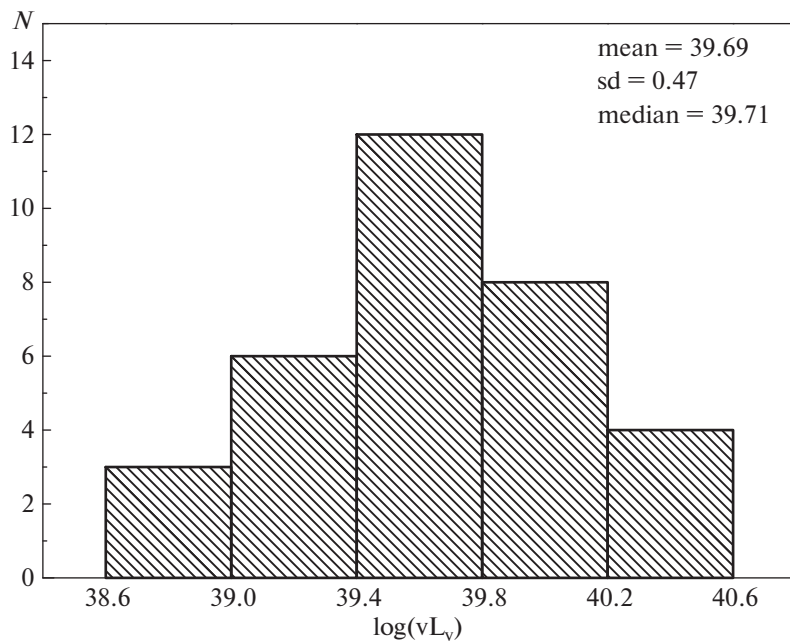


Рис. 2. Распределение радиосветимости на 4.7 ГГц.

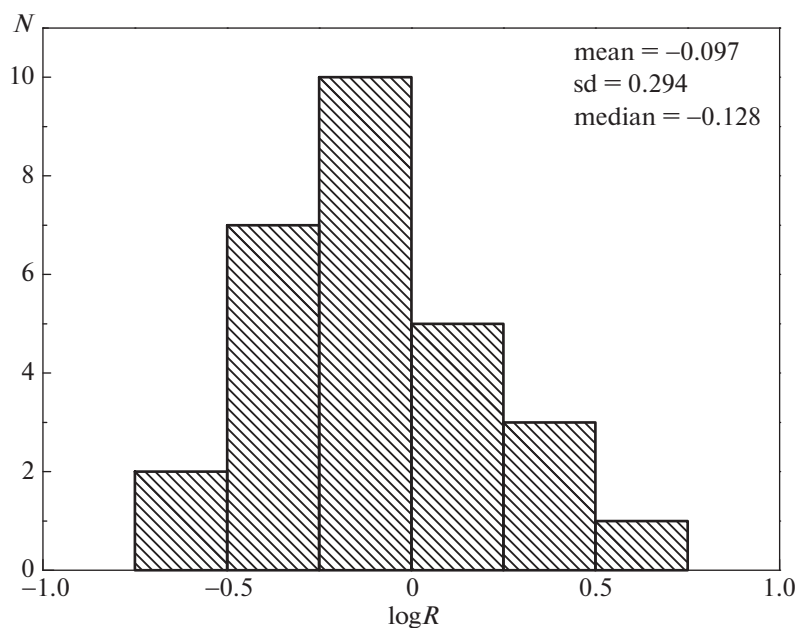


Рис. 3. Распределение параметра доминирования радиоядра.

носителю FRI, для которых $\log R \approx -1$. Наш результат согласуется с распределением параметра доминирования радиоядра FR0 галактик, найденном в работе [3].

3.2. Континуальные радиоспектры

В результате наблюдений на РАТАН-600 получены квазиодновременные континуальные радиоспектры галактик FR0 в диапазоне 2.25–22.3 ГГц.

Таблица 3. Типы квазисовременных спектров FR0

Тип	N	%
steep	7	30.4
inverted	3	13.0
peaked	10	43.5
upturn	3	13.0

На трех и более частотах детектированы 23 источника, что позволяет классифицировать их по форме спектра. Обычно выделяют следующие типы спектров [17, 18]: 1) steep (falling) – падающий, характеризуется уменьшением плотности потока с увеличением частоты; 2) inverted – инвертированный (растущий), характеризуется увеличением плотности потока с увеличением частоты; 3) peaked – плотность потока достигает максимума на некоторой частоте, после чего уменьшается; 4) upturn – для этого типа характерен минимум плотности потока, далее происходит ее рост с увеличением частоты. В такой простой классификационной схеме спектр представляется одной, либо двумя компонентами, каждая из которых приближенно может быть описана степенным законом $S \sim \nu^\alpha$, где α – спектральный индекс. В случае, если спектр имеет сложную форму, и не может быть представлен одной или двумя компонентами, его относят к complex-типу [19]. Также, в зависимости от значения спектрального индекса, выделяют плоские (flat) спектры, обычно к ним относят в случае $|\alpha| \leq 0.5$.

В табл. 3 приведено распределение по типу спектра объектов FR0 с тремя и более точками на спектре. Отметим, что количество источников с steep-спектрами равно 7 ($\approx 30\%$), тогда как большинство объектов ($n = 10, \approx 44\%$) имеют peaked-спектры. Объектов с inverted, либо upturn-спектрами $\approx 26\%$. Таким образом, в спектрах большинства радиогалактик FR0 отмечается существенный вклад областей, оптически толстых в радиодиапазоне. Этот результат неудивителен, учитывая их компактную структуру и доминирование радиоядра в излучении. Интересно, что 3 объекта из 8 с 2 точками на спектре детектированы на частотах 4.7 и 11.2 ГГц, но не детектированы на 8.2 ГГц, хотя чувствительность на этой частоте выше по сравнению с 11.2 ГГц. Формально спектры этих источников следует отнести к steep-типу. Однако не исключено, что плотность потока на 8.2 ГГц меньше, чем на 11.2 ГГц, в таком случае спектры этих объектов относятся к upturn-типу. Если дальнейшие наблюдения подтвердят это предположение, то около четверти FR0 галактик в исследуемой выборке обладают upturn-спектрами. Это может свидетельствовать о

Таблица 4. Статистика спектральных индексов

Диапазон	N	Среднее	Медиана	sd
2.25–4.7	5	–0.145	–0.031	0.655
4.7–8.2	28	–0.026	–0.054	0.333
8.2–11.2	23	–0.538	–0.387	0.719
11.2–22.3	7	–0.305	–0.287	0.337

наличии высокочастотной компоненты, связанной с компактными джетами на масштабах парсек. В табл. 1 приведен тип спектра источника согласно измерениям на РАТАН-600. Звездочкой отмечены объекты, детектированные на 2 частотах.

В табл. 4 приведена описательная статистика спектральных индексов, рассчитанных по квазисовременным данным РАТАН-600 согласно формуле

$$\alpha = \frac{\log S_2 - \log S_1}{\log \nu_2 - \log \nu_1}, \quad (2)$$

где S_1 и S_2 – плотности потока на частотах ν_1 и ν_2 соответственно ($\nu_2 > \nu_1$).

Во всех частотных диапазонах квазисовременные спектры FR0 радиогалактик в среднем плоские, поскольку $|\alpha| \leq 0.5$. В диапазоне 4.7–8.2 ГГц средний спектральный индекс практически равен нулю, только для трех объектов $0.5 < |\alpha| < 1.0$. На 8.2–11.2 ГГц спектр становится более крутым, отмечается больший разброс значений спектрального индекса, у семи объектов $\alpha < -1$ (см. рис. 4). В диапазонах 2.25–4.7 и 11.2–22.3 ГГц число измеренных спектральных индексов невелико, поэтому делать выводы можно только относительно отдельных объектов.

Характерные особенности в разных частотных диапазонах проявляются в среднем спектре, построенном на основе аппроксимации квазисовременных спектров 29 источников полиномом 1-й либо 2-й степени (рис. 5). Осреднение проведено в пространстве потоков, согласно методу, разработанному в работе [20]. Отличительная особенность среднего спектра – наличие плоского участка в диапазоне 3–7 ГГц, на котором спектральный индекс практически равен нулю. В диапазонах < 3 и > 7 ГГц плотность потока уменьшается с увеличением частоты. Средний спектр можно рассматривать как результат сложения двух компонент: падающей в низкочастотной области и peaked-компоненты в высокочастотной. В [21] показано, что двухкомпонентная модель позволяет удовлетворительно промоделировать широкодиапазонные радиоспектры внегалактических радиоисточников.

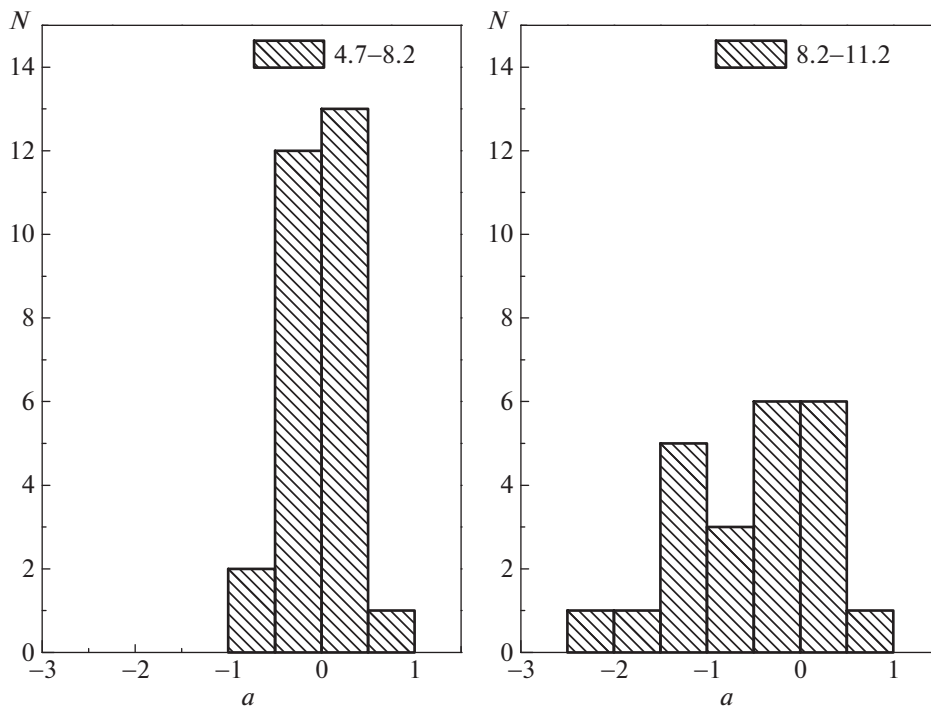


Рис. 4. Распределение спектральных индексов по частотным диапазонам.

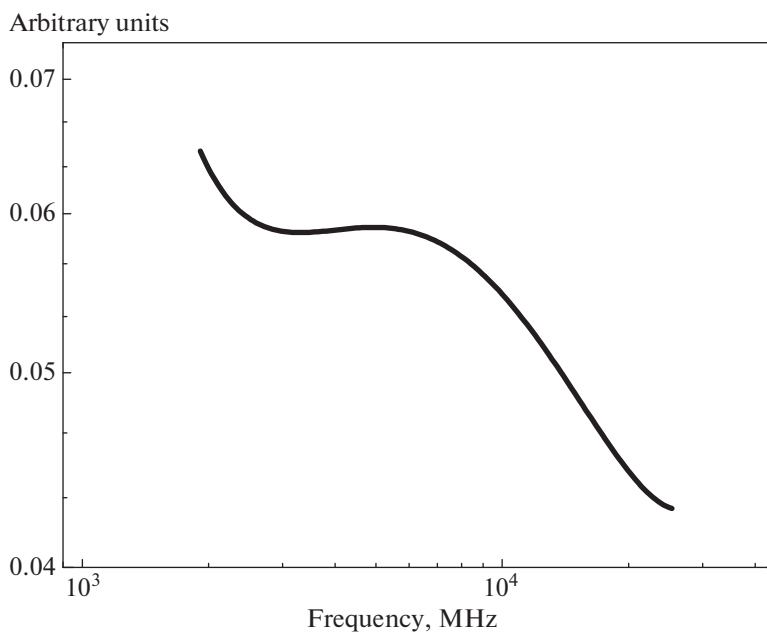


Рис. 5. Средний спектр FR0 по данным РАТАН-600.

3.3. Ширина спектра

Согласно данным РАТАН-600, из 23 объектов с тремя и более точками на спектре, у 16 объектов выпуклый (convex) спектр. Мы аппроксимирова-

ли convex-спектры параболой и определили ширину спектра на уровне половины максимума (Full Width at Half Maximum, FWHM) [22]. На рис. 6 приведено распределение FWHM, боль-

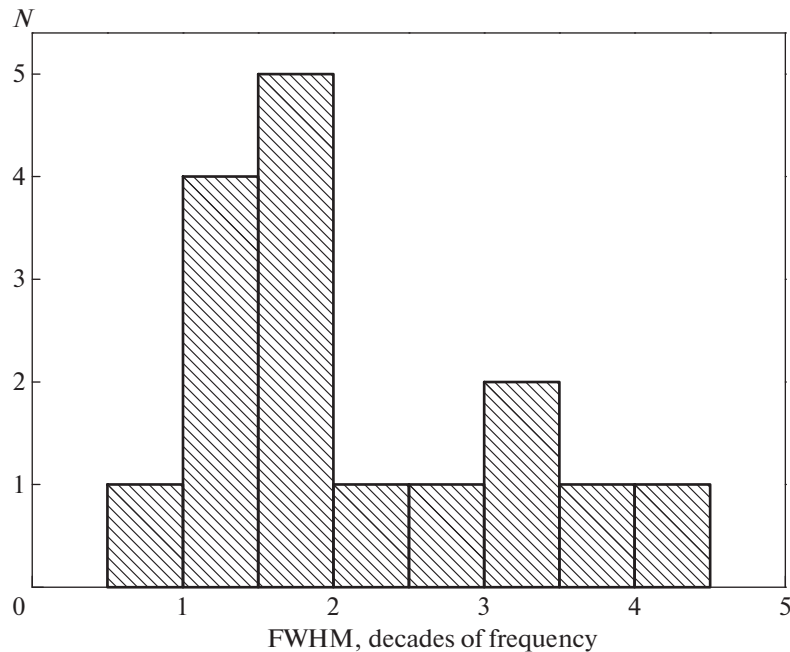


Рис. 6. Ширина квазиодновременного спектра по данным РАТАН-600.

шинство объектов обладают $\text{FWHM} = 1\text{--}2$ декады частоты, вместе с тем в распределении заметен “хвост” из объектов с большим значением FWHM . Среднее и медиана равны 2.14 и 1.78 декады частоты соответственно. Для классических GPS типичное значение $\text{FWHM} = 1.2$ декады частоты. Наши результаты показывают, что FR0 галактики обладают в целом меньшей кривизной спектра в сравнении с классическими GPS-источниками, это было отмечено также в работе [23], однако авторы рассматривали неодновременные литературные данные в диапазоне 0.15–5 ГГц. Кроме того, сравнение FWHM в области 4.7–11.2 ГГц (наши данные) и в области 0.15–5 ГГц говорит о возможном укручении спектра с увеличением частоты, что было отмечено в VLA наблюдениях и может свидетельствовать о наличии пика на ГГц частотах. Мы обсудим вопрос о возможных кандидатах в GPS-источники ниже.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные на РАТАН-600 в диапазоне 2.25–22.3 ГГц квазиодновременные спектры выборки FR0 радиогалактик в большинстве случаев плоские. Это означает большую степень непрозрачности FR0 на исследованных частотах и соответствует хорошо известной закономерности, согласно которой компактные радиоисточники обычно обладают плоским спектром. Учитывая, как правило, большую степень переменности объектов с плоским спектром интересно исследо-

вать вопрос о переменности FR0 галактик. Для этого необходимы мониторинговые наблюдения в широком диапазоне частот на протяжении длительного времени. Отметим, что популяцию FR0 галактик вряд ли справедливо рассматривать как маломощные аналоги блазаров. Главный аргумент против этого: численное доминирование FR0 в ближней Вселенной, что маловероятно для объектов, ориентированных под малым углом к лучу зрения. Конечно, отдельные объекты, относимые ныне к классу FR0, могут оказаться низкоэнергичными аналогами блазаров. Здесь мы затрагиваем вопрос о степени однородности исходного каталога FR0CAT [5] и связи FR0 галактик с другими классами внегалактических радиоисточников. Не вызывает сомнения, что FR0CAT довольно неоднороден. Ниже мы коснемся вопроса о связи радиогалактик FR0 и GPS-источников.

Вопрос о природе радиогалактик FR0 открыт и требует исследования. В [5] рассматриваются следующие возможности: 1) это молодые объекты, в дальнейшем эволюционирующие в радиогалактики FRI; 2) объекты, в которых формирование крупномасштабных джетов и радиоструктур не происходит из-за относительной кратковременности фаз активности; 3) объекты с умеренно релятивистскими джетами. Как отмечено в [5], численная плотность FR0 галактик примерно в 5 раз выше, чем FRI радиогалактик. Это обстоятельство приводит к большим трудностям, если рассматривать FR0 как молодые объекты, постепенно эволюционирующие в FRI. Вторая воз-

Таблица 5. Отношения плотностей потоков на частотах РАТАН-600 и VLA

Источник	$\frac{S_{4.7, \text{РАТАН-600}}}{S_{4.5, \text{VLA}}}$	$\frac{S_{8.2, \text{РАТАН-600}}}{S_{7.5, \text{VLA}}}$
J0907+32*	1.89	3.38
J0930+34	1.25	1.52
J0943+36	1.11	1.19
J1025+10	0.90	0.85
J1040+09	0.88	1.06
J1230+47	0.75	0.72
J1703+24*	2.48	2.56

можность требует тщательных исследований длительности фаз активности и характера аккреции. Третья находит некоторую поддержку из VLBI наблюдений, которые выявили наличие умеренно релятивистских джетов со скоростями $0.23c$ и $0.49c$ для двух объектов FR0 на парсековых масштабах [6]. Умеренно релятивистский характер джетов может быть связан с тем, что FR0 галактики обладают СМЧД с малым спином [24].

Ниже мы сравним результаты, полученные для одних и тех же объектов на РАТАН-600, VLA и VLBI, а также обсудим вопрос о местоположении радиогалактик FR0 на фундаментальной плоскости АЯГ.

4.1. Сравнение с наблюдениями на VLA

На РАТАН-600 проведены наблюдения 7 объектов из 18, наблюдавшихся на VLA на частотах 1.5, 4.5 и 7.5 ГГц с разрешением вплоть до $0.3''$ [7]. Интервал между датами наблюдений на РАТАН-600 и VLA чуть более 3 лет. В табл. 5 приведены отношения плотностей потоков на близких частотах. Звездочкой отмечены объекты, у которых в VLA наблюдениях выявлено наличие протяженного радиоизлучения. Для этих объектов плотность потока, детектируемая на РАТАН-600, в 2–3 раза превосходит плотность потока радиоядра, детектированную VLA. Для двух объектов плотность потока, согласно данным РАТАН-600, несколько больше. У трех объектов плотность потока меньше, эта разница может быть обусловлена ошибками измерений и переменностью источников. Таким образом, сопоставление РАТАН-600 и VLA данных подтверждает, что FR0 галактикам свойственен дефицит протяженного радиоизлучения.

Таблица 6. Отношения плотностей потоков на частотах РАТАН-600 и VLBI

Источник	$\nu_{\text{VLBI}}, \text{ МГц}$	$\frac{S_{\text{РАТАН-600}}}{S_{\text{VLBI}}}$
J0906+41	8355	1.10
J0909+19	4845	1.52
J0910+18	8355	1.20
J0933+10	4344	1.19
J0933+10	8355	1.22
J0943+36	2300	0.91–1.52
J0943+36	4845	1.40
J0943+36	8646	1.20–1.55
J1025+10	4845	1.14
J1037+43	8355	2.98
J1205+20	8355	1.60
J1230+47	8355	0.90
J1246+11	8355	–
J1604+17	4845	1.13
J1604+17	8355	1.17
J1606+18	2300	1.39–1.71
J1606+18	4845	1.19
J1606+18	8600	1.40–1.86

4.2. Сравнение с VLBI наблюдениями

Из 14 объектов FR0, для которых проведен анализ архивных VLBI наблюдений с целью исследования радиоструктуры на парсековых масштабах [6], на РАТАН-600 проведены наблюдения 12 источников. В табл. 6 приведены отношения плотности потока на частоте РАТАН-600 к интегральной плотности потока на близкой частоте VLBI. Временной интервал между наблюдениями составляет от 5 до 15 лет. Несмотря на это, плотности потоков, детектированные на РАТАН-600, и интегральные плотности потоков VLBI очень близки. Исключение представляет J1037+43, для которого измерения РАТАН-600 плотности потока на 8.2 ГГц почти в 3 раза больше данных VLBI на 8355 МГц. Разница между наблюдениями составляет 9 лет. Вторым, более интересным исключением, является J1246+11, который не удалось детектировать на частоте РАТАН-600 8.2 ГГц, несмотря на то, что объект наблюдался в течение двух наблюдательных эпох. Отметим, что интегральный поток J1246+11 на 8355 МГц составляет 38.54 мЯн, что превосходит чувствительность РАТАН-600 на соответствующей частоте. Разница между наблюдениями составляет

почти 8 лет. В целом наши результаты подтверждают высокую степень компактности радиоизлучающих областей в FR0 галактиках, поскольку плотности потоков, измеренные на РАТАН-600 и VLBI, мало отличаются в большинстве случаев. Кроме этого, из сравнения данных РАТАН-600 и VLBI следует, что FR0 объекты не подвержены существенной переменности на рассматриваемых временных масштабах (кроме, возможно, J1246+11), однако для проверки этого необходимы длительные наблюдения.

Три объекта наблюдались на РАТАН-600, VLA и VLBI. Для J1025+10 плотность потока на 7500 МГц (VLA) составляет 116.2 мЯн, на 8200 МГц (РАТАН-600) – 99 мЯн, интегральный поток на 8355 МГц (VLBI) 87 мЯн. На этих же частотах плотности потока J1230+47 равны 51, 37 и 41 мЯн соответственно. Плотность потока J0943+36 на частоте 4500 МГц (VLA) равна 258 мЯн, на 4700 МГц (РАТАН-600) 287 мЯн, на 4845 МГц (VLBI) 205 мЯн. Для этого же объекта плотность потока на частоте 7500 МГц 280 мЯн, на 8200 МГц 335 мЯн, на 8646 МГц (VLBI) плотность потока возрастала в период 2005–2014 гг. и составляла 216, 255 (2012 г.) и 269 мЯн. Мало отличающиеся значения плотности потока на близких частотах для инструментов с угловым разрешением от тысячных долей угловой секунды до десятков угловых секунд также подтверждают большую степень компактности областей радиоизлучения в рассматриваемых объектах.

4.3. FR0 галактики и GPS источники

Как отмечено выше, в спектрах, полученных на РАТАН-600, преобладают peaked-спектры. Поскольку пик приходится на частоту в области 8.2–11.2 Гц ряд объектов потенциально можно отнести к типу High Frequency Peaked (HFP), т.е. GPS с частотой максимума более 5 ГГц. Для уверенного вывода о том, являются ли объекты с пиком в области 8.2–11.2 ГГц, действительно HFP-источниками, или же пик обусловлен переменностью и вспышечной активностью источника, необходимы дальнейшие мониторинговые наблюдения объектов выборки. Пока же мы можем выявить наиболее вероятных кандидатов в GPS источники, опираясь на данные из базы CATS и измерения РАТАН-600. Из 34 объектов выборки 16 можно рассматривать в качестве кандидатов в GPS (см. рис. 1). Однако в большинстве случаев эти объекты не удовлетворяют классическим критериям отбора [22]: ширина пика $\text{FWHM} = 1.2$, спектральный индекс ниже частоты пика $\alpha_{below} = +0.5$, выше частоты пика $\alpha_{high} = -0.7$ (см. табл. 7). Звездочкой отмечены объекты, у которых спектральные индексы соответствуют классическому критерию отнесения к GPS-объ-

Таблица 7. Объекты с пиком на спектре

Источник	α_{below}	α_{high}	ν_{peak} , ГГц
J0115+00*	0.447	-0.723	0.22/4.85
J0906+41	0.437	-0.282	12.92/10.93
J0909+19*	0.403	-0.738	5.34/4.79
J0943+36*	0.524	-0.691	8.08/6.67
J1025+10	0.365	-0.451	0.98/-
J1057+40	0.228	-0.644	0.84/-
J1111+28	0.471	?	?/28.61
J1116+29	?	-0.671	6.34/6.34
J1142+26	0.390	-0.435	2.93/6.47
J1205+20	0.034	-0.385	0.37/7.07
J1246+11	0.209	-0.624	0.29/-
J1334+13	?	-0.675	0.39/-
J1336+03	?	-0.361	1.16/-
J1604+17	0.210	-0.382	5.67/8.32
J1606+18	0.162	-0.253	0.54/2.43
J1703+24	?	-0.642	0.14/-

ектам, однако для них FWHM больше 1.2 декады частоты, т.е. переход от оптически толстой области к оптически тонкой – широкий. Отметим, что в наблюдениях GPS источников часто $\text{FWHM} > 1.2$. В работе [25] найдено, что среднее значение $\text{FWHM} = 1.4-1.5$ для GPS первого и второго типа. Для J0115+00 частота пика, по-видимому, лежит в области 0.2–1.4 ГГц, для ее уточнения необходимы наблюдения в этом диапазоне. Объект J0909+19 имеет пик около 5 ГГц, однако его ширина несколько превышает две декады частоты. Третий объект, J0943+36, имеет пик на 7–8 ГГц и его ширина 1.4–1.8 декады частоты наиболее близка к классическим критериям, этот объект можно уверенно отнести к HFP-типу. Объект J0906+41 можно рассматривать как кандидат в HFP с частотой пика около 11–13 ГГц, к сожалению, в высокочастотной области имеется всего одно измерение на 22.3 ГГц. Крайне интересен источник J1111+28, который имеет пик на частоте заведомо больше 20 ГГц, в этом случае также нужны дополнительные наблюдения, особенно в области высоких частот. Среднее значение радиосветимости на 4.7 ГГц рассматриваемых 16 объектов составляет $10^{39.8}$ эрг/с, что почти на 5 порядков меньше среднего значения $\approx 10^{44.5}$ эрг/с для GPS, исследованных в работе [25]. Таким образом, некоторые из объектов FR0

потенциально можно рассматривать как GPS-источники малой мощности.

Как видно из табл. 7, ряд объектов могут иметь пик на частоте менее 0.5 ГГц (кандидаты в CSS-источники), ряд объектов — на частоте около 1–5 ГГц. Однако в большинстве случаев величина спектрального индекса по модулю меньше классических α_{below} и α_{high} . Знак “?” использован в случаях, когда оценить спектральный индекс невозможно из-за отсутствия данных. В последнем столбце табл. 7 первой приведена предсказываемая частота пика с учетом всех доступных данных (CATS + ПАТАН), второй — предсказываемая частота пика только по данным ПАТАН-600 (знаком “–” отмечены объекты, у которых не обнаружен выпуклый спектр). Это наглядно демонстрирует недостаточность имеющихся данных, особенно в области 300–1400 МГц, а также необходимость мониторинговых квазиодновременных измерений в широком диапазоне частот.

4.4. FR0 радиогалактики на фундаментальной линии АЯГ

Для АЯГ и двойных систем с черными дырами звездных масс хорошо известно эмпирическое соотношение между радиосветимостью ядра (обычно на частоте 5 ГГц), рентгеновской светимостью (в диапазоне 2–10 кэВ) и массой ЧД, так называемая фундаментальная плоскость [26]. Считается, что радиосветимость является мерой мощности джета, а рентгеновская светимость — болометрической светимости аккреционного диска. С этой точки зрения, фундаментальная плоскость отражает основополагающую связь между джетом и аккреционным диском и универсальность физических механизмов, приводящих к феномену активности аккрецирующих ЧД. Изучению фундаментальной плоскости посвящено много работ, предложены разные варианты записи выражающего ее соотношения. Получены аргументы в пользу того, что фундаментальная плоскость распространяется на много порядков мощности, охватывая не только многие классы АЯГ, но и микроквазары. Поэтому возникла идея записать фундаментальную плоскость в безразмерных единицах. При таком подходе мощность джета и болометрическая светимость аккреционного диска выражаются через эддингтоновскую светимость L_{Edd} , зависящую от массы ЧД: $L_{Edd} \approx 1.3 \times 10^{38} M_{BH}/M_{\odot}$ эрг/с. В этом случае разброс точек на фундаментальной плоскости уменьшается, поэтому получившаяся зависимость в [27] названа фундаментальной линией. Итак, согласно [27], взаимосвязь между мощно-

стью джета и болометрической светимостью диска можно представить в виде:

$$\log \frac{L_j}{L_{Edd}} = A \log \frac{L_{bol}}{L_{Edd}} + B. \quad (3)$$

Оценку болометрической светимости аккреционного диска в радиогалактиках FR0 можно сделать, следуя соотношению $L_{bol} = 3500 L_{OIII}$ [28]. Такой метод использован в [5], мы берем оценки масс центральных СМЧД и болометрической светимости из этой работы. Для близких АЯГ мощность джета удается определить по работе и времени, необходимыми для раздувания так называемых пузырей (bubbles), наблюдаемых вокруг галактик по рентгеновскому излучению [29–31]. Исследуя взаимосвязь между найденной таким способом кинетической мощностью джета и светимостью радиоядра на 5 ГГц, авторы работы [32] нашли корреляцию между этими величинами:

$$\log L_j = (0.81 \pm 0.11) \log L_R + 11.9_{-4.4}^{+4.1}. \quad (4)$$

Радиогалактики FR0 на парсековых масштабах обычно обладают морфологией с односторонним или двусторонним джетом [6]. Как мы показали выше, на близких частотах данные ПАТАН-600 и интегральный поток VLBI отличаются мало. Поэтому мы предполагаем, что радиосветимость на 5 ГГц обусловлена наличием джета. Для оценки мощности джета по формуле (4) мы используем радиосветимость на 4.7 ГГц: эта частота близка к 5 ГГц, кроме того, согласно нашим данным, спектральный индекс между 4.7 и 8.2 ГГц близок к нулю. Линейный регрессионный анализ наших данных согласно уравнению (3) дает следующие значения параметров: $A = 0.52 \pm 0.15$, $B = -0.69 \pm 0.51$. Результаты теста Кендалла: коэффициент корреляции: $\tau = 0.35$ и $p_{value} = 4.6 \times 10^{-3}$ подтверждают статистическую значимость найденной корреляции.

В работе [27] изучено соотношение (3) для различных выборок, включающих ЧД звездных масс и различные классы АЯГ: от LINER до мощных радиогалактик FRII. Авторы работы [27] нашли, что параметр A лежит в пределах 0.39–0.47, параметр B от –0.94 до –1.37. Полученное нами значение A согласуется с этими результатами, значение свободного параметра несколько больше. Отметим, что полученные нами параметры регрессионной модели хорошо согласуются с результатами [32]: $A = 0.49 \pm 0.07$, $B = 0.78 \pm 0.36$. Подчеркнем, что в работе [32] изучена выборка близких АЯГ с мощностью джета, определенной по bubbles, тогда как в [27] собраны данные о мощности джета, полученные разными способами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты наблюдений радиогалактик FR0 на РАТАН-600 в диапазоне 1.25–22.3 ГГц. Измерены квазисовременные спектры объектов на масштабах 7–10 дней. Для 8 объектов высокочастотные данные получены впервые (в области более 5 ГГц). На пяти частотах в диапазоне 2.25–22.3 ГГц детектированы 4 объекта, большинство источников (23 из 33) детектированы на трех и более частотах, что позволило классифицировать их квазисовременные спектры по форме. Основные результаты следующие:

1. Радиогалактики FR0 обладают умеренной энергетикой: радиосветимость объектов выборки на частоте 4.7 ГГц лежит в диапазоне $10^{38.8-40.6}$ эрг/с со средним значением $10^{39.7}$ эрг/с. Вычисленный параметр доминирования радиоядра подтверждает дефицит протяженного радиоизлучения FR0 в сравнении с FRI радиогалактиками.

2. Квазисовременные спектры большинства объектов ($\approx 44\%$) имеют peaked-форму. Спектры преимущественно плоские во всех частотных диапазонах, в области 4.7–8.2 ГГц средний спектральный индекс практически равен нулю. Таким образом, в спектр FR0 галактик в исследованном диапазоне частот существенный вклад вносят оптически толстые области.

3. Ряд объектов исследованной выборки имеют пик в спектре около 8–11 ГГц. В сравнении с GPS-источниками галактики FR0 обладают меньшей кривизной спектра, хотя некоторые из них, вероятно, можно отнести к классу GPS. Выделены 3 новых кандидата в GPS-источники.

4. Найдена статистически значимая корреляция между мощностью джета и болометрической светимостью аккреционного диска, выраженных

$$\text{через эддингтоновскую светимость: } \log \frac{L_j}{L_{\text{Edd}}} = (0.52 \pm 0.15) \log \frac{L_{\text{bol}}}{L_{\text{Edd}}} - (0.69 \pm 0.51).$$

Взаимодополняющие наблюдения в широком диапазоне частот и наблюдения с высоким угловым разрешением необходимы для дальнейшего прогресса в понимании природы и свойств объектов данного класса. В перспективе большой интерес представляет исследование переменности FR0 галактик, для этого необходим их длительный мониторинг.

Поскольку FR0 радиогалактики являются доминирующей популяцией радиогромких АЯГ, по крайней мере в ближней Вселенной, их изучение важно с точки зрения вклада в фоновое излучение как в радиодиапазоне, так и в других, вплоть до γ -излучения [33–35].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука”, грант 13.1902.21.0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *G. Ghisellini*, AIP Conf. Proc. **1381**, 180 (2011).
2. *E. M. Sadler, R. D. Ekers, E. K. Mahony, T. Mauch, and T. Murphy*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **438**, 796 (2014).
3. *R. D. Baldi, A. Capetti, and G. Giovannini*, Astron. and Astrophys. **576**, id. A38 (2015).
4. *R. D. Baldi, A. Capetti, and G. Giovannini*, Astron. Nachricht. **337**, 114 (2016).
5. *R. D. Baldi, A. Capetti, and F. Massaro*, Astron. and Astrophys. **609**, id. A1 (2018).
6. *X.-P. Cheng and T. An*, Astrophys. J. **863**, id. 155 (2018).
7. *R. D. Baldi, A. Capetti, and G. Giovannini*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **482**, 2294 (2019).
8. *A. Capetti, F. Massaro, and R. D. Baldi*, Astron. and Astrophys. **633**, id. A161 (2020).
9. *E. Torresi, P. Grandi, A. Capetti, R. D. Baldi, and G. Giovannini*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **476**, 5535 (2018).
10. *J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, Q. F. Yin, R. A. Perley, G. B. Taylor, and J. J. Broderick*, Astron. J. **115**, 1693 (1998).
11. *Yu. N. Parijskij*, IEEE Antennas and Propagation Magazine **35**, 7 (1993).
12. *M. Mingaliev, Yu. Sotnikova, T. Mufakharov, E. Nieppola, et al.*, Astron. Nachricht. **338**, 700 (2017).
13. *O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, and V. N. Chernenkov*, Baltic Astronomy **6**, 275 (1997).
14. *O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov*, Bull. SAO **58**, 118 (2005).
15. *П. Ю. Удовицкий, Ю. В. Сотникова, М. Г. Мингалиев, П. Г. Цыбулев, Г. В. Жеканис, Н. А. Ницельский*, Астрофиз. бюлл. **71**, 532 (2016).
16. *O. V. Verkhodanov*, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
17. *E. M. Sadler, R. Ricci, R. D. Ekers, J. A. Ekers, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **371**, 898 (2006).
18. *M. Tucci, J. A. Rubino-Martin, R. Rebolo, R. Genova-Santos, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **386**, 1729 (2008).
19. *K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, and P. J. S. Williams*, Astrophys. J. **157**, 1 (1969).
20. *О. В. Верходанов, Д. Д. Козлова, Ю. В. Сотникова*, Астрофиз. бюлл. **73**, 418 (2018).
21. *Y. A. Kovalev, Y. Y. Kovalev, and N. A. Nizhelsky*, Publ. Astron. Soc. Japan **52**, 1027 (2000).
22. *C. P. O’Dea, S. A. Baum, and C. Stanghellini*, Astrophys. J. **380**, 66 (1991).
23. *A. Capetti, R. D. Baldi, M. Brienza, R. Morganti, and G. Giovannini*, Astron. and Astrophys. **631**, id. A176 (2019).

24. *D. Garofalo and C. B. Singh*, *Astrophys. J.* **871**, id. 259 (2019).
25. *Ю. В. Сотникова, Т. В. Муфзахаров, Е. К. Майорова, М. Г. Мингалиев, Р. Ю. Удовицкий, Н. Н. Бурсов, Т. А. Семенова*, *Астрофиз. бюлл. Astrophys. J.* **74**, 359 (2019).
26. *A. Merloni, S. Heinz, and T. di Matteo*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **345**, 1057 (2003).
27. *R. A. Daly*, *Astrophys. J.* **863**, id. 117 (2018).
28. *D. Dicken, C. Tadhunter, R. Morganti, D. Axon, et al.*, *Astrophys. J.* **788**, id. 98 (2014).
29. *S. W. Allen, R. J. H. Dunn, A. C. Fabian, G. B. Taylor, and C. S. Reynolds*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **372**, 21 (2006).
30. *D. A. Rafferty, B. R. McNamara, P. E. J. Nulsen, and M. W. Wise*, *Astrophys. J.* **652**, 216 (2006).
31. *L. Birzan, B. R. McNamara, P. E. J. Nulsen, C. L. Carilli, and M. W. Wise*, *Astrophys. J.* **686**, 859 (2008).
32. *A. Merloni and S. Heinz*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **381**, 589 (2007).
33. *R. D. Baldi, E. Torresi, G. Migliori, and B. Balmaverde*, *Galaxies* **7**, 76 (2019).
34. *P. Grandi, A. Capetti, and R. D. Baldi*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 2 (2016).
35. *F. Tavecchio, C. Righi, A. Capetti, P. Grandi, and G. Ghisellini*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **475**, 5529 (2018).